

SZAKMAI BESZÁMOLÓ – MAGYAR ÁLLAMI EÖTVÖS ÖSZTÖNDÍJ

1. Általános adatok

Ösztöndíjas neve: *Dr. Lendvai László*

Fogadóintézmény neve és helye: *University of Trento, Trentó, Olaszország*

Fogadó személy neve, beosztása: *Alessandro Pegoretti, full professor, head of department*

Ösztöndíjas időszak: *2023. március 18. – 2023. június 17.*

Ösztöndíjas kutatási téma: *3D nyomtatásra alkalmas hővezető polimerek fejlesztése elektrotechnikai célokra*

2. Kutatási projekt témájának rövid ismertetése

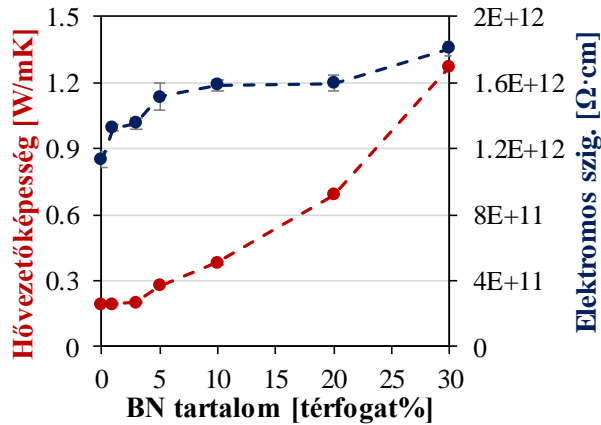
Az elmúlt években jelentős fejlődés volt tapasztalható a kommunikációs és elektronikai technikák területén, köszönhetően az egyre kisebb méretű és egyre energia-intenzívebb termékeknek, alkatrészeknek. Ennek eredményeként az igény is folyamatosan nőtt azoknak az anyagoknak az irányába, amelyek az ilyen eszközök működése során keletkező hőt hatékonyan el tudják vezetni, miközben a megfelelő elektromos szigetelését is biztosítják. A polimereket előszeretettel használták/használgák ezeken a területeken, azonban a viszonylag alacsony hővezetőképességük (0.1-0.4 W/mK) egyre kevésbé teszi alkalmassá őket az említett alkalmazásokhoz. A polimerek tulajdonságainak javítása – beleértve a vezetőképességük módosítását – viszonylag egyszerűen megvalósítható célszerűen kiválasztott adalékanyagok hozzáadásával, a legnagyobb kihívást jellemzően több követelmény együttes teljesítése jelenti. Az ösztöndíj keretében olyan polimer alapú társított anyagok fejlesztésével foglalkoztam, amelyek megfelelő hővezetőképességgel, elektromos szigetelőképeséggel, továbbá kielégítő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, miközben a napjainkban egyre elterjedtebbé vált 3D nyomtatási eljárásokkal is feldolgozhatók.

3. A kutatás során elvégzett feladatok

A kutatás első lépéseként az a felhasználni kívánt alapanyagok kiválasztását végeztem el szakirodalmi adatok, illetve korábbi tapasztalataim alapján. Ennek eredményeként polimer mátrixként a 3D nyomtatás területén elterjedt akrilnitril butadién sztiroil (ABS) alkalmaztam, amelyet különböző mennyiségű hexagonális bór-nitriddel (BN) társítottam a kívánt tulajdonságok elérése céljából. ABS alapanyagként a Trinseo által forgalmazott Magnum 3453 típusú granulátumot szereztem be, amely 15 g/10perc folyásindex értékével megfelelőnek ígérkezett 3D nyomtatási célokra. Adalékanyagként a Henze BMP által forgalomba hozott Hebofill 482 hexagonális bór-nitrid port (szemcseméret < 30 μm) alkalmaztam, amelyet termékminta formájában sikerült megszerezni, így az előzetesen tervezett speciális dologi kiadásaim csökkentek.

