

## PA 6 anyagú elektromos csatlakozó ultrahangos hegesztésének optimalizálása

*Tárgyszavak: ultrahangos hegesztés; PA 6; üvegszál-erősítés; optimalizálás; nedvességtartalom.*

**Kiss Zoltán** Szigorló gépészmérnök hallgató  
**Czigány Tibor** Tanszékvezető egyetemi tanár,  
BME, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

**Üvegszál-erősítésű és üvegyöngytöltésű PA 6 mátrixú elektromos csatlakozó ház/betét ultrahangos hegesztése után létrejövő varrat szilárdságát vizsgáltuk. Elemeztük a hegesztési paraméterek változásának és az összehegesztendő alkatrészek nedvességtartalmának hatását a kialakult varrat jóságára. Kimutattuk, hogy a hegesztési paraméterek közül a hegesztési energiának és a hegesztési erőnek van jelentős hatása a varrat szilárdságára. Mérésekkel igazoltuk továbbá, hogy az összehegesztendő alkatrészek nedvességtartalma akár 50%-kal is csökkentheti a varratszilárdságot.**

### 1. Bevezetés

A polimerek feldolgozásában gyakori feladat két vagy több alkatrészből összeállítani a végterméket. A rögzítés történhet anyagzáró hegesztéssel, erőzáró csavarkötéssel, továbbá alakzáró pattanó kötéssel. Ezek egy része oldhatatlan kötés, míg a többi, szerelhető konstrukciót eredményez [1]. A hegesztés anyaggal záró oldhatatlan kötés, amelynek típusai közül az ultrahangos hegesztés igen elterjedt, köszönhetően annak, hogy gyors, olcsó, hozaganyagot nem igényel, valamint környezetkímélő, tiszta hegesztési eljárás. További előnye, hogy lehetővé teszi vékony anyagok vastag darabokhoz való hegesztését, valamint a hegesztendő felületek nem igényelnek különleges tisztítási és előkészítési folyamatot. Az ultrahangos hegesztési berendezés és a szerszámok nem tartalmaznak káros anyagokat, és az eljárás közben gázfejlődés sincsen. Az ultrahangos hegesztés működési elve alapvetően különbözik az ismert egyéb hegesztési eljárásokétól. A bevitt energia a két szerszámfél (üllő és a szonotróda) nyomóerejéből és a mechanikus rezgésből tevődik össze. Az alkatrészek összeszorítása után a szonotróda adja át a nagyfrekvenciás rezgést a munkadarabnak [2]. Az ultrahangos hegesztésnél a műanyag megömlésével járó helyi felmelegedést okozó vibráció frekvenciája igen nagy (20–50 kHz), amplitúdója kicsi (5–90  $\mu\text{m}$ ). A különböző geometriájú szonotróda összeszorítja a felületeket, ezután az ultrahang által kiváltott mo-

lekuláris súrlódás hatására az anyagban ébredő hő megolvasztja azt. Ahhoz, hogy a rezgési energia a lehető legjobban kihasználható legyen, szükséges, hogy az érintkező felületet egy ún. hegesztési él alkossa, ily módon az energiaáram koncentrálható és a varrat, valamint az ömledék helye előzetesen meghatározható. Az ultrahangos hegesztés könnyen automatizálható és költségkímélő megoldást nyújt minőségi tömegtermékek gyártásánál. Alkalmazási területe széles, sokrétűen illeszthető az egyes hegesztési feladatokhoz a csomagolástechnikától kezdve az igényesebb műszaki termékekig [3].

A cikk célja poliamid anyagú, fröccsöntött előgyártmányokból ultrahanghegesztéssel készített elektronikus csatlakozóelemek kötési szilárdságának elemzése, optimalizálása [4, 5]. A hegesztés szilárdságának állandó szinten tartásához meg kellett találni a hegesztés jóságát befolyásoló valamennyi tényezőt, kezdve az alapanyag nedveségtartalmától egészen a hegesztőgép beállításáig.

