



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR DOKTORI TANÁCSA  
DOKTORI TÉZISFÜZETEI

Írta:

Kientzl Imre  
okl. gépészmérnök  
okl. hegesztőszakmérnök

# **Alumínium mátrixú kompozithuzalok és kettőskompozit szerkezetek**

című témakörből,  
amellyel a PhD fokozat elnyerésére pályázik

Konzulens: Dr. Dobránszky János

Budapest

2010

## A kutatások előzménye

---

A fémmátrixú kompozitok (Metal Matrix Composite = MMC) kutatása napjainkban nagy hangsúlyt kap kiemelkedő tulajdonságai miatt, mint amilyen a vezetőképesség, a nagy szilárdság és merevség, amelyet képes megőrizni még nagy hőmérsékleteken is. A tulajdonságok a célnak megfelelően választott anyagokkal és azok mennyiségével szabályozhatók (szilárdság, vezetőképesség).

A BME Gépészmérnöki Karának Anyagtudomány és Technológia Tanszékén az 1990-es évek óta folynak fémmátrixú kompozitokkal kapcsolatos kutatások. A kompozit laboratórium Blücher Józsefnek, a bostoni Northeastern University professzorának adományaként került a tanszékre 2004-ben. Maga a kompozithuzalgyártó eljárás is Blücher professzor nevéhez fűződik, amit több megjelent szabadalom is véd [1, 2].

Szakirodalmi összefoglalásomban a fémmátrixú kompozitokhoz kapcsolódó publikációkat tekintetem át, úgymint:

- az infiltrációs technológia: a szakirodalom alapján választ adtam azokra a kérdésekre, hogy ezt a technológiai ágat milyen kompozitok előállítására alkalmazták már korábban, milyen paraméterek mellett és milyen eredményekkel. Kiemelten foglalkoztam a Blücher-féle folyamatos infiltrációs technológiával és a gáznymósos infiltrációval [3, 4]. A fémmátrixú kompozitok előállítási eljárásainak egyik csoportosítása az alapanyag gyártás közbeni állapota szerint történik [5]. Ez alapján az infiltrációs technológiák a folyadékfázisú eljárások közé tartoznak és egyben ezek képviselik az egyik leggazdaságosabb módot az MMC-k gyártására [6].
- az infiltrációs nyomás meghatározása: azokat az elméleti modelleket tekintetem át, amelyek segítségével megbecsülhető a szálerősítésű fémmátrixú kompozitok infiltrációs technológiával történő előállításához szükséges küszöbnyomás értéke, valamint az adott kompozitra jellemző geometria mellett tapasztalható kritikus peremzög [7-12].
- a tartós idejű hőkezelések hatása és a Seebeck-effektus: a tartós idejű hőntartással kapcsolatos irodalomkutatás során a végbemenő reakciókat tartottam szem előtt az  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  és az  $\text{Al}/\text{SiO}_2$  rendszerben, mert a kompozitok, amelyeket előállítok Nextel™ 440 kerámiaszálakat és 99,5% tisztaságú alumíniumot tartalmaznak. A Nextel™ 440 fő komponensei pedig az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  és  $\text{SiO}_2$ , így mechanikai és elektromos tulajdonságokban

esetlegesen bekövetkező változásokért nagy valószínűséggel ezek a kémiai reakciók lesznek a felelősek.

- a hibrid és duplakompozitok: a szakirodalomban kevés olyan tudományos cikk van, amelyben kompozit anyagot használnak fel egy második mátrix megerősítésére, kettős kompozitként [4].

## Az irodalom kritikai elemzése

---

A következőkben témakörökre bontva ismertetem azokat az információkat és következtetéseket, amelyeket a szakirodalom áttekintése során állapítottam meg.

**Infiltrációs technológia és az eddig elért eredmények.** Egyrészt megállapítottam, hogy az egyik leggazdaságosabb eljárástípus a gáznyomásos infiltráció, amely a legsokoldalúbban és legelterjedtebben alkalmazott eljárás fémmátrixú kompozitok előállítására. Másrészt bebizonyosodott számomra, hogy kettős kompozitok előállítására a legtöbb eljárás alkalmas, így ez teret adhat a jövőben a kettős kompozitok alkalmazásának.

Az infiltrációs eljárások áttekintésével megmutattam az egyes technikákra jellemző gyártási paramétereket. Látható volt, hogy a legrövidebb olvadék-erősítőfázis kontaktusidő a folyamatos eljárásokra jellemző, viszonylag alacsony nyomásigény mellett. A legkisebb nyomásigényű eljárás természetesen az ultrahangos és a nyomás nélküli infiltráció. Ezt követi a vákuumos infiltrálás, majd a folyamatos gáznyomásos infiltráció és a legnagyobb nyomással működő eljárások sorrendben a centrifugális infiltráció, a gáznyomásos infiltráció, a nyomásos és a kiszorításos öntés.

**Szálerősítésű kompozitok mechanikai tulajdonságai.** A folyamatos nyomásos infiltrációval előállított kompozitok szilárdsága az elméleti értékekhez viszonyítva lényegesen jobban alakul, mint bármely más eljárás esetében. Ennek oka, egyrészt a rövid fémolvadék-erősítőfázis kontaktusidő, másrészt a nagy gyártási sebességből adódó gyors hűlésből fakadó finom szemcseszerkezet.

