

**ZÁRÓJELENTÉS (OTKA T 037864)**  
**Polimer szerkezeti elemek hegesztésének optimalizálása**  
**(készítette: Czigány Tibor)**

## **1. Bevezetés**

Az egyre bonyolultabb geometriájú, tagolt polimer termékek összeszerelése megköveteli a fémeknél már régóta használatos hegesztési kötési technikák adaptálását és továbbfejlesztését a polimer anyagok területén is [1]. A hegesztési technológia nemcsak a gyártás, javítás, hanem az újrafeldolgozás szempontjából is elsődleges, amelynek környezetvédelmi hatásai is vannak, a csökkenő hulladékképződés következtében. Természetesen, a hegesztés, mint anyaggal záró kötés tekintetében a kulcskérdés továbbra is az marad, hogy az ilyen technológiákkal gyártott, illetve javított termékek megőrzik-e az alapanyag tulajdonságait, és a kialakult varrat minőségét milyen módszerekkel lehet javítani, optimalni. Polimerek hegesztéséhez többféle technológia alkalmazható. A hegesztési technikák a fémeknél alkalmazott eljárások elvét veszik alapul [2]. Hasonlóan a fém szerkezetekhez, a polimereknél is a minél nagyobb szilárdságú, kohéziós kapcsolat létrehozása a cél. A polimerek és a fémek jól ismert anyagszerkezeti eltérése azonban számos problémát vet fel [3]. Hőre keményedő polimerek esetében a kialakult polimer térhálós szerkezetű, ezért nem vihetők ömledékállapotba. A hőre lágyuló polimerekben a polimerlánc lineáris vagy elágazott, de nem térhálós óriásmolekulákból áll. Figyelembe véve a polimerek molekuláris szerkezetét, polimerek hegesztésén kizárólag a hőre lágyuló polimerek olyan kötését értjük, amely hő és nyomás együttes hatására jön létre hegesztőanyag hozzáadásával, vagy anélkül. A hegedés alapfeltételeiből következik, hogy a kötés létrejöttéhez fizikailag megfelelő állapot szükséges [4]. Ebben a fizikai állapotban (polimerek olvadáspontja fölött), amikor két azonos szerkezetű polimer kapcsolatba kerül egymással, a határfelület mechanikai szilárdága fokozatosan eléri az alapanyag ugyanezen tulajdonságát. Abban az esetben, ha az alapanyag és a hegesztett zóna tulajdonságai közel azonosak, akkor a hegesztési határfelületek teljes mértékben eltűnhetnek. Ezt az elméletet a szakirodalom autoadhesion-nak nevezi, amelynek alapja az öndiffúzió, amelynek nagy a technológiai jelentősége, mert számos alkalmazás és eljárás alapszik a polimereknek ezen a tulajdonságán (pl. fröccsöntés, extrúzió) [5, 6].

A polimerek hegesztési eljárásai közül [7] jól feltárt területnek számít a tükörhegesztés, amelyet Potente [8], Benatar [9], Nonhof [10] és Stokes [11] több anyag típuson vizsgált, keresve a hegesztési paramétereknek az optimumát. A vibrációs hegesztés szintén jól feldolgozott területnek számít, Stokes [12], Ehrenstein [13] munkássága ebben a hegesztési eljárásban is kiemelkedő. Termoplasztikus műanyagok hegesztésére az új innovatív eljárást, a lézerhegesztést is egyre gyakrabban alkalmazzák a módszer rugalmassága, gyorsasága és megbízhatósága miatt. Ennél a hegesztési eljárásnál sok a feltáratlan terület az egyes anyagok hegeszthetősége, a hegesztési paraméterek meghatározása, valamint a kialakult hegesztett varrat mikroszerkezetét illetően [14]. Azonban számos, a mindennapok gyakorlatává vált hegesztési eljárás, mint pl. a forrógázos eljárás, szakmai-tudományos irodalma még nem mondható teljesnek, az elméletet sok esetben megelőzte a gyakorlat [15]. A vonatkozó irodalom alapján kijelenthető, hogy a legtöbb esetben a hegesztési eljárások hegesztési paramétereinek az optimumát külön-külön meghatározták, de nem vizsgálták a hegesztési paraméterek egymáshoz, illetve összességében a kialakult hegesztési varrathoz való viszonyát. A kialakult hegesztett varrat szupermolekuláris szerkezetével, illetve a hegesztési paraméterek kapcsolatával csak kevés tanulmány foglalkozik.