## 2. Felhasznált anyagok és eljárások

A személygépkocsik motorterében sokáig elképzelhetetlennek tartott polimerek napjainkban gond nélkül képesek elviselni az ott jelentkező, főként hőmérsékleti ingadozásból és szennyező anyagok káros hatásából eredő igénybevételeket. A számos lehetőség közül a PA 6 anyag alkalmazása, annak kitűnő mechanikai tulajdonságai miatt a legelterjedtebb [6]. Vizsgálataink alapja egy személygépkocsi motorterében elhelyezkedő bonyolult geometriájú elektronikus csatlakoztató elem. A fröccsöntött előgyártmányként egy ház és egy betét szolgál. A ház és a bele fűlekkel illeszkedő betét összehegesztése történik ultrahanggal, majd a hegesztést követően a ház megfelelően kialakított részeire egyéb alkatrészek kerülnek, amelyek a csatlakozó nyitás-zárását és illesztését szolgálják. A betét és ház közé még a hegesztés megkezdése előtt egy szilikongumit illesztenek, amelynek feladata a végtermékben a szigetelési funkciók ellátása. Az ultrahangos hegesztési varratot három egymással párhuzamosan futó él alkotja.

Az elektromos csatlakozó anyaga a **BASF** cég által gyártott üvegszál-erősítésű (10 %(m/m)) és üveggyöngytöltésű (20 %(m/m)) Ultramid B3GK24 típusú PA 6. Az erősítő- és töltőanyag funkciója a szilárdság és merevség növelésén túl a fröccsöntés közben fellépő zsugorodások mérséklése, hiszen egy bonyolult geometriájú, sok illesztési mérettel rendelkező alkatrészpárosnál fontos a pontos mérettartás. Az alapanyag katalógus szerinti főbb mechanikai tulajdonságait az *1. táblázat* szemlélteti [7].

Az ultrahangos hegesztésekhez **Branson 2000 aemc** típusú berendezést használtunk. A hegesztett kötés jóságát a kötés bontásához szükséges szakítóerő alapján határoztuk meg, amelynek az előírás szerint minimum 300 N-nak kellett lennie. Tekintettel arra, hogy ezt az értéket nem csak a hegesztés után közvetlen, hanem a termék élettartama során huzamosabb ideig kell biztosítani, ezért a szakítóerőt biztonsággal kell 300 N fölé állítani. A túl erős hegesztésnek ugyanakkor gátat szab az a tény, hogy a hegesztett varratok a kábelvégeket tartalmazó lyukak mellett futnak végig, és a túlságosan nagy varrat ezekbe beleolvad. E két alsó és felső határ közötti optimumot kellett beállítani a hegesztéssel.

1. táblázat

Ultramid B3GK24 típusú PA 6 jellemző tulajdonságai [7]  
(az egyes tartományok a szárazon vagy nedves állapotban mérhető értékekre utalnak)

Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	1340
Vízfelvétel (23 °C-os vízben), %	6,3–6,9
Nedvességfelvétel (23 °C, 50% RH), %	1,9–2,3
Olvadáspont, °C	220
Rugalmassági modulus, MPa	3000–6000
Szakítószilárdság, MPa	60–110
Charpy ütőmunka (23 °C, bemetszés nélkül), kJ/m <sup>2</sup>	40–90

A szakítóerő tulajdonképpen egy sokparaméteres függvényként fogható fel, amelyre hatással vannak a hegesztési paraméterek, amelyek ultrahangos hegesztésnél a következők:

- *Hegesztő energia*: A hegesztés létrejöttét legjobban a létrehozásához szükséges energia jellemzi, ez egy előre beállítható mennyiség Joule-ban kifejezve, energia üzemmódban ezt az értéket minden hegesztésnél tartja a gép.
- *Összeszorító erő*: (Force Down Stroke) Ez a mennyiség a hegesztendő darabok előzetes összeszorítását határozza meg. Minél nagyobb ez az érték N-ban kifejezve, annál inkább ütésszerűen érkezik a szonótróda a darabok felületére.
- *Kapcsolóerő*: (Trigger Force) Ennél az értéknél a berendezés bekapcsolja az ultrahangot.
- *Hegesztési erő*: (Force 1) Ez az az erő, amely a hegesztés közbeni nyomást biztosítja a munkadarabok között. A névben szereplő 1 szám arra utal, hogy ez az erő berendezéstől függően változtatható a hegesztés folyamata során.
- *Tartóerő*: (Hold Force) Az ultrahang kikapcsolása után néhány másodpercig szükséges összeszorítva tartani a darabokat, hogy a kihűlés körülményei biztosítva legyenek.