Kevés az olyan publikáció, amely az infiltrációs technológiák nyomásának függvényében vizsgálná a folytonosszal-erősítésű kompozitok mechanikai tulajdonságait, olyan szakirodalmat azonban egyáltalán nem találtam, amelyben a folyamatos infiltrációval kapcsolatban közöltek volna ilyen jellegű eredményeket. Ez azt bizonyítja, hogy a célkitűzésemben megfogalmazott kutatási irányok új

eredményre vezetnek. A kizorításos öntéssel kapcsolatban született szálerősíté-  
tész kompozitok vizsgálati eredménye azt mutatta, hogy a növekvő nyomással a  
várakozásoknak ellentmondóan nem nő, hanem csökken a szilárdság, a szál  
bevonatának mechanikai károsodásának következtében.

**Analóg számítási módszerek és elméletek.** A szakirodalomban található néhány  
olyan publikáció, amelynek segítségével megfelelő adatok birtokában számítha-  
tó az infiltráció megindulásához szükséges küszöbnyomás (threshold pressure).  
A nedvesítési fejezetből származó adatokat ennek a számításnak az elvégzésé-  
hez használok fel. Az eredmények összevetésekor tekintettel kell lenni arra,  
hogy a számítási módszer kör keresztmetszetű szálakra lett kidolgozva, míg az  
általam erősítőfázisként alkalmazandó szálak ovális keresztmetszetűek.

Összehasonlítva a megjelent elméletek által adott, a spontán infiltrációhoz tar-  
tozó peremszögértékeket az  $Al_2O_3/Al$  rendszerben reális peremszöggel (130-  
140°) megállapítható, hogy minden elmélet egybehangzóan azt mutatja, hogy  
ebben a rendszerben nem alakulhat ki spontán infiltráció, hiszen minden elmé-  
let 130° alatti kritikus peremszöget ad meg. Tehát a kompozituzalgyártáshoz  
mindenképpen nyomásra lesz szükség a kritikus és a valós peremszög közötti  
különbség áthidalása végett.

**Nedvesítés.** A nedvesítéssel kapcsolatos cikkek áttekintéséből ismerté vált szá-  
momra, hogy milyen szempontoknak megfelelően kell értékelnem a publikáció-  
kat és ennek tudatában megbízható adatokat találtam a szakirodalomban. A  
megtalált adatok egyrészt a céltudatos kísérletvégzéshez nyújtanak segítsé-  
get, hiszen nyilvánvaló vált, hogy számomra a hőmérséklet és a tartózkodási idő  
növelése kedvezően befolyásolja a nedvesítést. Másrészt viszont ezen adatok-  
ra támaszkodhatok az infiltrációs nyomás becsléséhez végzendő számításaim-  
nál. A szakirodalmi adatok egy bizonyos mértékű szórást mutatnak, ezért a  
számításoknál értéktartományokat veszek majd figyelembe. A számításokban a  
felületi feszültség értékét az irodalmi adatok alapján  $0,84-0,90 J/m^2$ -re veszem  
fel, míg a peremszög értékét 130-140°-ra.

**Mechanikai tulajdonságok változása.** A témával foglalkozó tudományos publi-  
kációkban közölt eredmények általánosságban arról számolnak be, hogy a  
kompozitok hosszú ideig történő hőntartása a mechanikai tulajdonságok romlá-  
sához vezet. Abban az esetben, amikor a hőkezelést például a mátrix kiválásos  
keményítése miatt végzik, természetesen szilárdságnövekedésre számíthatunk,

azonban a szívósság csökken még akkor is, ha a határfelületen nem megy végbe káros reakció.

A közölt eredményeket összegezve, az alumíniumolvadék és alumínium-oxid közötti reakciók igen valószínűleg, mert legfeljebb gáz halmazállapotú  $Al_2O$  keletkezhetne, ennek során, de ez időigényes folyamat és energetikai szempontból sok más, kedvezőbb folyamat előzheti meg. Ugyanakkor az  $Al/SiO_2$  közötti reakció már sokkal valószínűbb, ugyanis még kompozitgyártó eljárás is épül erre a reakcióra, amelynek folyamán  $Al_2O_3$  a végtermék.

Ezek alapján a Nextel™ 440 típusú, főként  $Al_2O_3$  és  $SiO_2$  tartalmú, kerámiaszállakkal erősített kompozitok hőkezelése várhatóan a mechanikai tulajdonságok csekély szintű romlásával fog járni, és ha nem is jelentős mértékben, de a határfelületen reakciók mehetnek végbe.

