

SZÉN-ALAPÚ VEZETŐKÉPES SZERKEZETI KOMPOZITOK GYÁRTÁSA ÉS TULAJDONSÁGAINAK ELEMZÉSE

MANUFACTURING OF CARBON-BASED CONDUCTIVE STRUCTURAL COMPOSITES AND ANALYSING THEIR PROPERTIES

*Csvila Péter¹, PhD hallgató, csvilap@pt.bme.hu
Czigány Tibor^{1,2}, egyetemi tanár, czigany@eik.bme.hu*

¹*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék*

²*HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport*

ABSTRACT

This paper introduces nanoparticles, which can be used for advanced composite materials. We introduce their role and their engineering applications, and describes the properties of commercially easily available carbon-based nanoparticles and a widely used production method of composites reinforced with these particles, vacuum assisted resin infusion molding. We also investigate the effects of carbon nanotubes, graphite and carbon black on the conductivity of carbon fiber–reinforced structural composites.

1. BEVEZETÉS

A műszaki életben kompozitnak nevezzük az olyan anyagokat, amelyek nagy szilárdságú erősítőanyagból és egy azt befoglaló nagy szívósságú mátrix anyagból állnak, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van. Az ilyen rendszerekben az erősítőanyagok jellemzően szálas anyagokból állnak (például üvegszál, szénszál), amelyekből előállított kompozit elemekre jellemző, hogy azok anizotrop, azaz irányfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezt az irányfüggést elsősorban mechanikai tervezésnél alkalmazzák tudatosan, amely által kisebb tömegű és térfogatú alkatrészeket tudnak létrehozni. Azonban a kompozitok anizotrop viselkedése megjelenhet más fizikai tulajdonságokban is, mint például kitüntetett irányokban jobb hő-, vagy elektromosáram vezetés [1, 2].

A kompozitparban szálformájú erősítés mellett egyre inkább megjelennek a nanorészecskék is. Nanorészecskékről akkor beszélhetünk, ha egy adott részecske legalább egyik dimenziója a nanométeres nagyságrendbe esik. Polimertechnikában ilyen részecskéket előszeretettel alkalmaznak valamilyen fizikai tulajdonság elérésének, javításának érdekében. Ilyen például a gumiabroncsok gyártása során

alkalmazott korom. Korom alkalmazása esetén a szén-alapú részecskéket elasztomerekhez adagolva jobb mechanikai tulajdonságot és kopásállóságot lehet elérni, továbbá még a kialakított rendszer is stabilabb lesz. De előszeretettel alkalmaznak napjainkban nanorészecskéket égésgátlásra is, amely által biztonságosabb polimer termékeket tudnak előállítani [3].

Nanorészecskéket a szálerősítésű kompozitokban is előszeretettel alkalmaznak egy-egy tulajdonság javításának érdekében. Az ilyen anyagokat hibrid kompozitoknak nevezzük, ugyanis az erősítő anyag mellett a nanorészecskék által így egy másik szilárd fázis is megjelenik, amely további előnyös tulajdonságokat biztosít a kompozit termék számára. A kompozitoknál az egyik leggyakrabban alkalmazott erősítőanyag a szénszál, köszönhetően kedvező mechanikai tulajdonságainak, mint például a nagy szilárdság és rugalmassági modulus. A szén alapvetően igen jó hő- és elektromosáram-vezető képességekkel rendelkezik, azonban így is nagyságrendekkel elmarad a különféle fémek vezetőképességeitől, mint például a réz vagy az alumínium. A kompozitokban alkalmazva a szénszálak vezetőképességét korlátozza a mátrix anyag szigetelő hatása is [1, 2, 4].