A hegesztési paraméterek alapbeállításait a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat

A hegesztési paraméterek alapbeállításai

Hegesztési paraméter	Érték
Hegesztési energia, J	120
Hegesztési erő, N	350
Tartóerő, N	350
Kapcsolóerő, N	100
Összeszorító erő, N	280

A 2. táblázatbeli értékekhez képest változtattuk a paramétereket (3. táblázat), vizsgálva azok hatását a varrat szilárdságára. Az intervallumok kiválasztása az alapbeállítások figyelembevételével történt oly módon, hogy minden esetben igyekeztünk megnézni a szélsőséges értékeket, majd az alsó és felső határ között ésszerű és kezelhető számú mérési pontot vettünk fel. Látható, hogy a hegesztési energia esetében az alapbeállításokhoz képest inkább a kisebb értékek irányába változtattunk, ugyanis a túl nagy energia egyértelműen beolvasztotta a varratot a mellette lévő lyukakba. A magas energiájú hegesztéseket nagyon nehéz elszakítani, hiszen kisméretű alkatrész könnyen kicsúszik a szakító gép megfogó pofái közül. Célszerű volt tehát a kisebb értékek felé haladni, hiszen a trend így is megfigyelhető. A tartó- és a kapcsolóerő 50 N-os érték alá állítását a gép nem teszi lehetővé, a felső határ pedig az energiánál leírtak szerint a szakítási nehézségek miatt volt korlátozva. Az összeszorító erő esetében a 180 N alatti értékeknél olyan lassan mozgott a szonotróda, hogy mielőtt az elérte volna a darabok felületét, a gép leállította a hegesztést időtúllépés miatt.

3. táblázat

Hegesztési paraméterek beállítási értékei

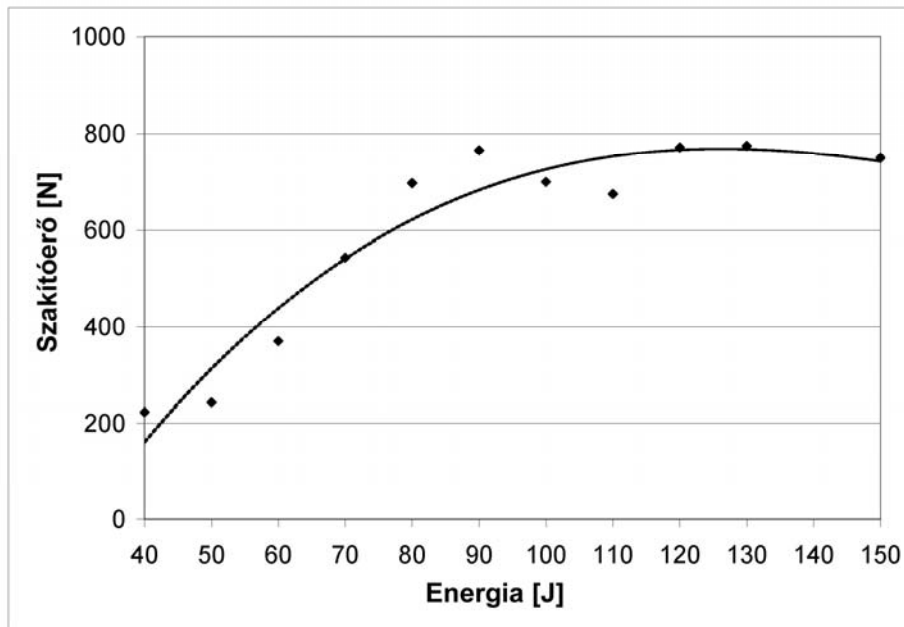
Hegesztési paraméter	Beállított értékek										
Hegesztési energia, J	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	150
Hegesztési erő, N	200		280			350		420		500	
Tartóerő, N	50	60		80		100		200		350	
Kapcsolóerő, N	50	70		85		100		140		190	
Összeszorító erő, N	180	220		250		280		320		360	
		400		500							