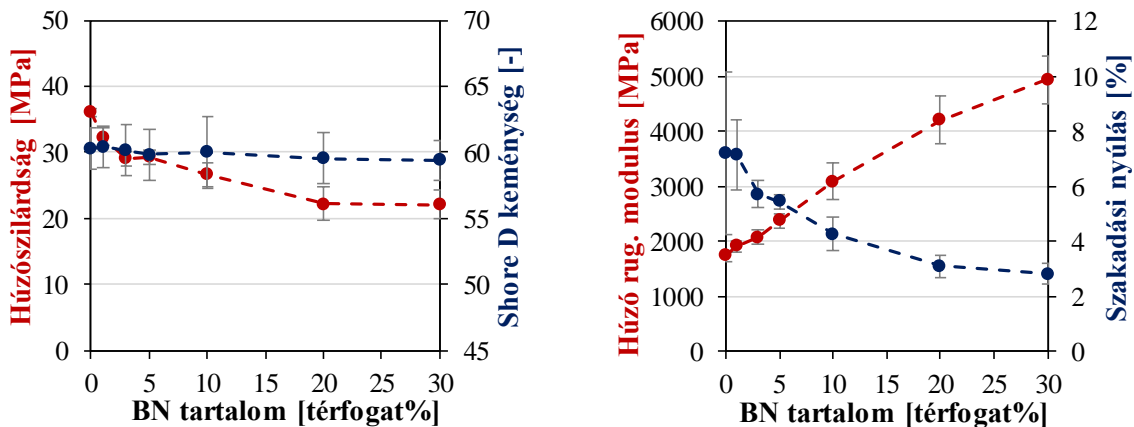
A két összetevőből ömledék keverés útján állítottam elő különböző BN tartalmú (0-30 térfogat%) kompozitokat még a trentói kiutazásomat megelőzően. Az ösztöndíjas időszakom első lépéseként az előzetesen elkészített anyagmintákból sajtolás útján állítottam elő olyan lapokat, amelyekből különböző vizsgálatok elvégzéséhez szükséges próbatesteket tudtam kimunkálni. A minták megvizsgálásának elsődleges célja az volt, hogy megállapítsam, rendelkeznek-e a szükséges tulajdonságokkal, illetve, hogy alkalmazhatóak-e 3D nyomtatási célokra. Előbbit a hővezetőképesség, elektromos szigetelőképeség, termikus stabilitás, sűrűség, keménység és szakítóvizsgálattal mérhető tulajdonságokon keresztül elemeztem, míg utóbbit az anyagminták folyóképességének vizsgálata révén.

Az eredmények alapján kitűnt, hogy a BN hatékonyan képes növelni az ABS hővezetőképességét (1. ábra), a kezdeti 0,19 W/mK értékről 1,27 W/mK-ra sikerült azt növelni 30 térfogat% BN hozzáadásával. Ezzel párhuzamosan az elektromos szigetelőképeség is javult, az ABS kezdeti $1.13 \cdot 10^{12}$ Ωcm értékéről a BN tartalom növekedésével párhuzamosan fokozódott és egészen $1.81 \cdot 10^{12}$ Ωcm értékig nőtt. Kijelenthetővé vált tehát, hogy az eredetileg kitűzött célok; a kiemelkedő hővezető- és elektromos szigetelőképeség megvalósultak.



1. ábra: A különböző mennyiségű bór-nitridet tartalmazó ABS minták hővezetőképessége és elektromos szigetelőképessége