Az elektromosáram-vezetőképesség szénszálak kompozitokban növelhető nanorészecskék tudatos alkalmazásával. Ilyen nanorészecskék lehetnek a különféle szén-alapú részecskék, mint például a szén nanocsövek, grafén, vagy a különféle fém-oxid alapú részecskék is, mint például a titán-dioxid (TiO₂), vagy a mangán-dioxid (MnO₂). Már kis tömegszázalékú adalékolás esetén is beszélhetünk jelentős vezetőképesség növekedésről. Ezenfelül megfigyelhető egy úgynevezett perkolációs jelenség is, amely során kompozitban alkalmazott vezetőképességet növelő nanorészecskék esetén

egy bizonyos tömegszázalék alkalmazásakor ugrásszerű javulás tapasztalható a vezetőképesség terén. Nanokompozitoknál igen nagy problémát jelent a nanorészecskék egyenletes eloszlása, ugyanis a nanorészecskék nagy fajlagos felületüknek köszönhetően igen hajlamosak aggregálódni, amely által nem tervezett inhomogenitások alakulnak ki az anyagban. Erre megoldást nyújthat a megfelelő elkeverés, illetve a nagy nyírósebességgel való gyártás [5, 6].

A vezetőképes kompozitokat alkalmazhatjuk többek között az űrparban, a járműiparban és a különféle szenzorokban is. A vezetőképes szerkezeti kompozitok kedvező tulajdonsága, hogy multifunkcionalitásuknak köszönhetően a mechanikai terhelések elviselése mellett még legalább egy feladatot, a hő-, és/vagy elektromosáram vezetést ellátják egy anyagban. Ez által további tömeg, illetve térfogatcsökkentést elérve a különféle szerkezeteknél [5, 7].

Jelen munka célja olyan hibrid nanokompozit előállítás, amely a vezetőképessége mellett jó mechanikai tulajdonságokkal is rendelkezik és így alkalmazható szerkezeti elemként.

2. SZÉN-ALAPÚ VEZETŐKÉPES NANOKOMPOZITOK ÉS ELŐÁLLÍTÁSUK

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek polimer-és kompozitparban gyakran előforduló szén-alapú anyagok. Továbbá ismertetjük az általunk gyártott szén-alapú nanorészecskékkel ellátott kompozitokat.

2.1. Műanyag- és kompozitparban alkalmazott szén-alapú anyagok

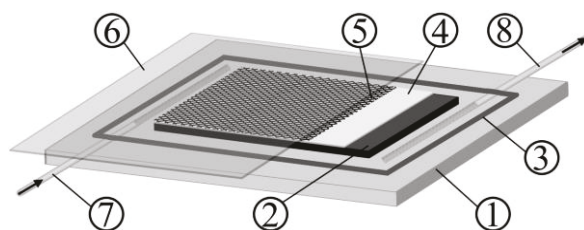
A vezetőképesség (G) mértékegysége az [S/m], amely dimenzió a fajlagos ellenállás reciproka és megadja az anyagok vezetőképességét, amely által leírható, hogy milyen mértékben tudnak egyes anyagok elektromosáramot továbbítani. A legjobban vezető szén-alapú anyag a grafén, amely egy egysíkból álló, csak szén atomot tartalmazó nanorészecske, vezetőképessége akár a 10^8 [S/m] nagyságrendet is elérheti. Még igen jó vezetőképességgel rendelkeznek a szén nanocsövek, amelyek típusuktól függően akár a 10^6 - 10^7 [S/m] értéket is elérhetik. A grafit szintén jó vezetőképességekkel rendelkező anyag, vezetőképessége akár a 10^5 - 10^6 [S/m] nagyságrendbe is eshet. A kompozitparban használt szénszálak vezetőképessége általában 10^4 [S/m] nagyságrendben esik, amelynek oka a rendezetlenebb szerkezet és a bennük található hibahelyek, azonban ez az érték nagyban függ a szénszálak gyártási tulajdonságaitól. A korom egy amorf, szénatomokból felépülő anyag, amely rendezetlensége miatt 10^1 - 10^4 [S/m] vezetőképességgel rendelkezik [8, 9, 10].

Vezetőképes kompozitok fejlesztése során a minél nagyobb fajlagos felületek elérésére a cél, amely elérésére a nanorészecskék megoldást kínálnak. Továbbá megfelelő mennyiségű nanorészecskék alkalmazásával képesek vagyunk egy összefüggő rendszert kialakítani a kompozitok mátrix anyagában, amellyel tovább növelhető a kompozit vezetőképessége [8, 9].