### 3. Mérési eredmények, kiértékelés

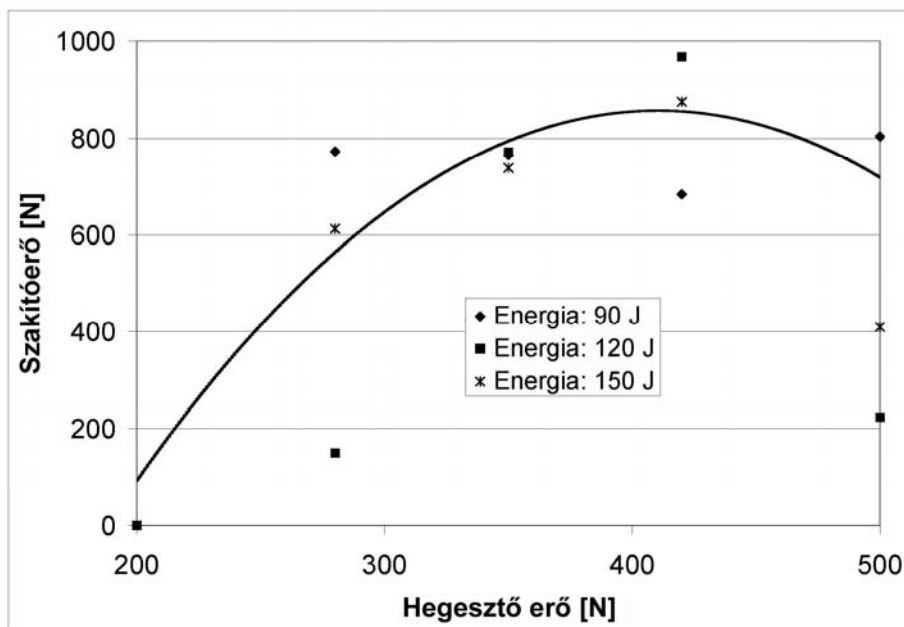
Első lépésben külön megvizsgáltuk mind az öt hegesztési paraméter hatását a szakítóerőre úgy, hogy egy paraméter hatásának vizsgálatakor a többi négy értéket a 2. táblázat szerinti középértéken tartottuk. Elsőként a hegesztési energiát változtattuk (1. ábra). Ennek hatása a hegesztési varratra igen meghatározó, ugyanis ez a bevitt energia végzi a varrat megömlesztését, gyakorlatilag növelésével egyenes arányban kell növekedjen a megömlesztett varrat térfogata. Azonban a szakítóerő nem követi ezt a logikát, bizonyos energiaértéktől felfelé a szakításhoz szükséges erő nem növekszik, sőt csökkenni kezd. Ennek oka a termék, illetve a hegesztési él geometriájában rejlik. A hegesztési élt jelentő fal vastagsága állandó, ebből következően hiába olvasztunk le nagyobb szeletet a fal tetejéről, a varrat szélessége gyakorlatilag nem változik, azonos kötési szilárdságot feltételezve a szakadásnak ellenálló varrat felülete nem növekszik, így a szakítóerő sem.

A hegesztés közbeni (az ultrahang bekapcsolása alatti) tartóerő hatását szemlélteti a 2. ábra, három különböző energiaszinten. Megfigyelhető, hogy a háromféle vizs-

gált energiaértéknél a 350 N-os erő esetén a mérési eredmények egy pontba esnek. Ez jól mutatja, hogy a választott energiaértéktől viszonylag függetlenül be lehet állítani egy optimális hegesztési erőt. A hegesztés közbeni tartóerő és a hegesztési energia nyilván két olyan paraméter, amelyek egymással ésszerű határokon belül kölcsönösen kiegészítik egymást. A kis energiájú hegesztés hatásait ellensúlyozni lehet a nagyobb tartóerő alkalmazásával és fordítva is: kisebb tartóerőt a viszonylag nagyobb hegesztési energia válthatja ki.

