

# Jövők anyagai, technológiái

Rovatvezetők:  
dr. Buzáné dr. Dénes Margit,  
dr. Klug Ottó

BLÜCHER JÓZSEF – DOBRÁNSZKY JÁNOS

## Kompozithuzallal erősített alumínium duplakompozit szerkezetek

A cikkben tárgyalt kerámia- és karbonszál-erősítésű, alumínium mátrixú kompozithuzalok 0,1–2,5 mm átmérővel és 60 térfogat-%-nak megfelelő szálerősítéssel készülnek. A nedvesítés tökéletesítésére szolgáló CVD vagy galvanikus szálelőkezelés is része a gyártási technológiának. A nagy gyártási sebességnek köszönhetően az olvadék/szál határfelületi reakciók lényegesen csökkentek, és ez kiváló mechanikai tulajdonságokat eredményezett. A folyamatos gyártá-

sú kompozithuzalok kiválóan alkalmazhatók arra, hogy megkönnyítsék az alumíniumöntvényekbe történő erősítőszál-bevezetést, valamint duplakompozit szerkezetek (DC), szendvicsszerkezetek és ún. kedvezően megerősített szerkezeteket gyártását. A mechanikai vizsgálatok azt mutatják, hogy a kompozithuzalokkal erősített szerkezetek sokkal nagyobb teherbírásúak, mint a szálakkal direkt módon erősített szerkezetek, vagy a bármely erősítés nélküliek.

### 1. Bevezetés

A kompozitgyártás általános lépéseként a fémolvadéknak az erősítőszálak közé juttatására (a továbbiakban: infiltráció) nagy hidrosztatikus nyomást alkalmaznak, hogy a nagynyomású olvadék legyőzze a szálak és a fémfüred közötti, esetenként nagyon rossz nedvesítési feltételeket, és behatoljon a kompozitnak alakot adó formákba. Karbonszálak és alumínium mátrix esetében – amely párosítás gyakorlati szempontból nagyon kedvezőtlen kombináció a nedvesítés szempontjából – a jó behatolás eléréséhez a szükséges nyomás legalább

8,25 MPa [1–3]. Ilyen, nyomásos infiltrációs alapú gyártással készült el egy sor gyártmány, a szükségesnél nagyobb kamranomást alkalmazva [2]. A kamraméretetek tekintetében a gyakorlati és gazdasági korlátok nyilvánvalóak, következőképp az összetett alkatrészek, valamint a kompozitok folyamatos gyárthatósága megoldatlan. Ráadásul a méretkorlátokhoz társul egy másik jelentős probléma is: az infiltrációs folyamat nagy nyomásából és nagy hőmérsékletéből adódó hosszú expozíciós idő, amely alatt határfelületi reakciók mehetnek végbe az erősítőszálak és az olvasztott

vagy megszilárdult, de még mindig nagy hőmérsékletű mátrix között [4–7].

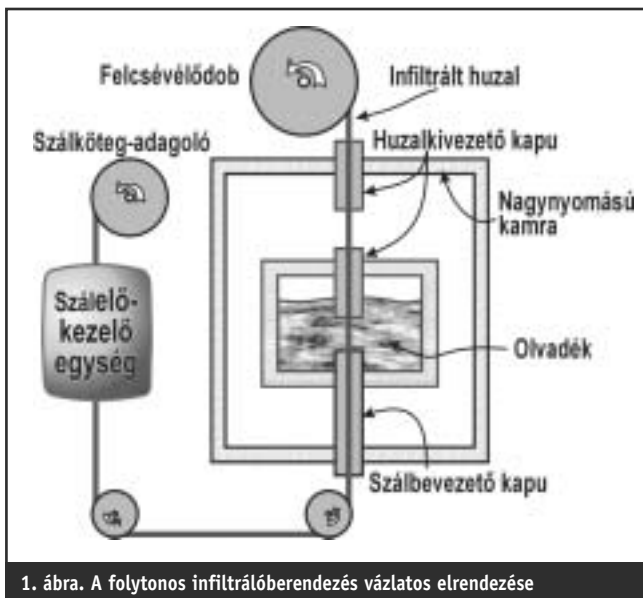
A bostoni Northeastern Egyetemen egy új rendszert dolgoztak ki a szálerősítéses, alumínium mátrixú kompozithuzaloknak (MMC-huzal) a gyakorlatilag korlátlan hosszúságban és jó gazdaságossággal való gyártására [8, 9].