Ilyen szerkezeti kompozitokat előnyösen alkalmazhatunk például az űr-, vagy repülőgépiparban. Jelenleg a repülőgépek külső burkolatai, szárnyai a kompozitok kedvező fajlagos mechanikai tulajdonságai miatt főként polimer kompozitból készülnek. Azonban mivel a polimerek nem jó elektromosáram vezetők, ezért villámcsapás esetén lokálisan rongálódni tudnak a szerkezeti elemek. Erre például megfelelő megoldás lenne, ha a repülőgép külső kompozit elemei elektromos töltések vezetésére alkalmasak lennének, amely által a villámcsapás által keletkező kár csökkenthető lenne [11].

2.2. Próbatetek anyagai és gyártása

Munkánkban a kompozitparban elterjedt vákuum infúziós eljárást alkalmaztuk, annak jó reprodukálhatósága miatt. A gyártás elrendezését az 1. ábra szemlélteti. A szerszámra szárazon egymással párhuzamosan, egyirányban erősített 6 réteg Zoltek™ PX35 UD300 szövetet (UD) helyeztünk, amely 300 g/m^2 -es területi sűrűséggel rendelkezett. Ezután felépítettük a vákuum megtartására szolgáló rendszert. A kompozit próbateteket felépítő mátrix anyag Epikote resin MGS RIMR426 epoxigyanta és hozzá 100:26 tömegarányban kevert Epikure curing agent MGS RIMH433 térhálósító volt.



1. ábra. Kompozitok gyártására alkalmazott vákuum infúziós eljárás elrendezése, ahol 1: üveg szerszám, 2: szénszövet, 3: vákuum tömítőszalag, 4: letépzőszövet, 5: gyantavezető háló, 6: PET fólia, 7: gyanta bevezetés, 8: vákuumkivezetés

A vezetőképesség javítását szolgáló, külön-külön epoxi mátrixban elkevert nanorészecskék a következők voltak: többfalú szén nanocső (CNT), grafit és korom. A szén nanocsövek Baytubes C 150 P többfalú szén nanocsövek voltak, amelyek 3-15 falból épültek fel, külső átmérőjük 13-16 nm, belső átmérőjük 4 nm és hosszuk 1-10 μm volt. A felhasznált grafit Synthetic Grafit Cond 8 96 volt,

amely aggregátumok alapszemcsemérete 6,4 μm volt. A felhasznált korom Ketjenblack EC-300J volt, amely 30-50 nm méretű alaprészcsekből épült fel.

A nanorészecskéket tömegszázalékosan (m%) a tiszta epoxigyanta mátrixban (EP) minden gyártás kezdete előtt Bandelin Sonopuls 4200 HD ultrahangos homogenizálóban egyenletesre kevertünk 20 kHz-en, 100 W-os teljesítményen, 3 percen keresztül. A homogenizálás során a nanorészecskék egyenletesen eloszlottak, valamint az aggregátumok felbomlottak apróbb részecskékre. Majd az így kapott gyantához hozzáadtuk a térhálósító komponenst és bejuttattuk a rétegek közé, illetve öntőformában kiöntöttük azokat.

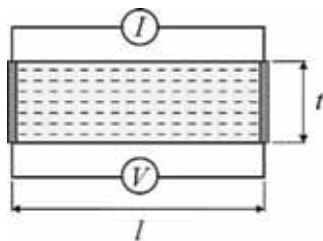
Az így kapott termékből 250x150 mm-es szénszálás kompozit próbatesteket gyártottunk, amelyek 2 mm-es vastagsággal rendelkeztek. Továbbá a vezetőképesség vizsgálatához nanorészecskéket tartalmazó 200x200x3 mm-es epoxigyanta próbatesteket is öntöttünk.

3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a vizsgálati módszerek és eredmények.