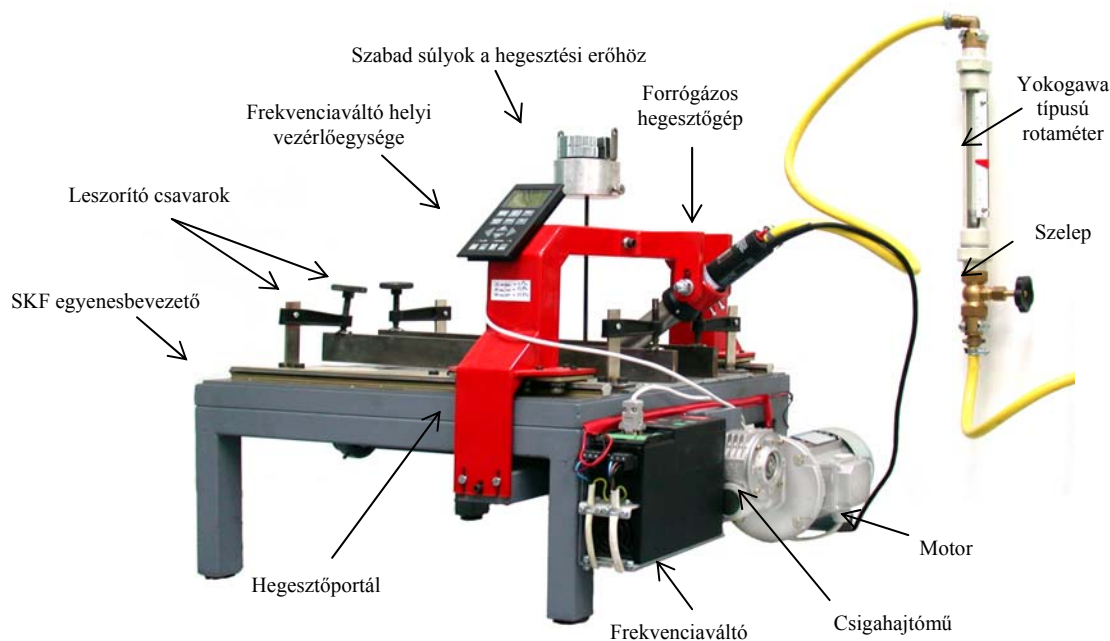
Hazai viszonylatban számos ipari cég foglalkozik műanyaghegesztéssel, amelyeknek profilja többek között élelmiszeripari tartályok, kádak, burkolatok, vagy vegyipari galvanizáló és eloxáló kádak, dobok, tartályok, esetlegesen nagyméretű, más módon nem előállítható csőidomok, úszómedence burkolatok egyedi tervezése és gyártása. A tartályok döntően polipropilén lemezből készülnek, és a szerkezeti kialakításukat háromféle hegesztési technológiával készítik: tükörhegesztéssel, forrógázos és forrógázos extrúziós hegesztéssel. A

három hegesztési eljárás közül a tükörhegesztési eljárás szakirodalma jól kidolgozott, a forrógázos extrúziós eljárás paramétereinek optimalizálását és a hegesztett varrat szerkezetét Gehde és Ehrenstein [16] feltárta, de a forrógázos hegesztést ilyen mélységben nem tárgyalta még senki. Mindezek alapján pályázatunk célja:

1. A kézi forrógázos hegesztési eljárás hegesztési paramétereinek kontrolálhatóságát, összehangolt szabályozását elméletileg és gyakorlatilag is megalapozni, és így reprodukálható hegesztési varrat előállítását lehetővé tenni.
2. Az eljárás hegesztési paramétereinek egyenkénti és együttes vizsgálata, az egyes paraméterek befolyásoló hatásának elemzése a kialakult varrat szilárdságára, valamint a paraméterek egymáshoz való viszonyának feltárása.
3. A hegesztés varratszerkezetének vizsgálata, valamint a kialakult varratszerkezet és a hegesztési paraméterek közötti kapcsolat feltárása.
4. A hegesztett varrat tönkremenetelének elemzése, illetve a jellemző tönkremeneteli módoknak, valamint a varratszerkezet kapcsolatának tanulmányozása.

## 2. Hegesztőgép tervezés, kivitelezés

Vizsgálatainkhoz a kézi hőlégfűvős hegesztési eljárást automatizáltuk, amellyel célunk az emberi tényezők kizárása, és kontrolálhatóság kialakítása volt. Mérhetővé, valamint szabályozhatóvá tettük a hegesztési paramétereket, ezzel lehetőség nyílt a varrat reprodukálhatóságára, illetve a hegesztési paraméterek közötti összefüggések meghatározására, és az egyes paraméterek optimalizálására. Az általunk megtervezett és legyártott hegesztőportál az 1. ábrán látható.



1. ábra Hegesztőportál felépítése

## 3. Felhasznált anyagok, mérési módszerek

Vizsgálatainkhoz az iparban széles körben alkalmazott TIPPLEN CS 2-8000 polipropilén (PP) blokk-kopolimert (MFI=0,4 g/10 min,  $\sigma=28$  MPa,  $\epsilon=10$  %,  $E=1265$  MPa) választottuk. A granulátumból a hegesztési kísérletekhez szükséges 3 mm vastag lemezeket és hozanyagot extrudálással állítottuk elő. Az alapanyag szakítószilárdságának pontos meghatározására EN ISO 527-2 számú szabvány ajánlása szerinti 1B típusú piskóta alakú próbatestet alkalmaztunk. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten, 10 mm/perc szakítási sebességgel végeztük.

Az fénymikroszkópos vizsgálatokhoz a hegesztett mintákból 15  $\mu\text{m}$ -es metszeteket készítettünk LEICA Leitz 1400 Microtome készülékkel, majd ezeket polarizált fényben LEICA Leitz Diaplan típusú mikroszkópon vizsgáltuk. A felvételeket színes CCD kamerával és a hozzá csatlakoztatott számítógéppel rögzítettük.

A szabványos szakítóvizsgálat során létrejött töretfelületeket Au/Pd ötvözzel vontuk be, majd a felvételeket JEOL JSM 5400 típusú pásztázó elektron mikroszkóppal készítettük el.

A mikro-szakítóvizsgálatokhoz a hegesztett lemezek varratzónáiból 30  $\mu\text{m}$  vastagságú metszetet készítettünk. A vizsgálatot számítógép-vezérlésű Zwick 1462 típusú elektronikus szakítógépen 10 mm/perc szakítási sebességgel szobahőmérsékleten végeztük. A szakítás folyamatát áteső polarizált fényben OLYMPUS SZ-STU2 típusú mikroszkóppal és a hozzá csatlakoztatott CCD kamerával rögzítettük számítógép segítségével.