**Villamos ellenállás.** A szakirodalomban nem találtam olyan publikációt, amelyben a tartós idejű hőkezelés hatására bekövetkező változásokat fajlagos ellenállás mérésével is nyomon követték volna. Azonban feldolgoztam olyan analóg számítási módszert, amely segítségével nemvezető szállakkal erősített, fémmátrixú kompozitok fajlagos ellenállása megbecsülhető. A szakirodalmi adatok alapján kijelenthető, hogy az erősítőfázis alakja hatással van a fajlagos ellenállásra, így az eltérő alakú erősítőfázissal rendelkező anyagokon mért értékek csak nagyságrendileg vethetőek össze. Ezek alapján a várható kísérleti eredményeim mindenképpen jelentős újdonságtartalommal bírnak majd.

Termoelektromos erő. Az áttekintett szakirodalomban számos olyan eset van, ahol arról számolnak be kutatók, hogy a termoelektromos erő-mérést használták fel egy fémes anyagban vagy éppen fémmátrixú kompozitban végbemenő változások nyomon követésére. A publikációkban található adatok szerint a termoelektromos erőt érdemben befolyásolják a diszlokációk, az oldott atomok és a kiválások.

Ezek alapján úgy gondolom, hogy a termoelektromos erő-mérést felhasználhatom a kompozitvezeték tartós idejű hőkezelése során végbemenő változások monitorozására. A kísérleteimben Al 99,5 ipari tisztaságú alumíniumot használtam fel mátrixként és Nextel™ 440 kerámiaszállakat erősítőanyagként. Az említett alumíniumban a szabvány vasból (max. 0,4%) és szilíciumból (max. 0,1%) engedi meg a legnagyobb szennyezőtraktumot. Mivel ezek értéke is csekély, arra a következtetésre jutottam, hogy az oldott atomok mennyisége is kevés, így megbizonyosodtam róla, hogy nincs olyan ötvöző az alumíniumban, amely szá-

mottevéően befolyásolhatná az eredményt. Oldott atomok még a kerámiaszálakból kerülhetnének az alapfémbe, de a vizsgált hőmérséklettartományban a Nextel™ 440 minden komponense olyan kémiai stabilitással bír, hogy ennek valószínűsége elhanyagolható. Ezek a megállapításaim a kiválásokra is igazak, így a kísérleti eredményekben esetleg megjelenő változásokért nagy valószínűséggel sem a kiválások, sem az oldott atomok nem lehetnek felelősek.

A diszlokációk jelenléte viszont elképzelhető a szálak környezetében. A gyártás során a kis átmérővel rendelkező kompozithuzal az áramló levegőben is igen gyors hűtésnek van kitéve, így az erősítőanyag és a mátrix hőtágulási együtthatóinak különbségei miatt lokális alakváltozás történhet. Ugyanez az eset áll fenn a tartós idejű hőkezelés kísérlet esetében, mert a hőkezelést követően a kemencéből való eltávolításkor a kis keresztmetszet gyorsan hűlt. Ezért a szálak körüli diszlokációk megjelenésének a lehetősége fennáll.

**A hibrid és kettős kompozitok** területén végzett irodalomkutatásomból kiderült, hogy ez a tématerület az utóbbi években vált igen népszerűvé, és számomra meglepő módon az építőiparral kapcsolatos fejlesztések járnak élen ezen a területen. A fémes kompozitokkal foglalkozó cikkekben is megjelennek a hibrid kompozitok és a több fajta erősítőfázis párhuzamos alkalmazásának előnye, a hibrid hatás is. A kettős kompozitok alapvető előnye abban rejlik, hogy egy korábban már jól infiltrált, kisméretű erősítőfázist tartalmazó kompozitot használunk fel erősítőanyagként, így a kettős kompozit gyártása már nem olyan körülményes, mert az infiltráció biztosított. Ezenfelül egyszerre nagy adag erősítőanyag helyezhető el kompozitként a kettős kompozitban, ezzel megoldva az adagolást és a pozícionálást.

## **Irodalmi hivatkozások listája**

---

- [1] Blucher JT: Gating system for continuous pressure infiltration process. 1998.
- [2] Blucher JT: Reinforced structural elements incorporating fiber-reinforced metal matrix composite wires and methods of producing the same. 2003.
- [3] Blucher JT, Narusawa U, Katsumata M, et al.: Continuous manufacturing of fiber-reinforced metal matrix composite wires -

- technology and product characteristics. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*. 2001; 32: 1759-1766.
- [4] Blucher JT, Dobranszky J, Narusawa U: Aluminium double composite structures reinforced with composite wires. *Materials Science and Engineering A*. 2004; 387-389: 867-872.
- [5] Rosso M: Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006; 175: 364-375.
- [6] Acilar M, Gul F: Effect of the applied load, sliding distance and oxidation on the dry sliding wear behaviour of Al-10Si/SiCp composites produced by vacuum infiltration technique. *Materials & Design*. 2004; 25: 209-217.
- [7] White LR: Capillary rise in powders. *Colloid Interface Science*. 1982; 90: 536-538.
- [8] Mortensen A, Masur LJ, Cornie JA, et al.: Infiltration of fibrous preforms by a pure metal: Part I. Theory. *Metallurgical Transactions A*. 1989; 20A: 2535-2547.
- [9] Mortensen A: Corrigenda and comments on the infiltration of fiber preforms. *Metallurgical Transactions A*. 1990; 21A: 2287.
- [10] Garcia-Cordovilla C, Louis E, Narciso J: Pressure Infiltration of Packed Ceramic Particulates by Liquid Metals. *Acta Materiala*. 1999; 47: 4461-4479.
- [11] Kaptay G, Bárczy T: On the asymmetrical dependence of the threshold pressure of infiltration on the wettability of the porous solid by the infiltrating liquid. *Journal of Materials Science*. 2005; 40: 2531-2535.
- [12] Kaptay G: The threshold pressure of infiltration into fibrous preforms normal to the fibers' axes. *Composites Science and Technology*. 2008; 68: 228-237.