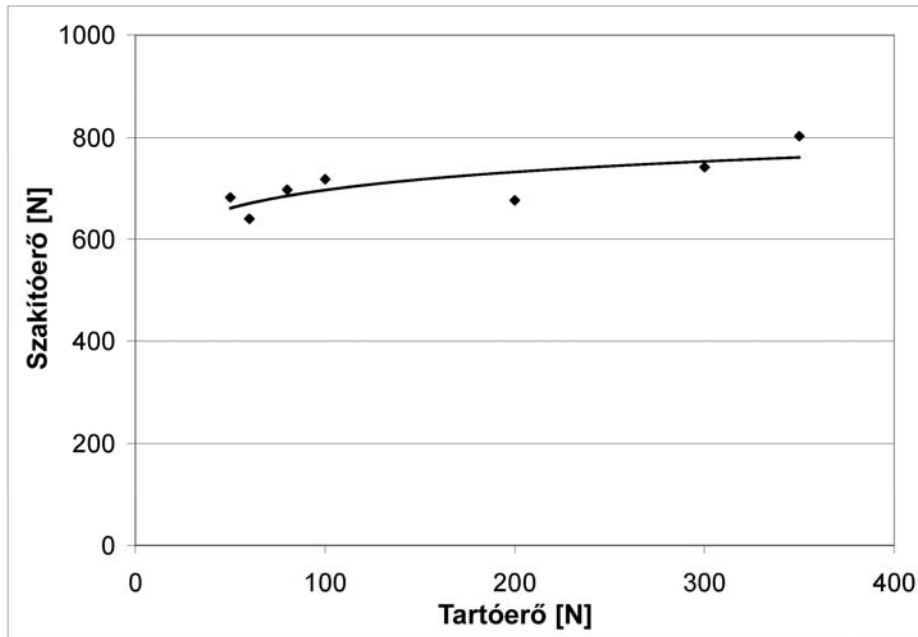


1. ábra Hegesztési energia hatása a szakítóerőre

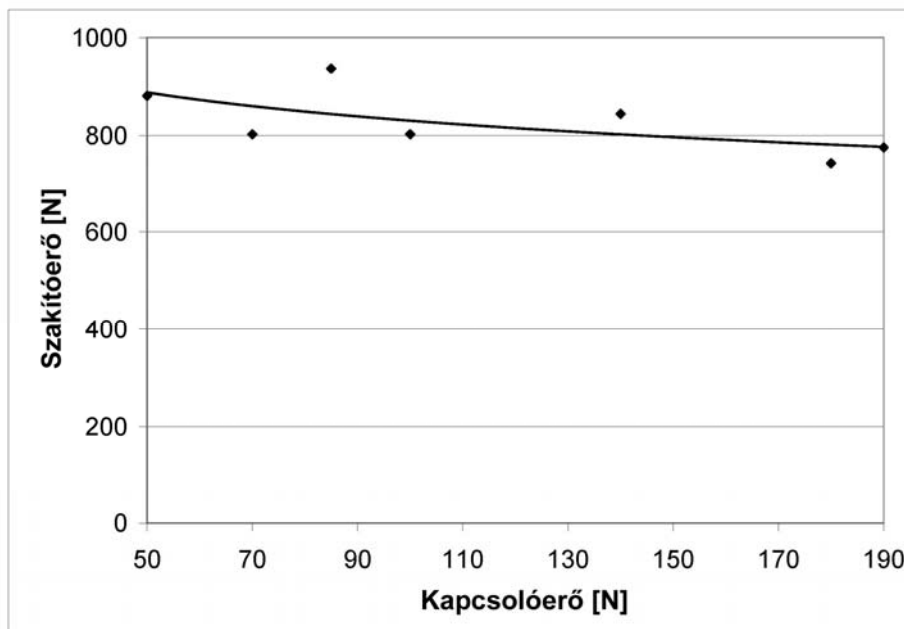


2. ábra A hegesztési erő hatása a szakítóerőre különböző energia-beállításokkal

A hegesztés utáni tartóerő változását a 3. ábra szemlélteti. A tartóerő, ami az ultrahang lekapcsolása után lép előtérbe, fontos tényező a még lágy állapotú hegesztési varrat alakításának szempontjából. Ha ez az erő túl kicsi, akkor az összeolvadás kisebb hatásokkal valósul meg, viszont ha az erő túl nagy, akkor az összehegesztendő élek közül kipréseljük az ömledéket, ami a szakítóerő szempontjából nem probléma, viszont a varrat mellett található kábelvégek befogadására kiképzett lyukakba beleolvad, tehát selejtet állítunk elő.