#### **4. Hegesztési paraméterek elemzése**

A vizsgálataink első lépéseként a hegesztési paraméterek alkalmazhatósági tartományát határoztuk meg. A kézi hegesztési próbák azt mutatták, hogy 210 °C-os hegesztési hőmérséklet alatt nem hozható létre kötés a hegesztőpálca és a hegesztési munkadarabok között, viszont 250 °C-os levegőhőmérséklet esetében a hegesztési hozaganyag annyira felmelegszik, hogy a gyorshegesztő papucs a hegesztési művelet során elszakítja a meglágyult anyagot, és egy része beleég a hegesztőgéphez. Ezáltal a vizsgált hegesztési hőmérséklet tartományt 220 és 240 °C között állapítottuk meg.

Az áramló gáz térfogatáramának vizsgálatára a DVS szabvány ajánlása alapján 40-80 l/perc tartományt állapítottuk meg, amelynek középértéke a jelenleg forgalomban lévő beépített ventilátorral ellátott, kézi forrógázos hegesztőgépek teljesítményének felel meg.

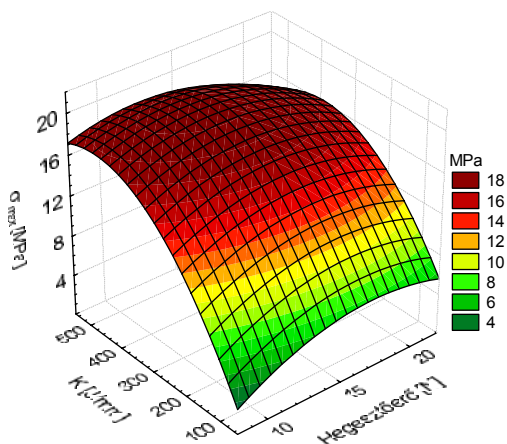
A hegesztési erőre, a hozaganyag varratmederbe történő nyomására PP esetben, gyorshegesztő papucs alkalmazásával, 3 mm átmérőjű pálcára a szabvány által előírt érték 10-16 N között van. Az értéktartományt kiszélesítettük 10-20 N közötti tartományra a háromszögprofilú keresztmetszet alkalmazása miatt.

A hegesztési sebességre nem volt semmilyen előzetes adat, ezért az előkísérletekben kimért minimális, és maximális értéknek megfelelően jelöltük ki ennek a hegesztési paraméternek a vizsgálati tartományát, amely 50, 75 és 100 mm/percnek felelt meg.

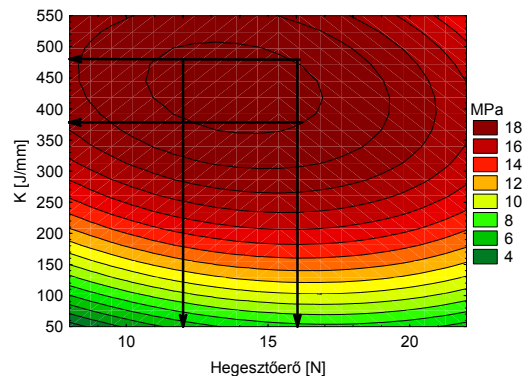
A bemutatott négy hegesztési paraméter két csoportra bontható aszerint, hogy a kézi hegesztés során a paraméter értéke független-e a hegesztő szakembertől. A független paramétereket a szabályozhatóságuk miatt öt szintre osztottuk. A hegesztő szakembertől függő paraméterekre az ipari tapasztalatnak megfelelően három (alacsony, közepes, magas) szintet különböztettünk meg, amelyek jól beállíthatóak a kézi hegesztés során.

A hegesztési paraméterek közötti kapcsolatról a vizsgált tartományokon belül csak abban az esetben kapható teljes kép, ha a kísérletek minden hegesztési paraméternek az összes lehetséges értékével elvégzésre kerülnek. Ez 5·5·3·3, azaz 225 lehetőséget ad a paraméterkombinációk tekintetében. Varianciaanalízissel hasonlítottuk össze a hegesztési paraméterek befolyásoló hatását a kialakult varratszilárdságra [17]. Két analízist végeztünk el: az egyikben a két szabályozható (hegesztési hőmérséklet és hegesztési térfogatáram), míg a másikban az emberi tényezőtől függő hegesztési paraméternek (hegesztési sebesség és hegesztőerő) a hatását és kölcsönhatását mutattuk ki. Az ANOVA két faktor szerinti keresztosztályozás alapján megállapítottuk, hogy a varrat szilárdságára mind a négy hegesztési paraméter hatása szignifikáns. A szabályozható hegesztési paraméterek tekintetében, a próbastatisztika alapján, a hegesztési térfogatáramnak 6,2-szeres a hatása a hegesztési hőmérsékletéhez képest. A másik két hegesztési paraméter közül a hegesztési sebesség közel 2,5-szer erősebb hatást mutatott a hegesztőerővel összevetve. Ezen megállapítások alapján kijelenthető, hogy a hegesztett varrat szilárdsága komplexen függ a négy hegesztési paramétertől, valamint megállapítható, hogy több hegesztési hőmérséklet, hegesztési térfogatáram és hegesztési sebesség kombinációval is elérhető ugyanaz a varratszilárdság.

A forrógázos hegesztési eljárás termodinamikai megközelítése alapján meghatároztuk az egységnyi hegesztési úthosszra áramlott energia mennyiségét, amely magában foglalta a hegesztési hőmérsékletet, a hegesztési térfogatáramot és a hegesztési sebességet. A hegesztési paramétereiből számított hegesztési energia, valamint a hegesztőerő függvényében ábrázoltuk a mért szilárdsági értékeket háromdimenziós diagramban (2. ábra). Az ábrázolt mérési eredményeket közelítő másodfokú felületi függvénnyel írtuk le, amely alapján meghatároztuk azt a technológiai tartományt, ahol a hegesztett varrat szilárdsága várhatóan a legnagyobb.