A folyamatos gyártású MMC-huzalok új lehetőségeket nyitnak az alumínium szerkezeti elemek szálerősítésének gyakorlati alkalmazása terén. Eltekintve a közvetlenül mint húzással terhelt teherviselő elemekként való használatuktól vagy a szendvicsszerkezetekbe történő beépítésüktől, egy fontos potenciális alkalmazás az Al- és Mg-öntvények kedvező erősítése. Az a két komoly akadály, mely az alkatrészek közvetlen szálerősítésének kísérletekor fellép – egyrészt a nagy minimális infiltrálónyomás, másrészt pedig az a körülmény, hogy az erősítő szálak hajlamosak „elúszni” az olvadékban a tervezett helyükről – kiküszöbölődik, amikor a szálak előre gyártott MMC-huzalok formájában kerülnek az öntvényekbe.

**Blücher József** a Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett gépészmérnöki oklevelet 1953-ban, majd Gillemot László professzor mellett dolgozott mint tanársegéd a Mechanikai Technológia Tanszéken. Az 1956-os forradalom leverése után kénytelen volt külföldre távozni. Párizsban és Bostonban a Massachusetts Institute of Technology-n folytatta tanulmányait, itt szerzett PhD és DSc tudományos fokozat-

ot. Jelenleg a bostoni Northeastern University Department of Mechanical, Industrial and Manufacturing Engineering professzora. A kompozitszalagok és –huzalok folyamatos gyártására kidolgozott eljárása a világon egyedülálló. A Magyar Mérnökakadémia tiszteletbeli tagja.

**Dobránszky János** a Kohászat szerkesztője. Életrajzát lapunk 2002/11 számában adtuk közre.



## 2. A kompozithuzalok gyártása

A folyamatos infiltrálási folyamat magában foglalja a rendszeren keresztül hűtött szálak olvasztott mátrixba történő be- és kivezetését biztosító fázisátalakulási kapukat is.

A fázisátalakulási kapuk (F/S-kapuk) sikeres működéséhez szükséges a hőmérséklet és az erősítő szálakat magában foglaló szálköteg adagolási sebességének pontos szabályozása. Az adagolási sebesség függ a szálak és az olvadék közti nedvesítéstől, a szálköteg és az elemi szálak átmérőjétől, valamint az alkalmazott infiltrálónyomástól. A rendszer elrendezése az 1. ábrán látható.

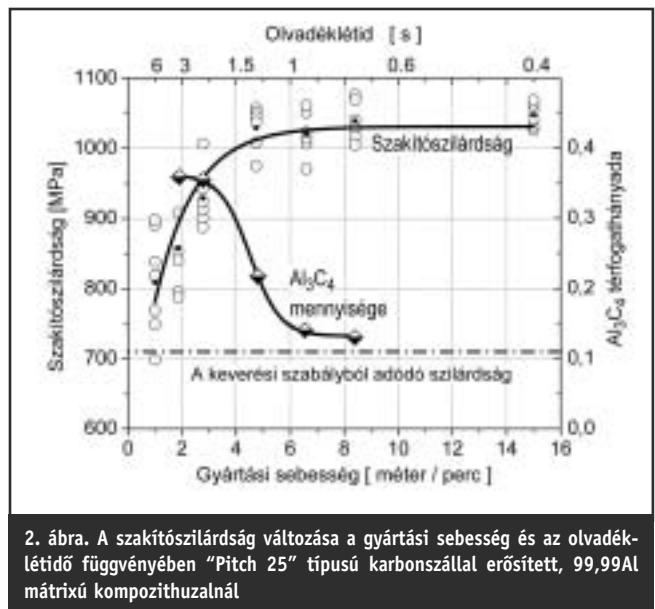
A szálköteg áthalad a szállelőkezelő kemencén, amelyben a bevonat – ha van a szálakon – leég. Kiegészítésként a szálfelületek egyéb eljárással is előkezelhetők a nedvesítés tökéletesítéséhez. Az előkezelő kemencéből a köteg az F/S-kapun át lép a nyomás alatt tartott fémolvadékba, és onnan kilépve, a mátrixanyag megszilárdulása után a felcsévéldőkerékhez jut. A fémolvadék hőmérséklete jellemzően 40 °C-kal haladja meg a fém olvadási hőmérsékletét. A tökéletes infiltráláshoz szükséges nyomás kb. 1,2 MPa a kerámia- és 8,25 MPa a karbonszálak esetében. A rendszer minimálisan 0,2 mm, maximum 2,5 mm átmérőjű és 50-60% száltérfogatú huzalokat gyárt. A jelenleg elért maximális termelékenység, amely 25 méter percenként, akár sokkal nagyobb is lehetne. Az MMC-huzalok előállítására alkalmazott rendszer lehetővé teszi mátrixanyagként Al és Mg alkalma-

zását, erősítő anyagnak pedig az alumínium-oxid különböző fajtáit, SiC- és karbonszálakat.