3.1. Vezetőképesség vizsgálat

A vezetőképesség vizsgálatokat Agilent 34970A adatgyűjtő műszeren végeztük, ahol az ellenállást, azaz a vezetőképesség reciprokát mértük négyponos ellenállásméréssel, majd a próbatestek hosszának és keresztmetszetének függvényében elemeztük azok fajlagos ellenállását (ρ) (2. ábra).



2. ábra. A vizsgálatok során alkalmazott elrendezés, ahol t a próbatest vastagsága, l pedig a próbatest hossza

A vizsgálatokat 200x200x3 mm-es epoxigyanta és 250x25x2 mm-es befoglaló méretekkel rendelkező szénszálás próbatesteken végeztük szobahőmérsékleten. A vizsgálatunk során kapott eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

Az eredményeink alapján elmondható, hogy epoxigyanta esetén a nanorészecskék minden esetben csökkentették a fajlagos ellenállását az anyagnak. Továbbá, hogy a legkisebb fajlagos ellenállásokat szén nanocsövek által sikerült elérnünk.

1. táblázat. Az ellenállásmérések során mért fajlagos ellenállások értékei

Próbatest neve	ρ [Ωm]
EP	$1,7 \cdot 10^{+4} \pm 9,6 \cdot 10^{+1}$
EP + 1m% CNT	$3,3 \cdot 10^{+1} \pm 7,3 \cdot 10^0$
EP + 2m% CNT	$3,0 \cdot 10^{-2} \pm 4,7 \cdot 10^{-3}$
EP + 1m% grafit	$3,8 \cdot 10^{+3} \pm 1,1 \cdot 10^{+2}$
EP + 2m% grafit	$3,4 \cdot 10^{+3} \pm 3,3 \cdot 10^{+2}$
EP + 1m% korom	$2,4 \cdot 10^{+3} \pm 6,5 \cdot 10^{+2}$
EP + 2m% korom	$4,2 \cdot 10^{+1} \pm 2,8 \cdot 10^{+1}$
UD + EP	$1,1 \cdot 10^{-4} \pm 4,8 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 1m% CNT	$6,6 \cdot 10^{-5} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 2m% CNT	$4,4 \cdot 10^{-5} \pm 8,7 \cdot 10^{-6}$
UD + EP + 1m% grafit	$9,9 \cdot 10^{-5} \pm 1,2 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 2m% grafit	$9,0 \cdot 10^{-5} \pm 8,2 \cdot 10^{-6}$
UD + EP + 1m% korom	$1,1 \cdot 10^{-4} \pm 7,6 \cdot 10^{-7}$
UD + EP + 2m% korom	$9,0 \cdot 10^{-5} \pm 3,0 \cdot 10^{-7}$

Megfigyelhető még, hogy a tiszta epoxigyantához képest a szénszálás kompozitok esetén jelentősen csökkent az anyag fajlagos ellenállása, ugyanis a szénszálak egy összefüggő kapcsolatot tudtak adni az anyagnak. Összességében azt tapasztaltuk, hogy mind az epoxigyanta, mind a szénszálás kompozit esetén a szén nanocsövek tudták a legnagyobb javulásokat mutatni.

3.2. Mechanikai vizsgálatok

A húzóvizsgálatokhoz MSZ EN ISO 527-5:2022-es szabványt alkalmaztuk. Az anyagok szakítószilárdságát (σ), illetve modulusát (E) elemeztük. Az epoxigyanta próbatestek névleges befoglaló méretei 200x25x3 mm, míg a kompozit próbatestek méretei 250x25x2 mm voltak. A vizsgálatokat epoxigyantából készült próbatestek esetén Zwick Z020, kompozit próbatestek esetén pedig Zwick Z250-es szakítógépen végeztük szobahőmérsékleten. A mérés eredményeit az 2. táblázat foglalja össze.