2. ábra A hegesztett varrat szilárdsági értékei a hegesztési energia, és a hegesztőerő függvényében



3. ábra A 2. ábrán látható másodfokú felületi függvény x-y síkra vetített értékei

A mérési eredményekre másodfokú felületi regressziós modellt illesztettünk (1):

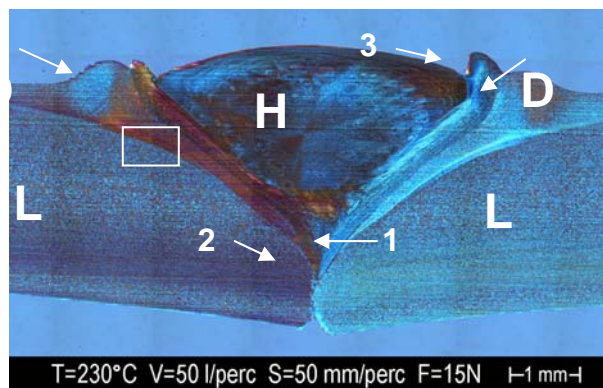
$$\begin{aligned} \hat{\sigma} = & -9,0051 \cdot 10^{-5} \cdot K^2 + 9,0477 \cdot 10^{-2} \cdot K - \\ & -5,0768 \cdot 10^{-2} \cdot F^2 + 1,7872 \cdot F - 8,8917 \cdot 10^{-4} \cdot KF - 12,497 \end{aligned} \quad (1)$$

ahol a  $K$  a hegesztési energia,  $F$  a hegesztőerő. Az illesztett felületi függvény számított determinációs együtthatója:  $R^2=0,7051$ . A másodfokú felületi függvény  $x$ - $y$  síkra vetített értékeit a 3. ábra mutatja. Ezen az ábrán jól megfigyelhető egy technológiai tartomány: 375-460 J/mm és 12-16 N hegesztési erő között készült hegesztett varratok esetében, amelyben a hegesztett varrat várható szilárdsága 18 MPa, vagy ennél magasabb érték.

## 5. Hegesztett varrat hőhatásövezete

A hőhatásövezet (HHÖ) vizsgálata során megfigyeltük, hogy az alapanyag szerkezete után egy jól elkülöníthető sávot alkot az a nem teljes mértékben megömlött nyírt réteg, amely a hegesztőerő által kifejtett nyomás hatására jött létre. Ebben a zónában áramlási vonalak figyelhetők meg, amely a képlékeny anyag áramlásának irányát mutatja. A HHÖ közepe felé haladva a nyírt réteg után finomszferolitok szerkezet jön létre, amelyben a szferolitok méretei sokkal kisebbek, mint az alapanyag szferolitjai, amely a zóna gyors lehülési sebességére utal. A hegesztett varrat szimmetriatengelye közelében a szferolitok méretei láthatóan nagyobbak, mint nyírt zóna közvetlen közelében. A megfigyelések alapján a HHÖ-t három jól elkülöníthető részre osztottuk fel. Az alapanyag hideg zónájára, amelynek a szupermolekuláris szerkezetét nem módosította hőhatás. A plasztikus zónára, amelyben az anyag nem ömlött meg teljes mértékben, és nyírt réteg alakult ki. A HHÖ legbelső része alkotja a harmadik, azaz a folyási zónát, amelyben az anyag teljes mértékben megömlött, és a hegesztőerő hatására áramlott, majd újra megszilárdult.

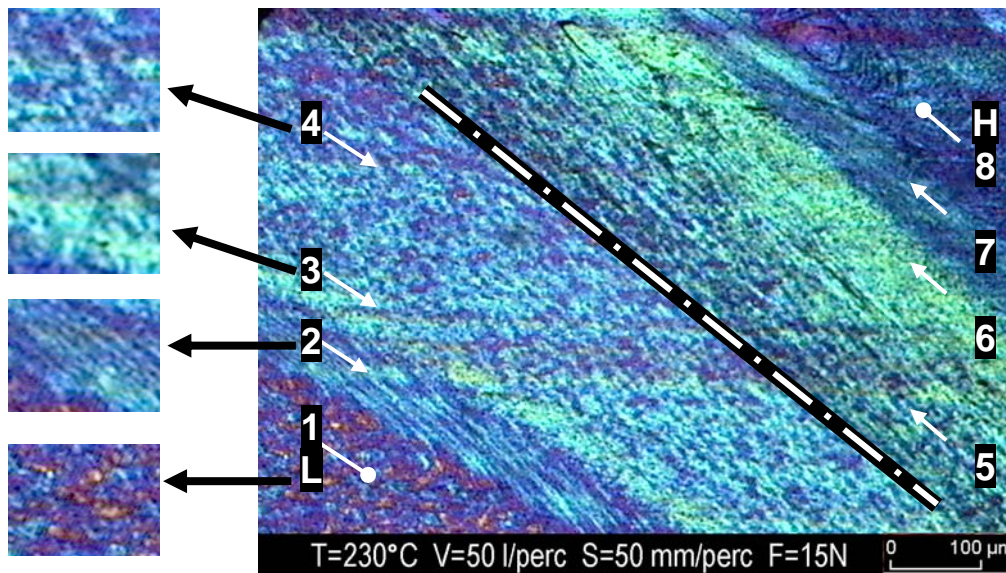
Ezek alapján megalkottuk a forrógázos hegesztés során kialakult HHÖ szupermolekuláris szerkezetének modelljét. A hegesztett varrat metszeti képének polarizált fényű mikroszkópos vizsgálatai alapján megállapítottuk, hogy 10 N-os hegesztőerővel készült hegesztési varratok esetében a HHÖ szélesség a hegesztési energia növekedésével folyamatosan növekszik. Az  $F=15$  N hegesztési erővel készült varratok metszetein a HHÖ szélessége a maximális értéket kb. 380 J/mm-es,  $F=20$  N esetében 370 J/mm-es hegesztési energiánál éri el. A HHÖ maximális szélessége ezen a hegesztési energiaszinteken  $F=15$  N-nál 0,4 mm, míg  $F=20$  N esetében 0,35 mm volt. A hegesztőerők ezen befolyásoló hatása a HHÖ szélességére azzal magyarázható, hogy a határfelületeken megömlött réteget az adott hegesztési energia felett a hegesztőerő már kipréseli a hegesztett felületek közül. A HHÖ szélessége és a hegesztett varrat szilárdsága közötti kapcsolatot Pearson-féle lineáris korrelációs számítással bizonyítottuk. A számítások alapján az egyes erőszinteken a számított korrelációk a következőképpen alakultak: 10 N-nál  $r=0,96$ ; 15 N-nál  $r=0,96$ ; 20 N-nál  $r=0,97$ . Az összes hegesztési erőszintet egyben vizsgálva a HHÖ szélessége és a hegesztett varrat szilárdsága között:  $r=0,85$  érték számítható. Ez erős kapcsolatot bizonyít, és így forrógázos hegesztés során a magasabb varratszilárdság elérése érdekében a cél a minél vastagabb HHÖ elérése. A 4. ábrán jól megfigyelhető a hegesztett lemez (L) és a hozaganyag (H) közötti kapcsolat. Megállapítható, hogy a lemez anyagából megömlött anyagréteg csak a felső (hegesztés felőli) irányba áramlik, és ezzel a varrat felületén varratdudort (D) képez. Ezt alátámasztja, hogy a 4. ábrán 1-es nyíllal jelölt helyen a megömlött lemez anyaga elvékonyodik, így a megömlött anyag áramlása csak a felső felület felé történik, és ott a kitorlódott anyagmennyiség D varratdudort hoz létre. A hozaganyag a varratgyök felé (lefelé) (2) és a varrat felszíne felé is áramlik (3).