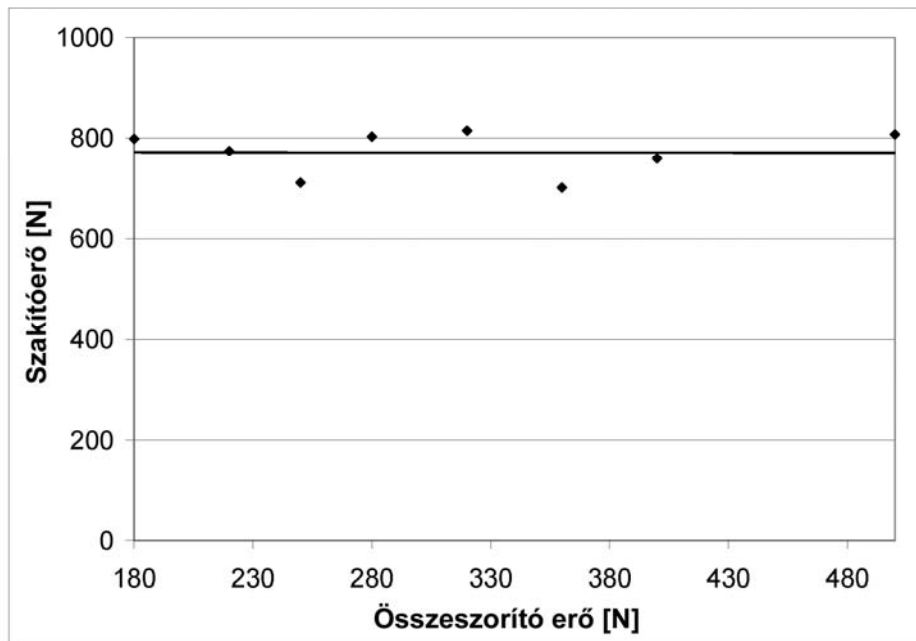


3. ábra A tartóerő hatása a szakítóerőre



4. ábra A kapcsolóerő hatása a szakítóerőre

A hegesztőberendezés a 4. ábrán látható kapcsolóerőnél kapcsolja be az ultrahangot az összeszorítás közben és itt vált át hegesztési erőre. Ennek a kapcsolóerőnek az értéke nem érheti el az összeszorító erőt (5. ábra), hiszen a kapcsolóerőt valahogy létre kell hozni. A diagramokban látható, hogy míg az összeszorító erő értékétől gyakorlatilag nem függ a varratszilárdság, addig a minél magasabb, azaz minél későbbi bekapcsolás hátrányosan befolyásolja a szakítóerőt. Ennek magyarázata abban rejlik, hogy a későbbi bekapcsolással elveszik az összeszorításkor befektetett energia, így minél előbb kapcsoljuk be az ultrahangot, annál inkább a hegesztési erőnek kedvezünk.



5. ábra Az összeszorító erő hatása a szakítóerőre

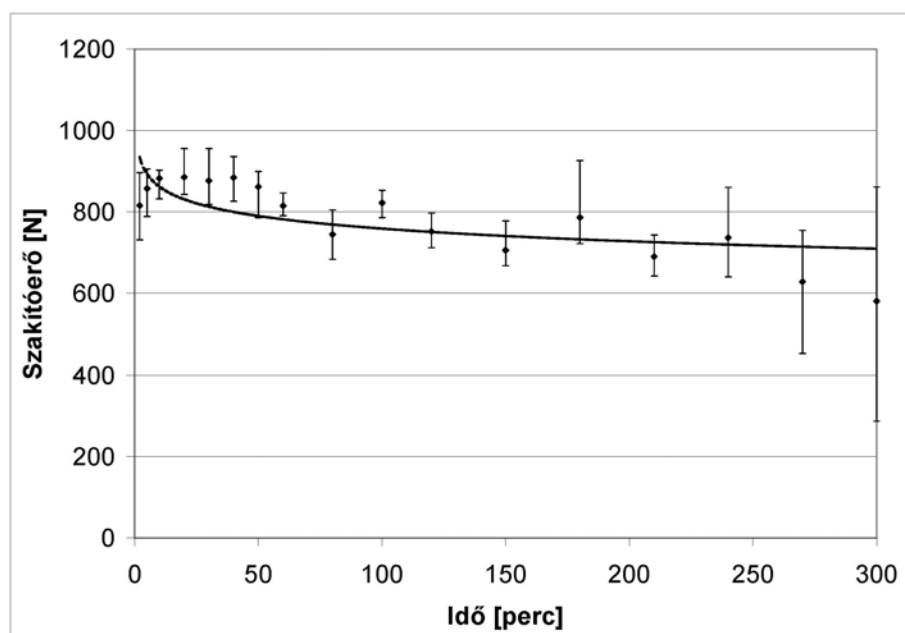
*Összességében megállapítható tehát, hogy a varrat szakítószilárdságára leginkább a hegesztési energia és a hegesztési erő nagysága van hatással, a többi vizsgált paraméter hatása nem jelentős.*

Tekintettel az elektromos csatlakozó PA 6 alapanyagára a hegesztési vizsgálatokat különböző nedvességtartalom mellett is megismételtük, elemezve a szakítóerő változását. Erre azért volt szükség, mert a felvett nedvesség mennyisége, így a hegeszthetőség függ a környezet relatív nedvességtartamától. Ezért előfordulhat az, hogy más-milyen hegesztési paramétereket kell egy hegesztőállomáson beállítani száraz, nyári időben, mint esős, téli időjárás esetén. Minél nagyobb a környezeti nedvességtartalom, annál nagyobb lesz – adott idő után, az elért egyensúlyi állapotban – a PA 6 víztartalma. A nedvesség felvétele időben folyamatosan csökkenő, lassuló folyamat, melyet a hőmérséklet is befolyásol (magasabb hőmérsékleten gyorsabb az abszorpció).