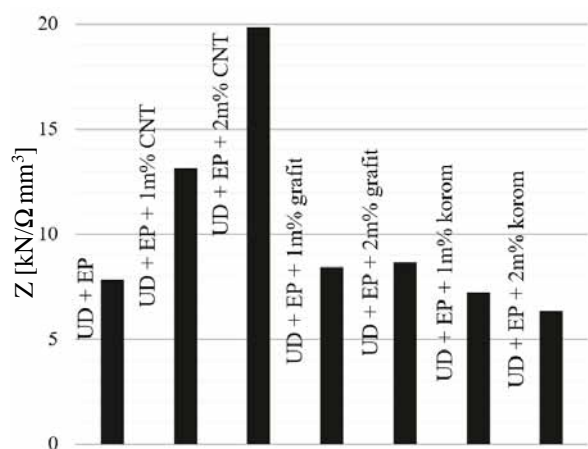
2. táblázat. A mechanikai vizsgálatok során mért szakítószilárdság és modulus értékek

Próbatest neve	σ [MPa]	E [GPa]
EP	$58,9 \pm 6,4$	$2,4 \pm 0,2$
EP + 1m% CNT	$42,1 \pm 3,3$	$5,2 \pm 0,4$
EP + 2m% CNT	$39,6 \pm 7,1$	$3,7 \pm 0,4$
EP + 1m% grafit	$42,6 \pm 17,3$	$2,6 \pm 0,4$
EP + 2m% grafit	$38,9 \pm 5,9$	$3,6 \pm 0,8$
EP + 1m% korom	$36,0 \pm 2,3$	$2,7 \pm 0,1$
EP + 2m% korom	$18,1 \pm 5,8$	$4,1 \pm 0,6$
UD + EP	$849,0 \pm 38,2$	$17,8 \pm 1,4$
UD + EP + 1m% CNT	$859,4 \pm 25,8$	$16,4 \pm 0,8$
UD + EP + 2m% CNT	$873,6 \pm 41,0$	$18,6 \pm 1,2$
UD + EP + 1m% grafit	$838,0 \pm 68,6$	$16,5 \pm 1,4$
UD + EP + 2m% grafit	$783,7 \pm 18,2$	$14,9 \pm 2,1$
UD + EP + 1m% korom	$786,0 \pm 17,2$	$14,4 \pm 1,7$
UD + EP + 2m% korom	$576,0 \pm 70,7$	$11,8 \pm 0,4$

A szakítóvizsgálatok alapján elmondható, hogy az epoxigyantából készült próbatetek esetén mindhárom részecske csökkentette a szakítószilárdságot. Ez annak volt köszönhető, hogy a nanorészecskék képesek az aggregálódásra és a létrejövő aggregátumok hibahelyként voltak jelen az anyagban, így csökkentve annak szakítószilárdságát. Azonban a bekevert részecskék minden esetben javítani tudták az alapanyag modulusát.

Kompozit próbatetek eredményeiből látszik, hogy az alap szénszál-as epoxigyanta szakítószilárdsághoz képest javulást egyedül szén nanocsövek alkalmazásával lehetett elérni. Korom és grafit esetén csökkenés volt megfigyelhető. Ez annak köszönhető, hogy a szén nanocsövek szál-as anyagként tudtak együtt dolgozni a szénszálakkal, minimális erősítést adva az alapkompozitnak. A grafit és korom részecskék pedig nem kifejezetten erősítő anyagokként működnek, hanem inkább elektromos vezetőképesség javítására szolgálnak. Továbbá rendkívül hajlamosak az aggregálódásra, amely által hibahelyeket hoznak létre a mátrix anyagban, így csökkentve az epoxigyanta és a szénszálak közötti adhéziós kapcsolatot.

Ha megfelelő vezetőképesség szerkezeti kompozitot szeretnénk gyártani, ismernünk kell, hogy az anyag a vezetőképességéhez képest milyen mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. Így a 3.1. és a 3.2. alfejezetben kapott eredmények által értékeltük a kompozit próbatesteinkre, hogy milyen összefüggésben áll a vezetőképességükhöz képesti szilárdságuk. Így meghatároztuk a próbatetek fajlagos ellenállására fajlagosított szakítószilárdság értékeit (Z), mértékegysége $[kN/\Omega mm^3]$, amely eredményeket a 3. ábra szemlélteti.