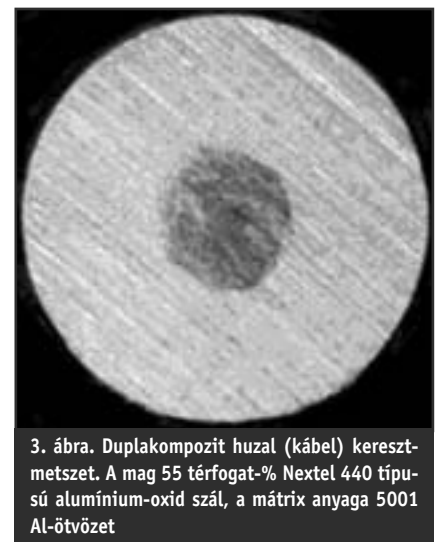
A kerámiaszálak infiltrálása nem jelent nehézségeket. Mindamelllett, bár sok ezer méternyi, karbonszál-erősítéses huzalt állítottunk elő, a karbonszálak sikeres infiltrálása speciális felületkezelés nélkül csak eseti jelleggel volt sikeres. Azért, hogy a karbonszálak infiltrálásának megbízhatóságát ugyanarra a szintre növeljük, mint a kerámiaszálakét, számos felületkezelést alkalmaztunk. Az  $Al_2O_3$ -,  $SiO_2$ -, TiN-, TiB-bevonatok kis és nagy hőmérsékletű CVD-eljárással, valamint Cu- és Ni-bevonatok felvitele mind ígéretes eredményeket mutatnak.

Eltekintve a gyakorlatilag korlátlan hosszúság és nagy termelékenység nyilvánvalóan nem elhanyagolható költségeitől, a szóban forgó folyamatos gyártási eljárásnak komoly előnye az, hogy erőteljesen csökkenti a kémiai reakciót a szálak és a mátrix anyaga között, ezért tökéletesebb mechanikai tulajdonságú kompozitot állít elő. Az olvadék és a szálak közötti reakcióidő akár 0,2 s-ra is csökkenthető.

Ezzel az idővel áll szemben a többi, adagonkénti gyártási eljárásra jellemző sok perces reakcióidő. Az anyagok minden kombinációjára vonatkozóan a folytonos technológiával előállított kompozithuzalok szilárdsága lényegesen nagyobb, mint az adagonkénti gyártásban előállítottaké. Az olvadéklétidő hatása különösen látványos a karbonszálak esetében.



A 2. ábra a gyártási sebesség, ill. az olvadéklétidő függvényeként mutatja a karbonszál-erősítésű MMC-huzalok szilárdságának változását. A szilárdság változását mutató görbe mellett a diagram mutatja az  $Al_3C_4$  alumínium-karbid mennyiségének változását is gázkromatográfiás mérések alapján [10, 11]. A két görbe tisztán mutatja az összefüggést a gyártási sebesség vagy kitéti idő, a reakció és a szilárdság között. Megfigyelhető, hogy miközben a kompozithuzalok szilárdságát jelző görbe 1,2 s-nál kisebb kitéti időknél a maximumot mutató egyenessé válik, a kísérleti eredmények szórása erőteljesen lecsökken. Azt is megfigyeltük [12], hogy a szakadás módja a rideg jellegű törésből a szálkihúzás jellegűvé változott az olvadéklétidő csökkentésével.