4. ábra Forrógázos hegesztés során kialakult varrat keresztmetszeti képe polarizált fényben

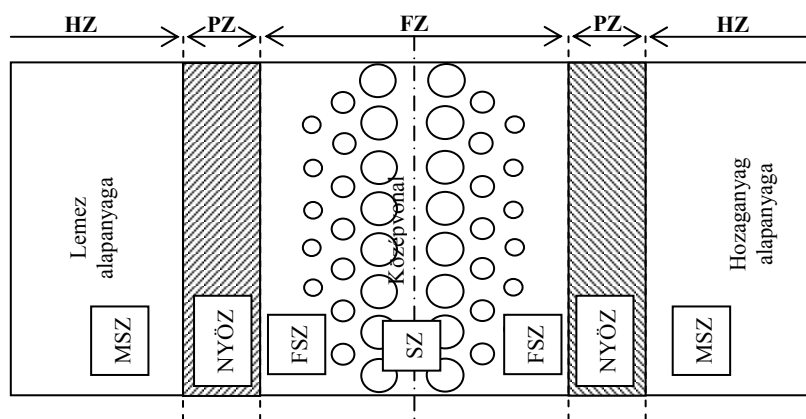
A varrat hőhatásövezetét a nagyobb nagyítással készült 5. ábra mutatja, amelynek a helyét a 4. ábrán lévő fehér téglalap jelöli. Az előző jelölési rendszernek megfelelően az alapanyag felől a hozaganyag felé haladva különböző szupermolekuláris szerkezetek figyelhetők meg:

1. A lemez (L) alapanyagának szferolitos szerkezete, amely mikroszferolitokból áll. Ezek a szferolitok a hegesztési eljárás során egyáltalán nem olvadtak meg.
2. A második zónában nyírt ömledék által képződött áramvonalak figyelhetők meg. A nyírt réteg a hegesztőerő által kifejtett nyomás hatására jött létre. Az áramvonalak a nem teljes mértékben megömlött anyag áramlásának irányát mutatják, amely ebben az esetben a felső varratdudor felé irányul. A jellemző kristályszerkezet cilindrítés.
3. Finomszferolitos szerkezet figyelhető meg a 3. zónában. A szferolitok méretei ebben a zónában jóval kisebbek az alapanyagénál. Ez valószínűleg abból ered, hogy a zóna lehülési sebessége sokkal gyorsabb volt, mint a lemez anyagának hülési sebessége a gyártás során.
4. A hegesztett varrat szimmetriatengelye felé haladva a szferolitok mérete kissé növekszik.



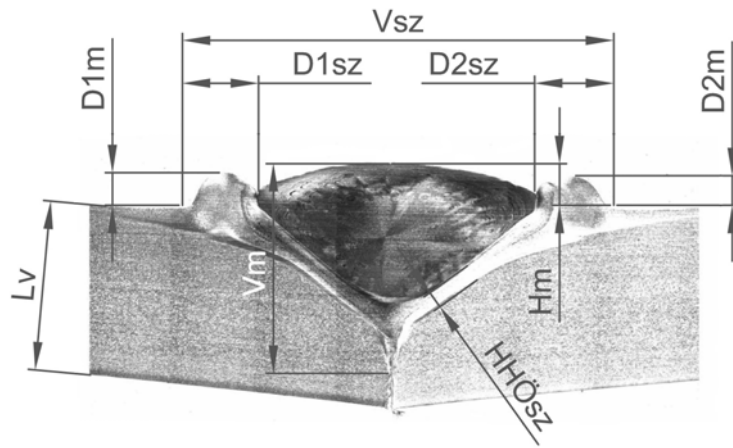
5. ábra A hegesztett varrat hőhatásövezete

A szimmetriatengelyt átlépve az 5,6,7 és a 8-as számmal jelölt szerkezetek mintegy tükörképe a lemez anyagából képződött supermolekuláris szerkezetnek, azzal a különbséggel, hogy ezek a hozaganyag anyagából alakultak ki. A szerkezet alapján a forrógázos hegesztés során kialakuló supermolekuláris szerkezet három jellemző zónára osztható fel. Az alapanyagok (1 lemez anyaga, ill. 8 a hozaganyag anyaga) a hőhatás által nem módosított szerkezeti részeket hideg zónának nevezzük. Ezt követi a plasztikus zóna, amelyben az anyag nem ömlött meg teljes mértékben, és így nyírt réteg alakult ki (2, 7), amelyre a cilindrites kristályszerkezet a jellemző. A hegesztési varrat legbelső része a folyási zóna, amelyben az anyag teljes mértékben megömlött, és a hegesztőerő hatására áramlott, majd újra megszilárdult (3-6). Ezek alapján a forrógázos hegesztés során kialakult hőhatásövezet supermolekuláris szerkezetének modelljét a 6. ábra mutatja be.