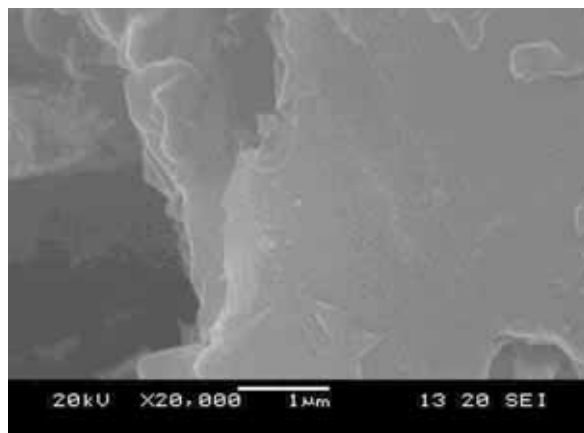


3. ábra. Fajlagos ellenállásra fajlagosított szakítószilárdság értékek

Az alap szénszál és epoxigyanta $7,8 kN/mm^3$ fajlagos szakítószilárdsággal rendelkezett. Az eredmények alapján elmondható, hogy a legjobb vezetőképesség és szakítószilárdság értékeket a szén nanocsövek alkalmazásával lehetett elérni. 1m%-os szén nanocső tartalom esetén $13,1 kN/mm^3$, 2m%-os szén nanocső tartalom esetén pedig $19,7 kN/mm^3$ fajlagos szakítószilárdságra nőtt az érték. Grafit esetén minimális növekedés (1m% grafit tartalomnál $8,4 kN/mm^3$, 2m% grafit tartalomnál $8,7 kN/mm^3$), korom esetén pedig minimális csökkenés volt megfigyelhető (1m% korom tartalomnál $7,2 kN/mm^3$, 2m% korom tartalomnál $6,4 kN/mm^3$). Ez annak köszönhető, hogy ugyan növelte a grafit és a korom az epoxigyanta vezetőképességét, szénszálak közé juttatva azonban csökkentette a szénszálak és az epoxigyanta terhelésmegosztó kapcsolatát a jelenlévő aggregátumok miatt.

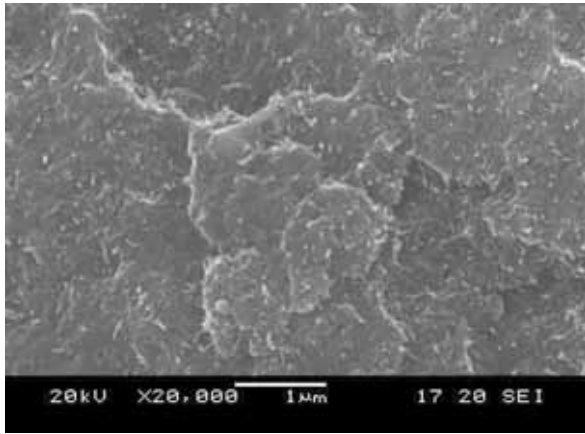
3.3. Próbatelemek pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

A részecskék eloszlottságát az epoxigyantában, illetve a szénszálak és epoxi kapcsolatát JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. Vizsgálataink során először megnéztük az alap epoxigyanta töretfelületét, amelyen megfigyelhető a rideg töréskép (4. ábra).



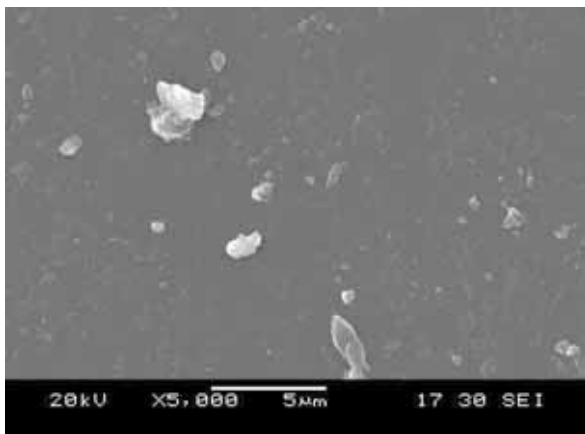
4. ábra. Tiszta epoxigyanta töretfelülete 20 000-szeres nagyításban

A következőkben megvizsgáltuk a szén nanocsövekkel adalékolt epoxigyantát (5. ábra). Az elektronmikroszkópos vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a nanorészecskék egyenesen eloszlottak. Ugyanakkor tapasztalható volt néhány esetben aggregálódás, amely az anyag szakítószilárdság csökkenését okozta.