## **Célkitűzések**

---

A fenti tények és problémák ismeretében a céljaim kitűzésekor figyelembe vettem a nyitott kérdések megválaszolásának fontosságát és a korszerű ipar igényeit. Ezek alapján a célkitűzéseimet a következők szerint fogalmaztam meg:

1. Célom, hogy a folyamatos infiltrációs eljárás egyik fő gyártási paraméterének, az infiltrációs nyomásnak a hatását vizsgáljam Nextel 440/Al kompozithuzalok tulajdonságaira (térkitöltés, szilárdság, fajlagos ellenállás) és a közöttük fennálló kapcsolatot leírjam. Emellett a kompozithuzalok gyártásához szükséges küszöbnyomás elméleti úton történő meghatározási módszereit összehasonlítsam és a mérési eredményeim alapján értékeljem.
2. További célom, hogy a kompozithuzalok tartós idejű termikus hatásokra adott válaszát és azok kapcsolatát vizsgáljam, hiszen a nagyfeszültségű kábelként alkalmazott kompozithuzalokat akár 300°C-os hőterhelés is érheti, ezért kiemelten fontos e tulajdonságok ismerete. Szintén ebből a szempontból kifolyólag fontos válaszolni arra, hogy a hőkezelések hatására romlik-e a fajlagos villamos ellenállása a kompozithuzaloknak.
3. Célom még, hogy kísérletekkel igazoljam a Nextel 440/Al kompozithuzalok alkalmazhatóságát kettőskompozitokban és több eljárást alkalmazva meghatározom az elérhető szilárdságnövekedést.

## Vizsgálati módszerek

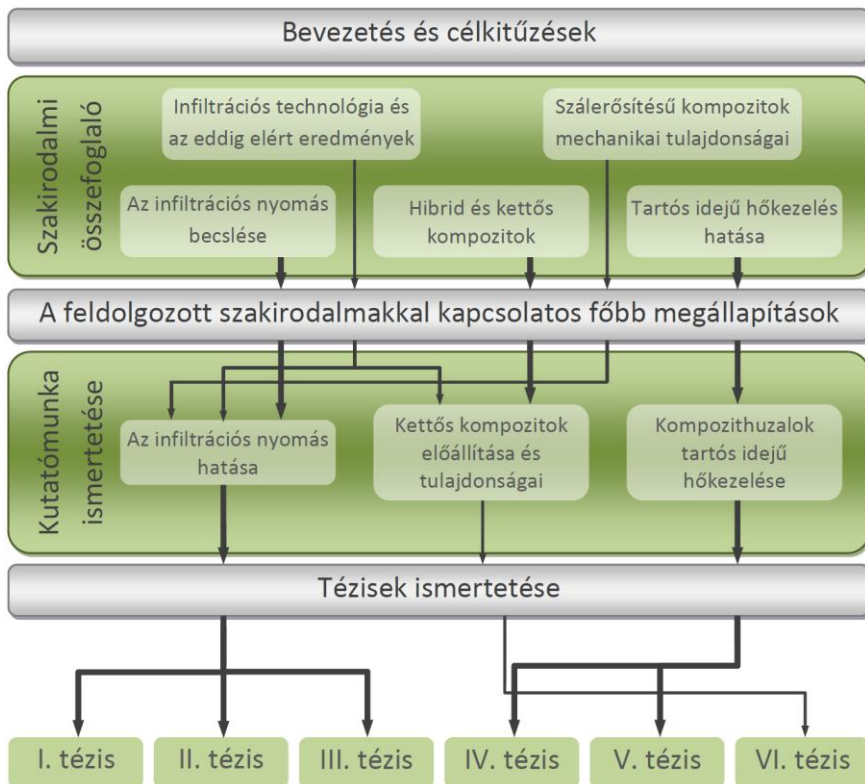
---

A kísérleti munkám három fő tématerület köré csoportosul:

- a kompozithuzal gyártása során alkalmazott infiltrációs nyomás hatásának vizsgálata a kompozithuzal térkitöltésére és szilárdságára;
- a kompozithuzalok tartós idejű hőkezelésekor a próbatestekben végbemenő változásokat követtem nyomon;
- a kettős kompozitok előállításával az volt a célom, hogy az ilyen összetett anyagok anyagtulajdonságait meghatározzam és, hogy igazoljam a gyakorlati alkalmazásának indokoltságát.

A dolgozatom felépítését az 1. ábrán mutatom be.