6. ábra A forrógázos hegesztés során kialakult HHÖ supermolekuláris szerkezetének modellje HZ: Hideg zóna, PZ: Plasztikus ömledék zóna, FZ: Folyási zóna; MSZ: alapanyag mikroszferolitos zónája, NYÖZ: nyírt ömledék zóna, FSZ: finomszferolitos zóna, SZ: szferolitos zóna.

A gyakorlati alkalmazásban a HHÖ szélességének a megmérésére nincs mód, ezért a külső, mérhető geometria és a varrat szilárdsága közötti kapcsolatot vizsgáltuk. A különböző geometriai adatokat a 7. ábrán látható jelölési rendszerrel láttuk el.



7. ábra A mikroszkópos vizsgálatok során elvégzett mérések jelölései: Vs: varratszélesség; Vm: a varrat teljes kötést létesítő magassága; Hm: a hozaganyag lemez síkjából kiemelkedő magasság; HHÖsz: hőhatásövezet szélessége; Lv: lemezvastagság; D1sz, D2sz a varratdudor szélessége; D1m, D2m a varratdudor magassága.

A legjobb korrelációt a hegesztett varrat szélessége ( $r=0,95$ ) majd a hegesztett varratdudor átlagos szélessége ( $r=0,93$ ) adta. A két érték azonban nem független egymástól, mert a varrat szélessége tartalmazza a varratdudor szélességét is. Mivel a varrat szélességét mérőeszközzel könnyebben lehet megmérni, a továbbiakban csak a varrat szélességének a kapcsolatát elemezzük a hegesztett varrat szilárdságára. A hozaganyag és a lemez síkjának a távolsága a hegesztett varrat szilárdságával  $r = -0,8$  korrelációt mutatott. A hozaganyag és a lemez síkjának a távolsága, valamint a varrat teljes szélességének a hányadosával egy dimenzió nélküli mennyiséget vezettünk be (2), amely magában foglalja mindkét tulajdonságát a varratnak.

$$J = \frac{Hm + Lv}{Vs} \quad (2)$$

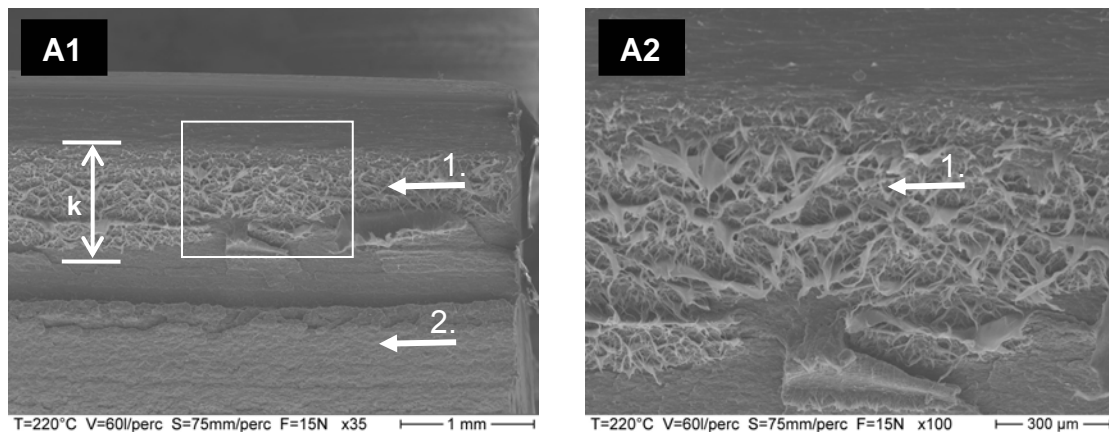
A korreláció 10 N-nál  $r=0,99$ , 15 N-nál  $r=0,98$  illetve 20 N-nál  $r=0,98$ . Az összes hegesztési erőszinten  $r=0,94$ -es kiváló korreláció tapasztalható a  $J$  komplex geometriai tényező és a hegesztett varrat szilárdsága között. A fentiek alapján megállapítottuk, hogy az adott peremfeltételek mellett készült hegesztett varrat szilárdsága, külső geometriai mérések alapján jól becsülhető.

## 6. Hegesztett varrat tönkremenetele

A fénymikroszkópos vizsgálatok során elemzett paraméterkombinációkból készült varratokból 30  $\mu\text{m}$ -es metszeteket készítettünk, és azon mikro-szakítóvizsgálatokat végeztünk. A deformációs munkát a hegesztési energia függvényében ábrázolva megfigyeltük, hogy a harmadfokú illesztett görbék jellege hasonló a HHÖ szélességének a hegesztési energia függvényében ábrázolt értékeire fektetett görbékkel. E megfigyelés alapján a HHÖ szélessége és a deformációs munka közötti kapcsolat erősségét korreláció számításával igazoltuk. A korrelációs együttható értéke az  $F=10$  N esetében  $r=0,97$ ,  $F=15$  N-nál  $r=0,99$  és  $F=20$  N-os hegesztőerő esetében  $r=0,98$ , míg az összes mérési eredményre számított érték  $r=0,94$ . Megállapítható tehát, hogy a deformációs munka annál nagyobb, minél nagyobb a HHÖ szélessége.