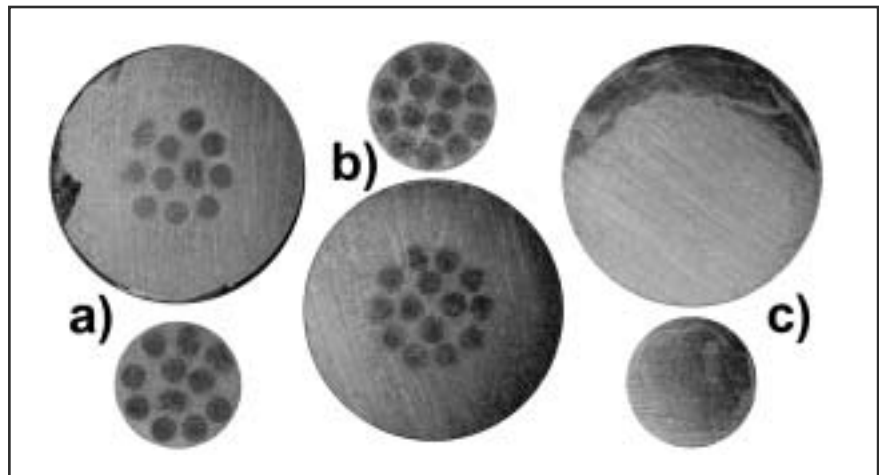
### 3. Kompozit szerkezetek vizsgálatának eredményei

Az MMC-huzalokat közvetlenül huzal alakban alkalmazhatjuk teherviselő szerkezeti elemként mint merevítő- vagy feszítőhuzalokat. A minimális hajlítási sugár a 1,5, ill. a 0,2 mm átmérőjű huzalok esetében 250 mm, ill. 10 mm volt. Az ismertetendő kísérletekben az MMC-huzalokat úgy alkalmaztuk mint előformák betétanyagait szendvicsszerkezetek és preferenciálisan megerősített alumíniumöntvények gyártásához. Amennyiben az erősítőszálak mint elemi szálak vagy szálkötegek közvetlen alkalmazása helyett MMC-huzalokat használunk előformaként, abban az esetben a szálerősítéses kompozit szerkezetek gyártásánál hatékonyan leküzdhető két komoly nehézség. Az egyik a már említett nagy nyomás a szálak infiltrálásához, a másik a gyártóberendezés és a gyártmányok méretkorlátai.

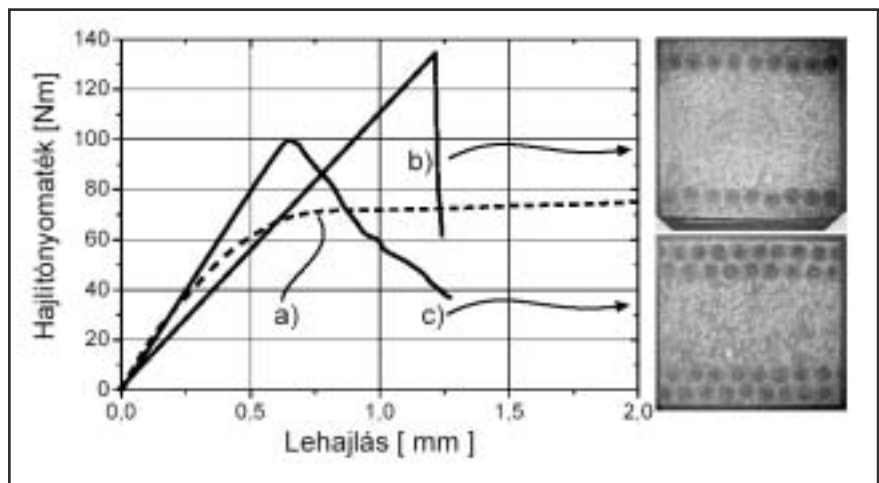
Az előre gyártott kompozithuzalok a mátrixanyagukkal és a relatíve nagy átmérőjükkel biztosítják mind a nedvesítés, mind pedig a geometriai tényezőktől egyébként erősen függő infiltrálás kiváló mértékét, még az öntészeti módszerek legegyszerűbb eseteiben is, pl. a gyakori gravitációs öntésnél. Az a nehézség, amelyet a szálkötegekben lazán összefogott elemi szálaknak az öntőformában való elhelyezése jelent, valamint a szálak azon „törekvése”, hogy elússzanak eredeti helyükről az infiltrálás alatt, szintén eltűnik. Az előre gyártott MMC-huzalokból „vázakat” lehet készíteni, és azokat elhelyezni egy öntőformában. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a kompozithuzalvázak infiltrálása alatt a különálló huzalokban az elemi szálak nem hajlanak el, és megőrzik a kompozithuzalok által meghatározott eredeti helyüket.