1. ábra: Az értekezésem felépítése  
(a vékony és vastag nyilak csupán az áttekinthetőséget segítik)

## A kutatómunka összefoglalása

Az értekezésemben bemutatott kísérleti munkám három fő területet foglal magába, úgymint az infiltrációs nyomás hatása a kompozithuzalok tulajdonságaira, a kompozithuzalok tartós idejű hőn tartása és annak hatása, valamint a kettős kompozitok előállítása és vizsgálata.

Az infiltrációs nyomás hatásának vizsgálatához 1,0 és 2,0 mm átmérőjű Nextel™ 440 szálakkal erősített alumíniummátrixú kompozithuzalokat állítottam elő folyamatos infiltrálással, és a gyártás alatt lépcsősen változtattam az infiltrá-

ciós nyomást. Az 1,0 mm-es kompozithuzalok esetében 5 lépcsőben, míg a 2,0 mm átmérőjű huzaloknál 7 lépcsőben. Ennek oka az volt, hogy a nagyobb átmérőjű kompozithuzalnál, szálszakadás nélkül, nagyobb gyártási nyomás volt megengedhető. A huzalokból minden egyes nyomáshoz tartozóan 10-10 mintát vettem ki, amelyeken vizsgáltam az infiltrált keresztmetszet hányadát és a szakítószilárdságot. A mátrix térkitöltését a kompozithuzal teljes keresztmetszetéről alkotott optikai mikroszkópos felvételek képelemzésével határoztam meg, amely eljárás során a huzalban lévő szálakat, üregeket és a mátrixot azok színe alapján választottam szét. Az eredmények szemléletesebb ábrázolása véget bevezettem a relatív mátrixhányadot, amely azt mutatja meg, hogy a szálak közötti tér hány térfogatszázalékát sikerült kitöltenie a mátrixnak. Majd ennek a paraméternek a függvényében ábrázolva mutattam meg az infiltrációs nyomás változását 1,0 és 2,0 mm átmérőjű kompozithuzalokra.

A kísérletből megállapítottam, hogy az infiltrációs küszöbnyomás értéke folyamatos eljárás során Nextel™ 440/Al 99,5 kompozithuzalok esetén 0,62-0,83 MPa közé esik, mert e nyomás alatt nem történt infiltráció és az infiltrálás megindulása ebbe a tartományba esik. Az első vizsgálható (a mátrix által egyben tartott) kompozithuzalt 0,83 MPa nyomás mellett sikerült előállítani, és egyben ez a gyártás során alkalmazott első nyomáslépcső is mindkét kompozithuzal méret esetében. Az 1,0 mm-es kompozithuzalnál a szálszakadás nélkül elérhető maximális infiltrációs nyomás 1,65 MPa, míg 2,0 mm-es huzaloknál 2,07 MPa volt. Megállapítottam, hogy a nyomás és az alumínium-térkitöltése közötti kapcsolat nagyon jó közelítéssel lineáris a vizsgált tartományban. A kísérleti eredményeimet összevettem két, az infiltrációs nyomás becslésére szolgáló, elméleti modellel. A White-Mortensen modell az én esetemben érvényes paraméterek mellett ( $\sigma=0,84-0,9 \text{ J/m}^2$ ;  $\Theta_{\text{Al-Al}_2\text{O}_3}=130-140^\circ$ ;  $V_{\text{sz}}=43,7-59,7\%$ ; és  $d_{\text{sz}}=8,2-14,5 \mu\text{m}$ ) 0,12-0,50 MPa értéktartományra jósolja az infiltráció megindulásához tartozó küszöbnyomást, míg a Kaptay modell ugyanezekkel a paraméterekkel számolva 0,20-0,77 MPa-ra. Megállapítottam, hogy a mérési eredményeim csak a Kaptay modellel mutatnak átfedést, így csak ez a modell adhat magyarázatot a folyamatos infiltráció nyomásszükségletére. A White-Mortensen modell számításába nem körkeresztmetszetet, hanem a valóságnak jobban megfelelő ovális szálát helyettesítve megállapítottam, hogy az érvényes paramétertartomány középtértékeivel a számítás nem mutat jelentős eltérést ( $P_{\text{kör}}=0,23 \text{ MPa}$ ;  $P_{\text{ovál}}=0,21 \text{ MPa}$ ), tehát az ovális keresztmetszet helyettesítése az ovál főtengely

lyeinek átlagával megegyező átmérőjű körrel, a gyakorlat számára elfogadhatóan kismértékű hibát eredményez ez a modell.

Az infiltrációs nyomás változtatásával készült kompozithuzalokból kivett mintákon szakítóvizsgálatot végeztem, amelynek tanulsága szerint a kompozithuzalok szilárdsága méretfüggő és maximumos görbét ad az infiltrációs nyomás és a relatív mátrixhányad függvényében egyaránt. A vizsgálatok eredményei alapján a 2,0 mm átmérőjű kompozithuzal szilárdsága csupán 75%-a az 1,0 mm-es huzalénak. A szakítószilárdság maximuma az 1,0 mm-es kompozithuzalok esetében 1,03 MPa-nál, azaz 82,3%-os relatív alumínium térfogathányadnál, míg 2,0 mm huzalnál 1,86 MPa-nál és 89,7%-os relatív alumíniumtartalomnál adódott. A nyomás-szakítószilárdság függvénymaximum létezését a nagyobb nyomásokon fellépő száltöredéssel és elnyíródással magyarázom, azonban ezt kísérletileg nem sikerült igazolnom (három módszerrel próbáltam igazolni).