A gyakorlati alkalmazások szempontjából lényeges tudni, hogy normál üzemi körülmények esetén (50% RH, 23 °C) melyik anyag mennyi vizet képes felvenni, mert

az alkatrész gyártásnál, a technológia tervezésénél a mechanikai tulajdonságok mellett a méretstabilitás, a méretváltozás rendkívül fontos. A poliamidok nedvességfelvétele általában csökkenti az anyag szilárdsági jellemzőit, de növeli a szívósságot, alakváltozási képességet. A vízfelvétellel arányos a poliamid alkatrészek méretváltozása is.

Az alkatrészek kiszáritását *Shel Lab 1465* típusú vákuumszáritó szekrényben végeztük  $\text{CaCl}_2$  só jelenlétében. Az alkatrészeket tömegállandóságig szárítottuk 7 órán keresztül  $80\text{ }^\circ\text{C}$ -on. Ezt követően a száraz munkadarabokat kitettük az 50% relatív légnedvességű hegesztőhelyiségbe és meghatározott időközönként (az elején sűrűbben, majd ritkábban) hegesztéseket végeztünk, majd mértük az összehegesztett alkatrészek szétszakításához szükséges erőt. A szakítóerő jó látható módon csökken az 5 órás vizsgálat alatt, és ami igen szembevető, hogy az idő múlásával a mérési eredmények szórása is jelentősen növekszik (6. ábra).



6. ábra. Hegesztett kötések szakítóerejének változása a hegesztés előtt üzemi levegőn tartott darabok várakozási idejének függvényében

A vízfelvétel nem zajlik le 5 óra alatt, bár fokozatosan lassul egészen az egyensúlyi víztartalom eléréséig. Mindenesetre jól megfigyelhető, hogy a szakítóerő a vizsgált tartományban akár felére is lecsökkenhet, köszönhetően az összehegesztett alkatrészek fokozatosan növekvő víztartalmának.

#### 4. Összefoglalás

A cikkben PA 6 anyagú elektromos csatlakozóelem ultrahangos hegesztésének vizsgálatával foglalkoztunk. A mérési eredmények diagramjainak tanulmányozásakor kitűnik, hogy a hegesztési energia és a hegesztési erő jelentősen befolyásolja a varrat-szilárdságot, míg a többi paraméter hatása sok esetben alig észrevehető tulajdonságvál-

tozást idéz elő a hegesztett kötésben. Természetesen a szélsőséges beállítások szinte minden esetben meglátszanak, vagy túl erős és beolvadt varrat keletkezik, vagy egyáltalán nem jön létre kötés. Ugyanakkor a nedvességtartalom változása jelentősen befolyásolja a hegesztést. Megfelelő technológiai fegyveremre van szükség, hogy a hegesztésre előkészített darabok ne tartózkodjanak túl sokat az üzemi levegőn, de az eredményekből kitűnik, hogy 2 vagy 3 óra még kevésbé befolyásol.

Észrevehető volt a vizsgált daraboknál, hogy a ház oldalfalai jelentősen befelé görbülnek. Ennek magyarázata mindenképpen a fröccsöntés technológia beállításai, és az alapanyag kölcsönhatásából származik. Az utózsugorodás, amely minden polimer terméknel többé-kevésbé megtalálható, e termék esetében kimondottan káros, hiszen a vékony falaknál és zegzugos geometriánál ez nem kívánatos beszívódásokat, vetemedéseket okozhat. E célból célszerű töltőanyagokat használni, ami ennél az alkatrésznél meg is történt. Ugyanakkor az anyagban található üvegszálak nyilvánvalóan jelentősen módosítják a lehűlés közbeni zsugorodás irányfüggő viszonyait. Ismeretes, hogy fröccsöntésnél a szerszám fala mellett a szálak a fallal párhuzamosan állnak be, vékony falú terméknel nyilván az egész keresztmetszetben. Ennek következtében a beáramló és a szerszám üregét kitöltő anyag mindenhol más irányú zsugorodási képességgel rendelkezik, tehát a zsugorodás mértéke a terméken belül jelentősen anizotrop lesz. Ebből a tulajdonságból következik a ház falának vetemedése. A probléma orvosolható lenne fröccsöntési szimulációs elemzéssel, a beömlés helyének megváltoztatásával vagy a többszörös beömlés alkalmazásával. További megfontolásra érdemes szempont, hogy a PA 6 helyett más, egy vízfelvétele és vetemedésre kevésbé érzékeny alapanyag kerüljön alkalmazásra.

### **Köszönetnyilvánítás**

Az eredmények megjelenését az Országos Tudományos Kutatási Alap (NI62729), valamint az NKTH Öveges József pályázatai támogatták.