#### 3.1. Duplakompozit (DC) kábelek

Első lépésben 55 térfogat-% erősítőszál-tartalmazó, 99,9%-os alumínium mátrixú MMC-huzalokat állítottunk elő. Az MMC-huzalok átmérője 1,6 mm volt. Az MMC-huzalokat alumíniummal burkoltuk (3. ábra). A köpeny kialakítása együttes húzással vagy sajtolással történt. A 4,8 mm-es külső átmérőjű DC-huzal szakítószilárdsága 206 MPa volt, amely érték 75 %-os növekedést jelent az erősítés nélküli alumíniummal összehasonlítva. A DC-huzal az alakíthatósági vizsgálata



4. ábra. Duplakompozit szakítópróbatetek keresztmetszete, ahol az erősítő szálak maguk is kompozithuzalok (a és b). A közvetlen szálerősítés a szálköteg elsodródását okozza (c).



5. ábra. 12 mm vastag lapokból kivett próbatetek hajlítódigramja: (a) erősítés nélküli lapnál, (b) kompozithuzalval 2×1 rétegben erősített, (c) kompozithuzalval 2×2 rétegben erősített szendvicslapoknál

lat szerint egy minimálisan 300 mm-es rádiuszig hajlítható a köpeny és az erősítő maghuzal (amely nem más mint egy kompozithuzalszál) közötti szétválás nélkül.

A DC-huzalok tekintetében az eredmények egyértelműek. Szakításkor az erősítő maghuzalt és a köpenyt egyaránt egytengelyű húzás terheli, és mind a szerkezet nyúlását, mind pedig károsodást egyaránt a jóval nagyobb Young-modulusú kompozithuzalvag határozza meg. A köpeny közreműködése a maga kis Young-modulusával és nagy hajlíthatóságával bármelyik tulajdonság szempontjából figyelmen kívül hagyható. A mechanikai tulajdonságok a társított szerkezetek eme típusára a keverési szabály által meghatározhatók. A 4. ábra további duplakompozit kábelek keresztmetszetét mutatja.

#### 3.2. Szendvicslapok

12 mm vastagságú, szendvicsszerkezetű lapokat gyártottunk, amelyekben az erősítőrétegeket közvetlenül elhelyezett szálakkal, illetve előre gyártott MMC-huzalokkal építettük fel az előformában. A mátrix anyaga AISi12 ötvözet. A közvetlenül elhelyezett szálak Nextel 440 típusú kerámiaszálak voltak. Amikor MMC-huzalokat használtunk a duplakompozit szendvicsekhez, 2×1 és 2×2 rétegű lapok készültek, és 1,5 mm átmérőjű, 55 térfogat-%-ban Nextel-szálakkal erősített MMC-huzalok lettek felhasználva. Az összehasonlítás érdekében erősítés nélküli lapokat is öntöttünk, anyagukban, méretükben és hőciklusukban az erősített lapokkal megegyezőket. A lapokból hárompontos hajlítóvizsgálat céljára az erősítőszálakkal párhuzamos irányban mintadarabokat vágunk. Az 5. ábra mu-

tartja a duplakompozit szerkezetek hajlítódiaagramját MMC-huzalokkal egy vagy két rétegben erősített, ill. erősítése nélküli lapokra vonatkozóan.

A 2×2 rétegű szerkezetben – mint látható – egy kis mértékű képlékeny deformáció előzte meg a gyors repedésterjedéssel végbemenő törést. A 2×1 rétegű szerkezet képlékeny deformáció nélkül tört. A deformáció arányos tartományán a függvény meredeksége 159 Nm/mm volt a 2×2 rétegűnél és 111 Nm/mm a 2×1 rétegű szerkezetnél. Meglepő, hogy amíg az erősített próbatetek hajlítónyomatéka – ahogy elvártuk – sokkal nagyobb, mint az erősítés nélküli próbateteké, addig a görbe meredeksége nagyobb volt az erősítés nélküli anyagnál.

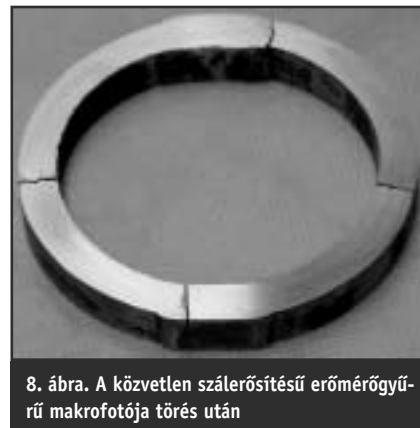
A bemutatott tapasztalatok arra utalnak, hogy a szendvicsszerkezetű kompozitok szilárdságnövekedési és károsodási jellemzői mind a terheléstől, mind pedig az erősítőszálak eloszlási jellemzőitől függenek. Néhány esetben, amelyeket itt

nem tárgyaltunk, a tapasztalati eredmények nem felelnek meg azon elvárásoknak, amelyek szálerősített MMC-re vonatkozó, elfogadott szabályokon alapulnak.