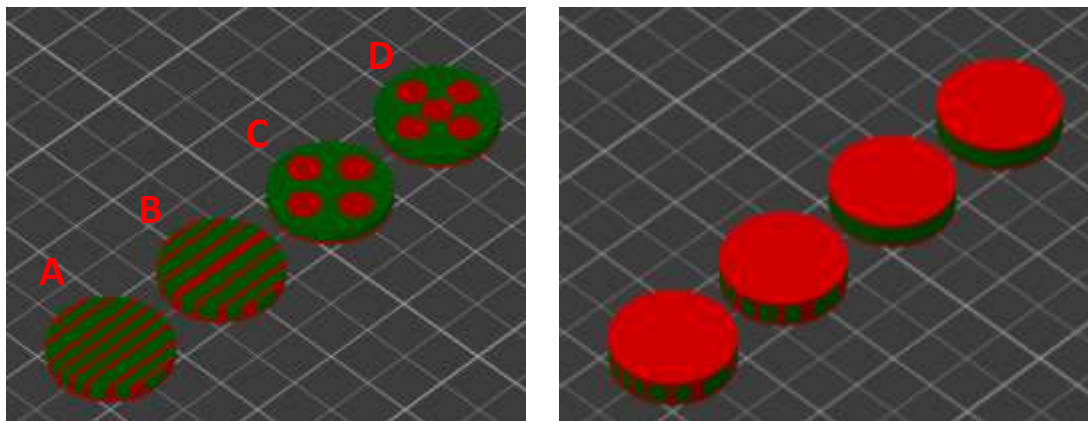
Megvizsgáltam továbbá az anyag mechanikai tulajdonságait szakítóvizsgálatok és keménységmérés révén (2. ábra). A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a BN tartalom növelése révén az ABS keménysége nem változik számottevően, viszont a szilárdsága és a deformációs képessége némileg visszaesett, ami az anyag elridegedésére engedett következtetni. Mindeközben a húzó rugalmassági modulusként kifejezett merevség növekvő tendenciát mutatott és 30 térfogat% BN jelenlétekor az eredeti, ABS-re jellemző érték közel háromszorosára emelkedett.



2. ábra: A különböző mennyiségű bór-nitridet tartalmazó ABS minták keménysége, húzószilárdsága, húzó rugalmassági modulusa és szakadási nyúlása

A létrehozott anyagok azok tulajdonságai alapján beteljesítették a előzetesen megfogalmazott célokat, mindeközben viszont azt is megállapítottam, hogy a BN jelentősen lecsökkentette az ABS folyóképességét, ami a 3D nyomtathatóság szempontjából kedvezőtlen. Ezutóbbi tulajdonságból adódóan a legnagyobb (30 térfogat%) BN tartalmú mintákkal a továbbiakban nem foglalkoztam, ugyanis egyértelművé vált, hogy a kitűzött célokra alkalmatlan, az ezalatti kompozitok viszont jól működtek. A fenti kísérletek eredményeit összegezve azokat két külön folyóiratcikk kéziratában foglaltam össze és az olaszországi kollégákkal közösen ezeket benyújtottuk, jelenleg elbírálás alatt állnak.

Az eddig elért eredményeket szem előtt tartva a 0-20 térfogat% BN-et tartalmazó mintákat egy erre alkalmas extrúziós feldolgozó berendezéssel olyan 1,75 mm átmérőjű filamentekké alakítottam, amely tipikusan az ún. *Fused Deposition Modeling* (FDM) elven működő 3D nyomtatók alapanyaga. Az előállított filamentekből 3D nyomtatással készítettem próbadarabokat, azonban az egyszerű egykomponensű, homogén gyártás helyett egy többkomponensű megoldást választottam, amelyben egyenlő arányban kombináltam az adott mennyiségű BN-nel töltött mintákat a töltetlen ABS alapanyaggal a 3. ábrán láthatóak szerint. A 12,5 mm átmérőjű és 3 mm vastag 3D nyomtatással gyártott „pogácsa” próbatestek kialakítása olyan, hogy azon hővezetőképesség mérése lehetséges. Az ábrán piros színnel jelölt részek a megfelelő vezető- és szigetelőképeségű komponenst jelölik (20 térfogat% BN), míg a zöld szín a töltetlen ABS-t. A kísérleti hipotézisem szerint a pogácsa alsó és felső felülete közti részt nem szükséges kizárólag bór-nitrid tartalmú polimerrel kitölteni, abban elégséges lehet vezető struktúrákat, pl. oszlopocskákat kialakítani, amik biztosítani képesek a megfelelő hővezetőképességet. Ezáltal a 3D nyomtatási eljárás még inkább kiaknázhatóvá válik, ilyen termékek ugyanis hagyományos gyártási technológiákkal nem, vagy csak nagyon nehézkesen és költségesen alakíthatók ki.