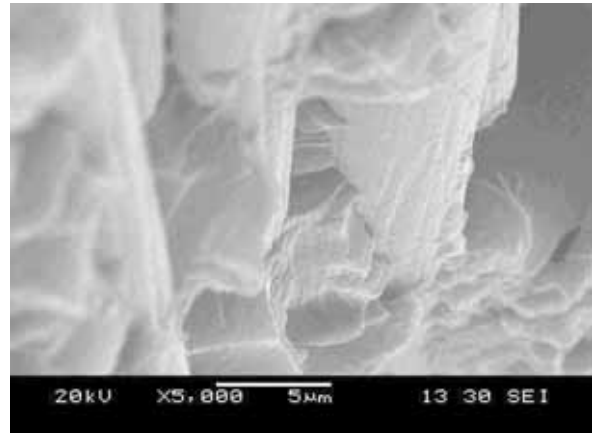
5.ábra. 2m% tartalmú szén nanocső eloszlottsága az epoxi mátrixban 20 000-szeres nagyításban

Grafit és korom esetén célunk volt nagyobb részecskék, azaz aggregátumok keresése, amellyel magyarázható a jelentős szakítószilárdság csökkenés mind epoxigyanta, mind kompozit próbatetek esetén. A 6.ábra egy ilyen eloszlottságot mutat be, ahol megfigyelhetőek nagyobb részecskék, azaz aggregátum.



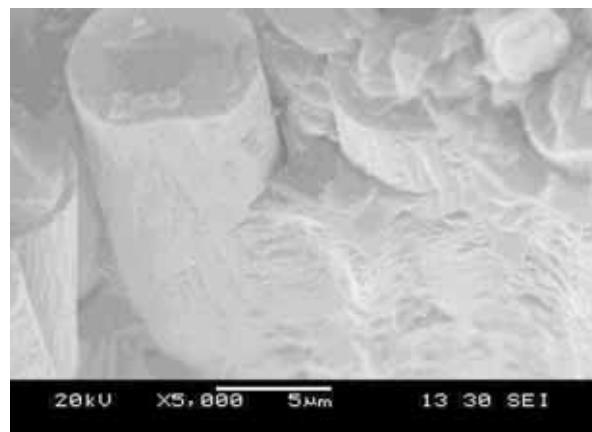
6.ábra. 2 m% korom eloszlottsága az epoxi mátrixban 5 000-szeres nagyításban

Megvizsgáltuk pásztázó elektronmikroszkóppal a kompozitok töretfelületét is. Először itt is a referenciaként szolgáló, részecske-mentes szénszál és epoxigyantát vizsgáltuk (7.ábra). Itt azt tapasztaltuk, hogy a mátrix-erősítőanyag kapcsolat jónak volt mondható, ugyanis a töretfelületen látszódnó szálakon maradtak epoxigyanta foltok, amely által a terheléseket megfelelően át tudták adni egymásnak a szálak.



7.ábra. Szénszál és az epoxigyanta csatlakozása a kompozitban 5 000-szeres nagyításban

Az alap kompozit próbatetekhez képest szén nanocsőekkel ellátott próbatetek esetén nem találtunk jelentősen eltérő epoxigyanta-szénszál kapcsolatot. Azonban grafit és korom esetén megfigyelhető volt, hogy az epoxigyanta és szénszál közötti kapcsolat gyakran nem volt megfelelő, ugyanis azok a törés során elváltak. Egy ilyen kapcsolatot láthatunk a 8.ábrán is, ahol megfigyelhető, hogy a szénszál és az epoxigyanta között a törés során megszűnt a kapcsolat, így a szénszál könnyedén elvált az epoxigyantától. Ez a jelenség magyarázatot ad a grafittal és korommal adalékolt kompozitok esetén a szakítószilárdság és modulus értékek csökkenésére, ugyanis így nem tudott létrejönni a megfelelő szénszál-epoxigyanta kapcsolat, amely el tudta volna osztani a terheléseket a vizsgálatok során.