Azon mintadarabok esetében, ahol az erősítés közvetlenül alkalmazott karbonszálakkal történt, a határfelület nyírószilárdsága kisebb volt, mint az erősített réteg normálfeszültsége, ezért a tönkremenetelt nyíró rétegszétválás idézte elő. Amikor az erősítéshez alumíniumoxid szálakat alkalmaztunk a karbon helyett, a szálak és a mátrix közötti erősebb kötés segítette a határfelületi rétegben fellépő deformációváltozáshoz való alkalmazkodást. Ennek tudható be, hogy nem történt rétegszétválás, a törés inkább az erősített rétegben való repedésképződéssel indult, és hirtelen terjedt keresztül az egyébként szívós magon.

### 3.3. Erőmérőgyűrű

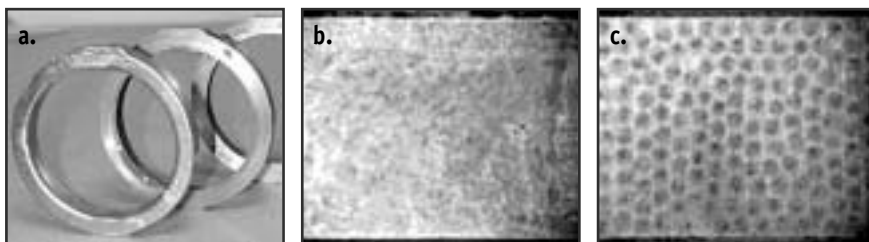
Erőmérőgyűrű alakú ötvényeket gyártottunk erősítés nélküli AlSi12 ötvözet-



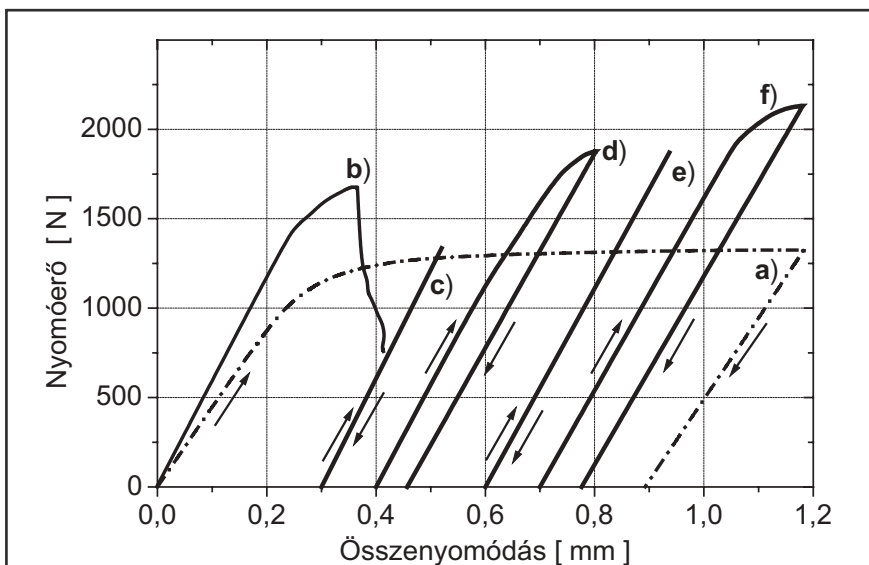
8. ábra. A közvetlen szálerősítésű erőmérőgyűrű makrofotója törés után

ből, Nextel 440 szálakkal közvetlenül erősített kivitelben (8,25 MPa nyomással infiltrálva), valamint duplakompozit kivitelben, 55 térfogat-%-ban Nextel 440 szálakat tartalmazó MMC-huzallal erősítve (gravitációs öntéssel infiltrálva). A 6. ábra mutatja az erőmérőgyűrűket és a keresztmetszetüket. A gyűrűket függőleges átló irányban terheljük. Az alakváltozást egy LVDT-vel (linear variable displacement transducer) mértük, amelyet a gyűrűkön kívül helyeztünk el a terhelés irányában. Az szálerősítés nélküli szerkezetnek 890 N terhelése volt az arányos deformációs értéknél, ezt követte egy 0,812 mm állandó deformáció az alkalmazott, maximálisan 1335 N terhelésnél (7. ábra). Az erősítőszálak közvetlen infiltrálásával gyártott szerkezet arányosan 1350 N terhelésig deformálódott, mielőtt a törés 1690 N terhelésnél bekövetkezett.