3. ábra: A hővezető és elektromosan vezető anyagokból 3D nyomtatással készült, többfázisú minták

A minták hővezetőképességének értékei az 1. táblázatban láthatók. A korábbiak során sajtolással előállított mintákhoz képesti jóval alacsonyabb vezetőképességük természetes, ugyanis a 3D nyomtatott struktúrák jellemzően nagyon porózusak, a bennük lévő légzárványok a vezetőképességet jelentősen korlátozzák. Általános érvényű következtetéseket jelenleg még nehéz ezalapján levonni, azonban jelenleg is zajlik egy olyan referencia sorozat nyomtatása, ahol a próbatest teljes keresztmetszete egy köztes mennyiségű (10 térfogat%) BN-t tartalmazó kompozitból lett kinyomtatva. Ezek vizsgálata révén kiderülhet, hogy a hővezető struktúrákkal kapcsolatos hipotézisem helytálló-e. Ezzel párhuzamosan elvégezzük a fejlesztett, 3D nyomtatással készült termékek egyéb tulajdonságainak (pl. szilárdság, merevség stb.) feltérképezését.

1. táblázat: A különböző heterogén struktúrájú 3D nyomtatott darabok hővezetőképessége

Minta jele	A	B	C	D
Hővezetőképesség [W/mK]	0,208	0,200	0,251	0,306

3. A kutatási eredmények disszeminációja

A kutatási eredményeket három folyóiratcikk formájában tervezzük az olaszországi kollégákkal megjelentetni, ezek közül kettő már benyújtásra került, míg a harmadikhoz még jelenleg is méréseket és kiértékeléseket folytatunk:

- Az első cikkben a fejlesztett anyagminták termikus, termomechanikus és hővezetőképességi tulajdonságainak elemzését foglaltuk össze, az eredményeket egy hazai kiadású nemzetközi folyóiratba, az *Acta Technica Jaurinensis*-be nyújtottuk be „Thermal and thermomechanical properties of boron nitride-filled acrylonitrile butadiene styrene (ABS) composites” címmel.
- A második cikkben az összes vizsgált fizikai, mechanikai és morfológiai tulajdonságot összesítettük és optimumkereső algoritmusok alkalmazása révén rámutattunk, hogy az előzetesen megfogalmazott célok alapján mely összetételű ABS/BN kompozit lehet a legalkalmasabb az előállított minták közül. A cikket a *Journal of Materials Research & Technology* nemzetközi, D1-es rangsorolású folyóiratba nyújtottuk be „Thermally conductive and electrically resistive acrylonitrile butadiene styrene (ABS)/boron nitride composites: Optimal design using a multi-criteria decision making approach” címmel.
- A harmadik – egyelőre tervezett – cikk a 3D nyomtatással elkészített darabokon elvégzett vizsgálatok eredményeit fogja összesíteni.

4. Összefoglalás

A University of Trento intézményben eltöltött ösztöndíjas három hónap alatt eredményes kutatást sikerült végrehajtanom a 3D nyomtatási célokra szánt, jó hővezetőképességű és elektromosan szigetelő polimer kompozitok fejlesztésének területén. Prof. Alessandro Pegoretti szakmai segítségével feltérképeztük az ilyen célra potenciálisan alkalmas ABS/BN anyagmintákat különböző összetételi arányok mellett és megvizsgáltuk azok tulajdonságait annak feltérképezésére, hogy alkalmasak-e a kívánt területre, illetve, hogy 3D nyomtatással feldolgozhatók-e. A feldolgozásra alkalmasnak ítélt mintákból az FDM típusú 3D nyomtatóberendezések működtetéséhez megfelelő filamenteket gyártottunk, majd abból különböző kitöltési struktúrák révén vizsgálatra alkalmas próbatesteket. A kint eltöltött idő eredményeként mostanáig két folyóiratcikk benyújtásra került, illetve további egy elkészülése várható a következő hetekben/hónapokban, amihez a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj nagyban

hozzájárult. A kutatási lehetőség biztosításán túlmenően sikerült egy olyan kapcsolatot kialakítani a helyi kollégákkal, amit vélhetően a jövőben is kamatoztatni tudok majd.

Győr, 2023.07.15.