A kompozithuzalok tartós idejű hőkezelését azért végeztem, hogy megmutassam, hogyan változnak a mechanikai és az elektromos tulajdonságai a huzaloknak a hőkezelés hatására, ami a kompozithuzalok nagyfeszültségű sodronykábelek megerősítéseként történő felhasználása szempontjából fontos. A hőkezeléseket 200-500°C között 0-1000 órán át végeztem, majd szobahőmérsékleten vizsgáltam minden egyes paraméterpárhoz tartozó 6-6 minta termoelektromos erejét, fajlagos ellenállását, ütőmunkáját és hajlítószilárdságát. A termoelektromos erő mérésekor sikerült meghatározni a hőmérséklet – idő -termoelektromos erő kapcsolatát, azonban a kapott eredmények a várakozásaimtól eltérően nem mutattak szigorúan monoton változás, ugyanis a termoelektromos erő kezdetben csökken a hőmérséklet növelésével, majd nő. Így a mérési eredményeim nem alkalmasak arra, hogy csupán a termoelektromos erő mérése alapján lehessen következtetéseket levonni a mechanikai tulajdonságokra vonatkozóan. Kísérleti eredményeim alapján megállapítottam, hogy a hőkezelési idő hatása elhanyagolható a hőmérséklet hatásához képest. A kompozithuzalok termoelektromos erejét gyakorlatilag a hőkezelési hőmérséklet határozza meg.

A villamos ellenállás mérésekor az eredmények azt mutatták, hogy a kompozithuzalok fajlagos ellenállása a hőmérséklet és a hőkezelési idő függvényében egyaránt állandó. Ez azt bizonyítja, hogy a kompozithuzalok ellenállása nem változik hő hatására, amely kedvező a nagyfeszültségű kábelek megerősí-

téseként történő felhasználás szempontjából. A kompozithuzalokon mért fajlagos ellenállást összevettem egy a szakirodalomban megtalálható modellel, amely kifejeztem nemvezető erősítőanyaggal rendelkező fémmátrixú kompozitokra lett kidolgozva. A modell az alumínium fajlagos ellenállásából ( $0,00271 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) kiindulva a kompozithuzal fajlagos ellenállását  $0,0065 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ -re becsli, amely érték jól közelíti az általam kísérletileg meghatározott  $0,0070 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  értéket. Az eltérésért felelős lehet a maradék porozitás és a mátrix szennyező tartalma.

A hőkezelt kompozithuzalok hajlítóvizsgálata megmutatta, hogy, míg a hőkezelési idő nincs számottevő befolyással a hajlítószilárdságra, addig a hőkezelés hőmérséklete meghatározó. Az eredményekből azt a következtetést vontam le, hogy a kompozithuzalok hajlítószilárdsága  $400^\circ\text{C}$  alatti tartományban közel azonos, míg  $500^\circ\text{C}$ -on egy ugrásszerű romlás figyelhető meg a hajlítószilárdság értékeiben. Ez a szilárdságsökkenés akár az 50%-ot is elérheti. Az ütvizsgálat eredményei a hajlítóvizsgálati adatokkal és megállapításokkal teljes összhangot mutattak. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kompozithuzal statikus és dinamikus mechanikai tulajdonságai  $400^\circ\text{C}$ -nál még nem jelentősen, de  $500^\circ\text{C}$ -nál már rohamosan romlanak. Továbbá elmondható, hogy a 100 órás hőkezelési idő felett az idő hatása a mért értékekre gyakorlatilag elhanyagolható, azonban a hőkezelési hőmérséklet hatása meghatározó.

Kettős kompozitokkal kapcsolatos kísérleteimben előállítottam négyzet és „I” keresztmetszetű próbatesteket, amelyeket később hajlítóvizsgálatnak vettem alá. Mindkét próbatest típus esetében a másodlagos mátrix anyaga AlSi12, míg az erősítő kompozithuzal négyzetes próbatestnél 1,6 mm, míg az I-tartónál 1,0 mm átmérőjű Nextel™ 440/Al 99,5 kompozithuzal volt. A gravitációs öntéssel készített négyzet keresztmetszetű próbatestekben változtattam az erősítőanyag, azaz a kompozithuzal mennyiségét, és vizsgáltam a szilárdságban bekövetkező változásokat. Az eredmények azt mutatták, hogy a kompozithuzalok mennyisége jó közelítéssel lineáris kapcsolatban áll a kettős kompozit hajlítószilárdságával.