Az előre gyártott MMC-huzallal erősített duplakompozit szerkezet először három, egymást követő ciklusban volt terhelve 1335 N erővel. A tehermentesítés után állandó deformáció nem volt mérhető. A következő, negyedik terhelési ciklusban a terhelést 1780 N-ig növeltük. A rugalmas deformáció 1424 N-nál végződött. A maximális terhelés 0,057 mm értékű képlékeny deformációt eredményezett. Az újabb két, F=1780 N-ig végzett összenyomás (5. és 6.) erő-elmozdulás diagramja azt mutatta, hogy az előző (4.) alakítási ciklusban lezajlott alakítási keményedés 1780 N-ig növelte a folyáshatárt, további maradó alakváltozás nélkül. Következésképpen, amikor a terhelést a 2225 N-ig növeltük a hetedik ciklusban, az előző két, 1780 N-os (rugalmas) terhelési ciklus után a folyáshatár 1780 N volt. A 2225 N maximális terhelésnél bekövetkezett végleges deformá-



6. ábra. Öntéssel készült erőmérőgyűrűk keresztmetszete: erősítés nélküli (a), közvetlen szálerősítéses (b), duplakompozit (c). A gyűrűk belső átmérője 3 inch, vagyis 76,2 mm.



7. ábra. Az erőmérő-gyűrűk nyomódiagramja: erősítés nélküli (a), direkt szálerősítésű (b), a duplakompozit gyűrű első 3 terhelési ciklusa (c), a 4. terhelési ciklusa (d), az 5. és 6. terhelési ciklusa (e) és a 7. terhelési ciklusa (8).



ció 0,076 mm volt a korábbi 0,05 mm-en kívül. A gyűrűk további két (8. és 9.), 2225 N-ig való terhelése ismét ezt a folyáshatárt mutatta, újabb képlékeny alakváltozás nélkül. A gyűrűt nem terheljük törésig. A rugalmas deformációs tartományokban a terhelési görbék mereksége 4380 N/mm volt az erősítés nélküli, 5920 N/mm a direkt szálerősítéses és 6590 N/mm kompozit-huzal-erősítésű gyűrűnél.

Az erőmérőgyűrű geometriájú mintadarabokban a tengelyirányú külső terhelés a függőleges és a vízszintes átlóknál maximális hajlítófeszültséget eredményez. A közvetlen szálerősítésű gyűrű a maximálisan terhelt helyeken törött, amint a 8. ábra mutatja. Az MMC-huzalok erősítésű gyűrűnél teljesen más volt a gyűrű viselkedése. Noha átlagosan kisebb térfogatszázaléknak megfelelő erősítő szál volt a keresztmetszetben, a folyáshatár nagyobb volt, mint egy direkt szálerősítésű gyűrűnél. Sőt, mi több, a folyáshatár jelentősen növekedett a hidedegalakítás eredményeképp, amikor a gyűrűt a folyáshatárnál nagyobb terheléssel terheltük. Amikor a hidegen alakított munkadarabot ciklikusan a megnövekedett folyáshatárig terheltük fel és tehermentesítettük, nem figyeltünk meg hiszterézist.

#### 4. Következtetések

A bemutatott kísérleti eredményekből teoretikusan az ember arra a következtetésre juthat, hogy a szálerősítésű próbatestek, gyártmányok teherbíró képessége nemcsak az egyedi szálak és a mátrix anyaga közötti határfelület tulajdonságaitól, valamint a szálak térfogathánya-

dától függ, hanem a szálak makroszkopikus elrendeződésétől is. Nyilvánvaló, hogy amikor az infiltrált szálkötegek (kompozit-huzalként) el vannak különítve egy erősítés nélküli mátrixban, a törés bekövetkezte az egyes huzalokban készletetett. Eltérően a közvetlen szálerősítésű szerkezetektől, a kompozit-huzalok károsodása a felhalmozott repedésterjedési energiának egy relatíve fokozatos felszabadulásával megy végbe, mindeközben valamelyest csökken a repedésterjedés hajtóereje a magban. Az erre a viselkedésre adott magyarázatok a jelen dolgozat írása pillanatában csak feltételezettek, a folyamat pontosabb értelmezésén tovább dolgozunk.