8.ábra. Korom hozzáadásával készített szénszálból és epoxigyantából gyártott kompozit 5 000-szeres nagyításban

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során vizsgáltuk a szénszálerősítésű kompozitok vezetőképességét háromféle nanorészecske felhasználásával. Vizsgálataink során a szén nanocső, a grafit és a korom hatását elemeztük a vezetőképesség, illetve a mechanikai tulajdonságok és azok kapcsolatának szempontjából epoxigyantában és szénszálas kompozitokban. Kimutattuk, hogy epoxigyantába, illetve szénszálas kompozitba adagolt szén-alapú nanorészecskékkel javítható az anyag vezetőképessége, azonban a részecskék hatással vannak a mechanikai tulajdonságokra. Kompozit próbatestek esetén szén nanocsövek adalékolásával növelhető a szakítószilárdság, amellyel jobb fajlagos ellenállásra fajlagosított szilárdság értékeket lehet elérni, amely tulajdonság fontos, ha vezetőképes szerkezeti kompozitot szeretnénk előállítani. Grafit és korom esetén azonban elmondható, hogy hiába figyelhető meg a vezetőképesség javulása, az a mechanikai tulajdonságok romlását fogja okozni. Ennek oka, hogy ezen részecskék hajlamosabbak az aggregálódásra, így hibahelyek keletkeznek az anyagban, amely által a fajlagos ellenállásra fajlagosított szakítószilárdság értékeik nem fognak jelentősen különbözni az alap szénszálerősítő epoxigyanta kompozittól.

További megoldásra váró feladat a nanorészecskék aggregálódásának csökkentése és reprodukálhatóbb gyártástechnológia alkalmazása.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk 2022-2.1.1-NL-2022-00012 számú "Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium" projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási és Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Laboratóriumok pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A cikk „A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.”

6. IRODALOM

- [1] Czikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
- [2] Zhao Q., Zhang K., Zhu S., Xu H., Cao D., Zhao L., Zhang R., Yin W.: Review on the electrical resistance/conductivity of carbon fiber reinforced polymer. *Applied Sciences*, 9, 2390 (2019).
- [3] Visakh P. M., Thomas S., Chandra A. K., Mathew A. P.: *Advances in elastomers II: composites and nanocomposites*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2013).
- [4] Lee G., Sung M., Youk J. H., Lee J., Yu W. R.: Improved tensile strength of carbon nanotube-grafted carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, 220, 580–591 (2019).
- [5] Rankin S. M., Moody M. K., Naskar A. K., Bowland C. C.: Enhancing functionalities in carbon fiber composites by titanium dioxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 201, 108491 (2021).
- [6] Seok D., Jeong Y., Han K., Yoon D. Y., Sohn H.: Recent progress of electrochemical energy devices: metal oxide-carbon nanocomposites as materials for next-generation chemical storage for renewable energy. *Sustainability*, 11, 3694 (2019).
- [7] Alarifi I. M.: Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 4863-4893 (2019).
- [8] Meguid S. A., Weng G. J.: *Micromechanics and nanomechanics of composite solids*. Springer, Cham (2018).
- [9] <https://nanografi.com/blog/conductive-materials-and-industrial-applications/> (2023.10.13.)
- [10] Khan J. B., Smith A.C., Tuohy P.M., Gresil M., Soutis C., Lambourne A.: Experimental electrical characterisation of carbon fibre composites for use in future aircraft applications. *IET Science, Measurement & Technology*, 13, 1131–1138 (2019).
- [11] Katunin A, Krukiewicz K., Turczyn R., Sul P., Bilewicz M.: Electrically conductive carbon fibre-reinforced composite for aircraft lightning strike protection. *IOP Conference Series Material Science and Engineering*, 201, 021008 (2017).