A mikro-szakítóvizsgálatok másik célja a tönkremenetel lefutásának elemzése volt. Kétféle tönkremenetelt különböztettünk meg. A rideg jellegű tönkremenetel esetében megfigyeltük, hogy a tönkremenetel a varratgyöknel keletkező repedésből indul ki, majd újabb repedés keletkezik a varrat felszínén a hozaganyag és a lemez anyaga között, és mindkét repedés szakaszosan, nagy gyorsasággal halad tovább a HHÖ-ben, ami a szakítógörbén lépcsős

jellegű lefutásban mutatkozott meg. A képlékeny tönkremenetel esetében a varratgyök megnyílása után a repedésterjedés lokálisan megáll, nyakképződés figyelhető meg, amelyet a regisztrált erő-elmozdulás görbe, valamint a polarizált fényben készült mikroszkópos felvételek is bizonyítottak. A hosszú nyúlási folyamat után új repedés indul meg a varrat felszínéről a HHÖ-ben, majd ez a repedésterjedés is megáll, és a HHÖ tovább nyúlik/orientálódik, majd az erősen orientálódott HHÖ-ben makro-repedések alakulnak ki, és ettől a ponttól a tönkremenetel robbanásszerűen zajlik le. Mindkét tönkremeneteli típusú varratnak az azonos hegesztési paraméter beállítással elszakított ISO 527-3 próbatestek törésfelületeiről SEM felvételeket készítettünk. A felvételek igazolták, hogy csak abban a zónában figyelhető meg képlékeny tönkremenetelre utaló fibrilláris kihúzóadás, ahol a HHÖ-ben molekuláris kapcsolat is létrejött a hozaganyag és a lemez anyaga között. A rideg varratról készült felvételeken (8. ábra) jól megfigyelhető a két eltérő jellegű törésfelület.

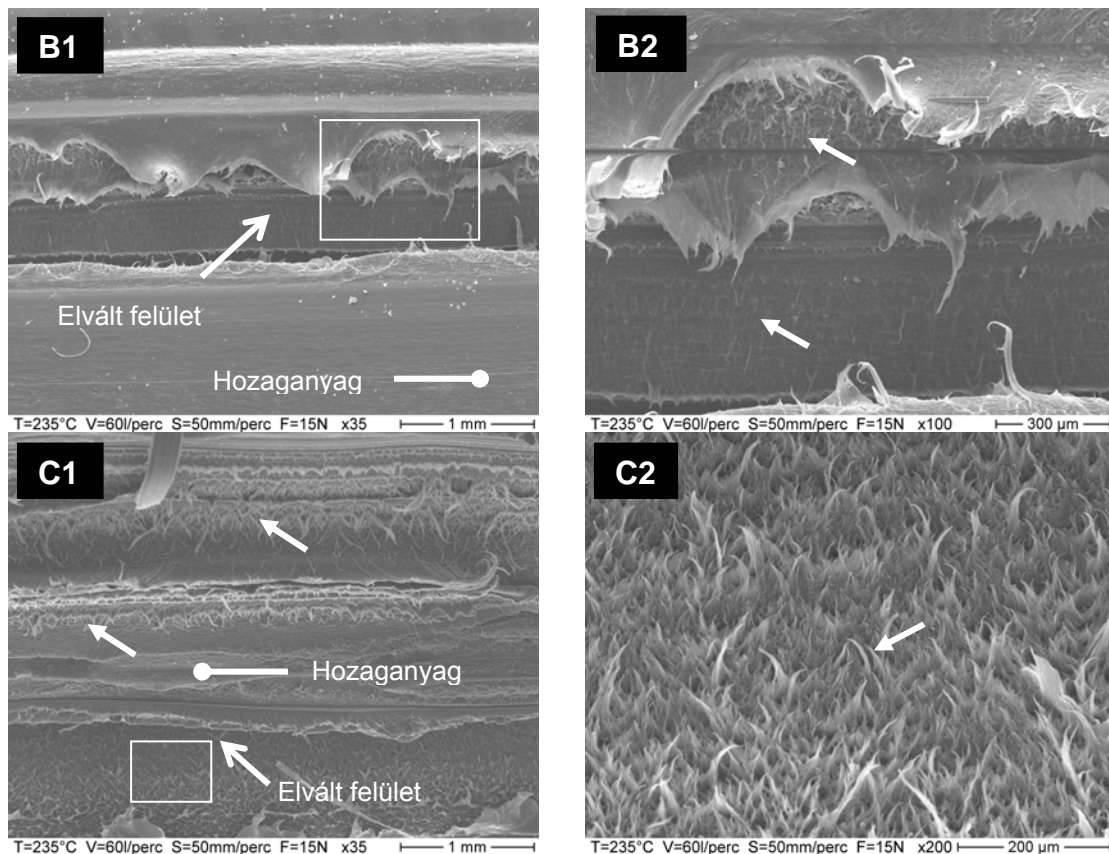


8. ábra A 224,1 J/mm hegesztési energiával és 15 N hegesztőerővel készített varrat ISO 527-3 szabványos szakítóvizsgálat utáni törésfelületéről készült SEM felvételek

A hozaganyag felső részén (8. ábra A1 1-es jelölés) képlékeny tönkremenetelre utaló törésfelület figyelhető meg, amely nagyobb nagyításban az A2-es felvételen látható. Az A2-es felvételen jól megfigyelhető a fibrillák a PP felületén, amely a lokális nyakképződés során alakult ki. A 2-es nyíllal jelzett (A1) zónában nem figyelhetők meg fibrillák a törésfelületen. A fénymikroszkópos felvételen megfigyelhető HHÖ hossza jóval nagyobb, mint a SEM felvételen megfigyelhető képlékenyen deformálódott zóna hossza (A1 „k”). Ez azzal magyarázható, hogy a hő hatására a felület szerkezete ugyan vékony rétegben megváltozik, de molekuláris kötés nem alakul ki.