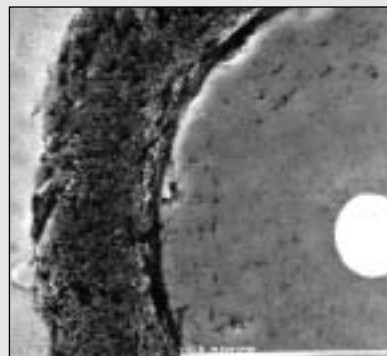
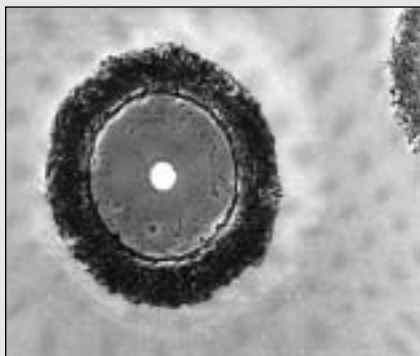
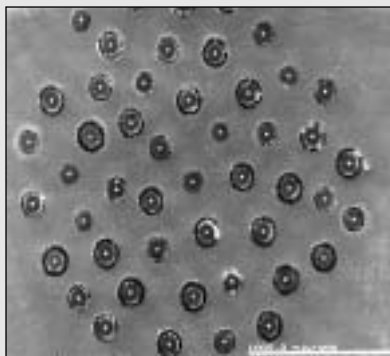
A gyakorlat oldaláról közelítve a következtetés az, hogy a szálerősítéses fém mátrixú kompozit-huzalok akár ipari szinten is megfelelő gazdaságossággal gyárthatók. A kompozit-huzalokat közvetlenül használhatjuk teherbíró elemekként.

Az alkalmazásuk számos lehetőséget nyit az izgalmas mechanikai tulajdonságokkal rendelkező, új, összetett szerkezetek gyártása terén, és nagyban előmozdíthatja a részben vagy teljes keresztmetszetben erősített könnyűfémöntvények előállítását/gyártását.

#### Irodalom

- [1] A. Mortensen, J. Cornie, Metallurgical Transactions 18A (1987) 1160.
- [2] J. Blucher, Journal of Materials Processing Technology 30 (1992) 381-390.
- [3] A. Mortensen, In: T. W. Clyne (Ed.), Metal Matrix Composites, Pergamon, Oxford UK, 2000.

- [4] M. H. Vidal-Sétif, M. Lancin, C. Marhic, R. Valle et al., Materials Science and Engineering A272 (1999) 321.
- [5] J. Dobranszky, J. T. Blucher, In: MATÉRIAUX 2002, Premier congrès interdisciplinaire sur les matériaux en France, af06021.pdf:1-5, Université de Technologie Belfort-Montbéliard, 2002, af06021.pdf
- [6] Kaptay Gy., Bolyán L. Kerámiával erősített fém mátrixú kompozitanyagok gyártásának határfelületi vonatkozásai. II/1. rész. Határfelületi energiák adatbank. Anyagpárválasztás. BKL Kohászati, 131 (1998:5-6) 179-185.
- [7] G. Kaptay, E. Báder, L. Bolyán: Interfacial Forces and Energies Relevant to Production of Metal Matrix Composites. Materials Science Forum, 329-330 (2000) 151-156.
- [8] Blucher JT: US Patent Number 5736199, 7 April 1998.
- [9] J. T. Blucher, U. Narusawa, M. Katsumata, A. Nemeth, Composites A 32 (2001) 1759.
- [10] E. Pippel, J. Woltersdorf, M. Doktor, J. Blucher, P. Degischer, In: A. Kranzmann, U. Gramberg (Eds.), Werkstoffwoche '98 – Band III, Wiley-VCH, 2000, pp.213-218.
- [11] M. Doktor, J. Blucher, P. Degischer, In: M. A. Erath (Ed.), Proceedings of the 19th International SAMPE Europe Conference, SAMPE Europe, 1998. pp.555-564.
- [12] M. Doktor, PhD. Thesis, Technischen Universität Wien Fakultät für Maschinenbau, 2000.



Gyémántbevonatos SiC-szállal (Textron) erősített Ti-mátrixú kompozit keresztmetszeti képe

Forrás: <http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/semcomp.htm>