Az „I” tartó próbatestek csak a szélső szálakban tartalmaztak erősítő kompozithuzalt (oldalanként 9-9 darabot). Ebben a kísérletben változtattam a 9 darab kompozithuzal helyzetét, így készült  $2 \times 1$  rétegben és  $2 \times 2$  rétegben erősített kettős kompozit I-tartó. A gáznyomásos infiltrációval készített I-tartók hajlítóvizsgálatából kiderült, hogy a várákosoknak megfelelően nem befolyá-

solta az elrendezés a hajlítószilárdságot (a 2×2 réteg esetén törekedtem a 2×1 rétegű esettel közel azonos inerciájú elrendezésre). A kontrollként előállított, erősítetlen próbatesthez képest az erősített változatok átlagosan 118%-kal nagyobb hajlítószilárdságot mutattak. Ebből világosan látszik, hogy a kompozithuzalok és a másodlagos mátrix közötti kapcsolat jó és érdemben jelentkezik a szilárdságnövelő hatás. Ezt a tényt a keresztmetszeti csiszolatokról készített optikai mikroszkópos felvételek is alátámasztják, ugyanis nem volt látható a felvételen a kompozithuzal mátrixának és a másodlagos mátrix határfelülete. Ezek alapján megállapítottam, hogy a kompozithuzal alkalmazása erősítőanyagként kettős kompozitokban más módon el nem érhető előnyöket biztosít: könnyen elhelyezhető a bonyolult profilokba is, gyártás során nem mozdul el és a másodlagos mátrixanyaggal jó kötést képes kialakítani, ugyanakkor a szálak közötti infiltráció már biztosított, így a kisebb nyomás is elegendő a szálak, illetve huzalok közötti tér kitöltéséhez.

## Új tudományos eredmények

---

### 1. tézis [1,2]

Mérésekkel igazoltam, hogy a Nextel™ 440/Al kompozithuzalok folyamatos infiltrációjához szükséges küszöbnyomás intervalluma 0,62-0,83 MPa. A küszöbnyomás értéke felett az alumínium térfogathányada és az infiltrációs nyomás közötti kapcsolat a gyakorlat számára elfogadható mértékben lineáris, 1,0 mm átmérőjű kompozithuzaloknál 0,83 MPa-1,63 MPa közötti, míg 2,0 mm átmérőjű kompozithuzalok esetén 0,83 MPa-2,07 MPa közötti nyomástartományra vonatkoztatva.

### 2. tézis [1,2]

A küszöbnyomás 0,62-0,83 MPa-os intervallumát összevettem két elméleti modellel, a következő paraméterek mellett: a szálak átmérője  $11,35 \pm 3,15 \mu\text{m}$ , a szálak térfogathányada  $51,7 \pm 8\%$ , az olvadék felületi feszültsége  $0,87 \pm 0,03 \text{ J/m}^2$ , az olvadék peremszöge a szálakon  $135 \pm 5^\circ$ . A White és Mortensen modell 0,12-0,50 MPa-t, míg a Kaptay modell 0,20-0,77 MPa-t ad eredményül. Ez utóbbi átlapolódik a kísérleti eredményeimmel, míg az első nem, tehát kísérleti eredményeim matematikai közelítésére a Kaptay modell alkalmas.

### 3. tézis [1,2]

Megállapítottam, hogy a Nextel™ 440/Al kompozithuzalok szakítószilárdság-infiltrációs nyomás (mátrixhányad) függvény maximummal rendelkező görbét ad eredményül a vizsgált tartományban. A legnagyobb szakítószilárdság 1,0 mm átmérőjű kompozithuzal esetén 1,03 MPa, míg 2,0 mm átmérőjű kompozithuzalnál 1,86 MPa infiltrációs nyomás mellett adódik.

### 4. tézis [3,4]

Bebizonyítottam, hogy a kompozithuzalok statikus és dinamikus terhelhetősége 500°C és e feletti hőmérsékleten végzett hőntartást követően jelentősen csökken már 100 óra elteltével is, 1000 óra alatt akár 50%-os csökkenés is bekövetkezhet.

### **5. tézis [3,4]**

Mérési eredményekkel igazoltam, hogy a Nextel™ 440/Al kompozithuzalok fajlagos elektromos ellenállása 500°C-os és 1000 órán át tartó hőkezelést követően is állandó. Az átlagosan 55 térfogatszázalékban kerámia-szálat tartalmazó, 1,6 MPa infiltrációs nyomás mellett készült 1,6 mm átmérőjű kompozithuzalok fajlagos ellenállása  $0,007 \pm 0,0006 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ .

### **6. tézis [5-10]**

Kísérleti eredményekkel alátámasztottam, hogy a Nextel™ 440/Al kompozithuzallal erősített AlSi12 mátrixú kettős kompozitok előállítására a gravitációs és a gáznomásos infiltráció egyaránt alkalmas. A gravitációs öntéssel készített kettőskompozitok hajlítószilárdsága 3,6 térfogatszázalék kompozithuzal-erősítés mellett 30%-os növekedést ért el, míg a gáznomásos infiltráció esetében 5,9 térfogatszázalék kompozithuzal-erősítés 17,9% hajlítószilárdság-növekedést eredményezett.

## Az eredmények hasznosítása

---

A kompozithuzal potenciális alkalmazási területeiként korábban megjelölt iparágak a XXI. században szükségét érzik a folyamatos fejlesztéseknek a költséghatékonyabb működésük és a piaci versenybeli előnyük érdekében. A kompozithuzalok az értekezésben taglalt minőségben és méretekben már most rendelkezésre állnak a fejlesztésekhez.