A képlékeny tönkremenetelű hegesztett varrat felszínéről készült SEM képek a 9. ábrán láthatók. Jól megfigyelhető, ahogyan a lemeztől a hozaganyag elvált a szakítás során. A 200X-os nagyítású képen (B2) a nyakképződés során kialakult fibrillák láthatók, amelyek a képlékeny tönkremenetelt igazolják az elválás felületén. A „C” jelű felvételeken szintén megfigyelhetők a képlékeny tönkremenetelre utaló jelek a hozaganyag felületén, valamint a hozaganyag és a lemez közti elvált felületen is (C2).





9. ábra A 361,7 J/mm hegesztési energiával és 15 N hegesztőerővel készített varrat ISO 527-3 szabványos szakítóvizsgálat utáni töretfelületéről készült SEM felvételek

## 7. Összefoglalás

Pályázatunkban a kézi hőlégfúvós hegesztési eljárást automatizáltuk saját tervezésű és kivitelezésű hegesztőportál segítségével, amellyel célunk az emberi tényezők kizárása, az ellenőrizhetőség kialakítása és a reprodukálhatóság biztosítása volt a hegesztés során. Mérhetővé, valamint szabályozhatóvá tettük a hegesztési paramétereket, ezáltal lehetőség nyílt a hegesztési paraméterek közötti összefüggések feltárására. A független hegesztési paramétereket (hegesztési hőmérséklet, hegesztési térfogatáram) öt szinten, a hegesztő szakembertől függő paramétereket (hegesztési sebesség, hegesztőerő) három szinten vizsgáltuk. Két faktor szerinti keresztosztályozású varianciaanalízis segítségével bebizonyítottuk, hogy a varrat szilárdságára mind a négy hegesztési paraméter hatása szignifikáns és a hegesztett varrat minősége komplexen függ a négy hegesztési paramétertől. Mikro-szakítóvizsgálatokkal elemeztük a varrat deformációját, valamint a hegesztett varrat hőhatásövezetének polarizált fényű mikroszkópos vizsgálata alapján megalkottuk a forrógázos hegesztés során kialakult hőhatásövezet szupermolekuláris szerkezetének modelljét. A külső, mérhető geometria és a varrat szilárdsága közötti kapcsolat elemzéséhez bevezettünk egy dimenzió nélküli mennyiséget, a varratgeometriai tényezőt, amelynek segítségével az ipari gyakorlatban is közvetlenül megállapítható a varrat jósága, roncsolásos vizsgálatok nélkül.

## 8. Felhasznált Irodalom

- [1] P.A. Tres: Designing plastic part for assembly. Hanser Gardner, München, 2003.
- [2] J. Rothesier: Joining of plastics. Hanser Gardner, München, 1999.
- [3] I. Molnár, E. Pető, J. Seder, I. Csikai: Műanyagok hegedési folyamatai és a hegesztési eljárások problémái., Műanyag és Gumi, 33 (1996) 339-348.

- [4] L.J. Bastein, J.W. Gilgipse Jr.: A non-isothermal healing model for strength and toughness of fusion bonded joints of amorphous thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 1991 (31) 1720-1730.
- [5] Y.M. Bioko: The kinetics of fracture stress growth for autoadhesive joints of amorphous polymers below glass transition temperature. *Polymer Science Ser.B*, 42 (2000) 297-300.
- [6] C. Bonten, E. Schmachtenberg: A new hypothesis to describe the mechanisms acting in a welded joint of semicrystalline thermoplastic. *Polymer Engineering and Science*, 41 (2001) 475-483.
- [7] D.A. Grewell, A. Benatar, J.B. Park: *Plastics and composites welding handbook*. Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- [8] H. Potente, J Natrop, T.K. Pedersen, M. Uebbing: Comparative investigations into welding of glass-fiber-reinforced PES. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 6 (1993) 147-159.
- [9] B. Poopat, A. Benatar, J.B. Park: Comparative study of contact and non-contact hot plate welding of hdpe. *SPE (Antec 2000) Conference Proceedings*, (2000) #795 (CD-katalógus).
- [10] C.J. Nonhof: Optimization of hot plate welding for series and mass production. *Polimer Engineering and Science*, 36 (1996) 1184-1195.
- [11] V.K. Stokes: Experiments on hot-tool welding of three dissimilar thermoplastics. *Polymer*, 39 (1998) 2469-2477.
- [12] V.K. Stokes: Vibration welding of thermoplastics Part II: Analysis of welding process. *Polymer Engineering and Science*, 28 (1988) 728-739.
- [13] G.W. Ehrenstein, A.K. Schlarb, J. Varga: A polipropilén vibrációs hegesztése. *Műanyag és Gumi*, 25 (1988) 339-347.
- [14] H. Potente, O. Karger, G. Fielger: Laser and microwave welding – The applicability of new process principles. *Macromolecular Materials and Engineering*, 287 (2002) 734-744.
- [15] B.E. Turner, J.R. Atkinson: Reparability of Plastic Automobile Bumpers by Hot Gas Welding. *SPE (Antec 1989) Conference Proceedings Vol 1.*, (1989) 499-501.
- [16] M. Gehde, G.W. Ehrenstein: Structure and mechanical properties of optimized extrusion welds. *Polymer Engineering and Science*, 31 (1991) 495-501.
- [17] S. Kemény, A. Deák: *Kísérletek tervezése és értékelése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2002.