### **5. Irodalomjegyzék**

- [1] Marczis, B.; Czigány, T.: Polymer joints. = Periodica Polytechnica, Ser. Mech. Eng. 46. 2002. p. 117–126.
- [2] Ultrasonic joining of moulded parts and semi-finished parts of thermoplastic polymers in mass production- Ultrasonic welding, Methods and Features. = DVS 2216-2: 1992–08.
- [3] Bánhegyi Gy.: Újdonságok a műanyagok ultrahangos és dörzshegesztésében. = Műanyagipari Szemle, 3. évf. 3. sz. 2006. p. 33–40.
- [4] Yousefpour, A.; Hojjati, M.; Immarigeon J. P.: Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. = Journal of Thermoplastic Composite Materials, 17. 2004. p. 303–341.
- [5] Marczis B.; Czigány T.: Interrelationships between welding parameters of hot-gas welded polypropylene. = Polymer Engineering and Science, 46. 2006. p. 1173–1181.
- [6] Bánhegyi Gy.: Speciális poliamidok fejlesztése. = Műanyagipari Szemle, 4. évf. 1. sz. 2007. p. 3–12.
- [7] [www.basf.com](http://www.basf.com)

## Röviden...

### A következő 50 év húzóerői

#### *Nanokompozitok*

Egy 2004-ben született jelentés szerint a nanokompozitok termelése 2003-ban elérte a 90,8 millió dollárt, mennyisége pedig a 11100 tonnát. Előzetes számítások szerint ez 2008-ig évi 18,4%-os ütemben kétszeresére fog növekedni. Egyes vélemények szerint számos cég titokban jelentős fejlesztéseket folytat, ezért hosszú távon a nanokompozitok piaca a fenti becslésnél is nagyobb ütemben bővíülhet.

2004 óta a **Hybrid Plastics** (USA) gyártja és forgalmazza a polyhedral oligomeric silsesquioxane-t (POSS), amely egy szilícium- és oxigénatomokból felépülő molekula, szerves atomcsoportokkal kiegészítve. Ez a polimermátrix számos tulajdonságát képes javítani, egyebek között a lángállóságot, az aromazárást és az ütésállóságot.

Az autóiparban a várható tömegcsökkenésnek köszönhetően igen nagy az érdeklődés a nanokompozitok iránt. A **Dow Chemical** ásványi erősítőanyagból és ciklikus butilén-tereftaláttól reaktív extrúzió segítségével állít elő nanokompozitot. A **GE Advanced Materials** gépkocsik külső karosszériaelemeit kívánja kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező és könnyen festhető nanokompozitból előállítani. *A General Motors évi 300 tonna nanokompozitot dolgoz fel.* Az egyik tipikus alkalmazási terület kistehergépkocsik nyitott platójának borítása polipropilén mátrixú, agyagásvánnyal erősített nanokompozittal.

A német **Süd-Chemie AG** és a **Putsch Kunststoffe ELAN XP** márkanévvel forgalmazzák PP/PS blend mátrixú nanokompozitjukat gépkocsik belső terében való alkalmazásra. Ez a két polimer nem összeférhető, de az alkalmazott ásványi töltőanyagának köszönhetően jól tapadnak egymáshoz, emellett az anyag kiváló karcállósággal és felületi minőséggel rendelkezik.

Az elektronikai iparban ugyancsak fényes jövő áll a nanokompozitok előtt. A japán **Mitsui Chemicals** és a **Takiron** elektromosan vezető lemezanyagokat hoztak forgalomba szénnanocső erősítéssel és különböző polimer – többek között poliimid – mátrixanyagokkal. Ezek alkalmazhatóak a félvezetőgyártásban, az autóiparban és repülőgép-hajtóművekben.

Az igazi áttörést a szénnanocsövek árának csökkenése fogja jelenteni. Szinte minden hónapban bejelentenek egy-egy új, egyre gazdaságosabb eljárást a szénnanocsövek előállítására. Az álomár a kg-kénti 100 cent lenne, aminek elérése hosszútávon egyáltalán nem lehetetlen.

A műanyagmátrixban a megfelelő diszpergálás eléréséhez újabban a szénnanocsöveket már a polimerizáció során próbálják beépíteni. A **Chevron Phillips Chemical Co.**-nál ezzel a módszerrel 0,1–0,2% nanocső koncentrációval PPS, PPO és PEEK esetében ugyanolyan tulajdonságjavulást sikerült elérni, mint az utólagos keveréssel bevitt 2–5% koncentrációnál.