Az általam közzétett eredmények alapján a kompozithuzalok gyártásakor a várható tulajdonságok és gyártási paraméterek jól becsülhetők.

A kompozithuzalok használatának hőmérséklet-tartományára is ajánlást fogalmaztam meg értekezésemben, miszerint a Nextel™ 440 erősítésű, alumíniummátrixú kompozithuzalok 400°C alatt használhatóak jelentős tulajdonságváltozás (pl. szilárdságcsökkenés) nélkül.

Több gyártási technológiával is készítettem kettős kompozitot, amely kísérletsorozatokból kiderült, hogy a kompozithuzal mátrixánál kisebb olvadáspontú ötvözetek megerősítésére kiválóan alkalmas a kompozithuzal. Az eredmények világosan megmutatják, hogy bonyolultabb szerkezetű öntvényekben is megoldható a huzalok pozícionálása. A kompozithuzal mind a szilárdságra, mind pedig a merevségre kedvező hatást gyakorol.

## A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

---

- [1] **Kientzl I**, Nemeth A, Dobranszky J: Influence of the infiltration pressure on the properties of MMC wires. *Periodica polytechnica, Mechanical Engineering* 52/1 (2008) 15–18.
- [2] **Kientzl I**, Dobranszky J, Nemeth A: Effect of the infiltration pressure on the properties of composite wires. (OATK7) *Materials Science Forum* xxx-xxx, (2010) xxx-xxx, benyújtva.
- [3] **Kientzl I**, Dobranszky J: Kompozithuzalok tulajdonságainak változása tartós idejű hőkezelés hatására. Tóth T (szerk.): *Előadások, XXII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás, Balatonfüred, 2006. október 4-6. GTE Hőkezelő Szakosztály*, 115-117.
- [4] **Kientzl I**, Dobranszky J, Ginsztler J: Heat treatment and impact testing of composite wires. *Key Engineering Materials Vols. 345-346* (2007) pp.



1273-1276.

- [5] **Kientzl I**, Dobránszky J: Production and Examination of Double Composites. *Materials Science Forum*, 537-538, (2007) 191-197.
- [6] **Kientzl I**, Orbulov I, Dobranszky J, Nemeth A: Mechanical behaviour Al-matrix composite wires in double composite structures. *Advances in Science and Technology*, 50 (2006) 147-152.
- [7] **Kientzl I**, Orbulov I, Dobranszky J, Nemeth A: The processing and testing of aluminium matrix composite wires, double composites and composite blocks. *ECCM12, 12th European Conference on Composite Materials*. Biarritz, 29th August – 1st September 2006, (CD-ROM) docs\192.pdf.
- [8] **Kientzl I**, Orbulov I: Fémmátrixú kompozithuzalok, dupla kompozitok és kompozit tömbök tulajdonságai. *Anyagok Világa VII. évfolyam 1. szám*, 2007. Június  
[http://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2007/jun/5\\_HUN\\_Anyagok\\_vilaga\\_Kientzl\\_Orbulov\\_Dobranszky\\_Nemeth\\_final-1.pdf](http://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2007/jun/5_HUN_Anyagok_vilaga_Kientzl_Orbulov_Dobranszky_Nemeth_final-1.pdf).
- [9] **Kientzl I**, Dobranszky J: Production and behaviour of aluminium matrix double composite structures. *Materials Science Forum Vol. 589* (2008) pp 105-110.
- [10] **Kientzl I**, Dobranszky J: Methods of double composite fabrication. *Gépészet 2008, Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering*.

## **További tudományos publikációk**

---

- [11] **Kientzl I**: Fémmátrixú kompozitok hegesztése. *Hegesztésetechnika*, 27 (2006:2) 5-8.
- [12] **Kientzl I**, Dobránszky J, Ginsztler J: Effect of Production Parameters on the Properties of Composite Wires. In: Papp É, Mácsay I, Holubetz L (szerk.) *Gépészet 2006 Proceedings of Fifth Conference on Mechanical Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, National Technical Information Centre and Library, Budapest, 2006, [http://152.66.34.17:4001/pdf/kientzl\\_dobranszky\\_effectproduction.pdf](http://152.66.34.17:4001/pdf/kientzl_dobranszky_effectproduction.pdf); CDROM (ISBN 963 593 456 3)

- [13] Orbulov I, **Kientzl I**, Nemeth A: Fémhabok és kompozitok előállítása infiltrációs eljárással. BKL Kohászat 140. évfolyam (2007/5).
- [14] **Kientzl I**, Dobranszky J, Blucher J, Nemeth A, Orbulov I: Mechanical properties of composite wires and double composites. ESMC 2006. 6th European Solid Mechanics Conference. Budapest, 28 August–1 September 2006.
- [15] **Kientzl I**, Dobranszky J, Blucher JT: Failure of metal matrix composite wires and double composites. Proceedings of the Second International Conference on Engineering Failure Analysis. September 12-15, 2006 Toronto, Canada. P2.18.