

Additív gyártás a zene művészetében

Balogh Bence

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, Tudományos munkatárs,
bence.balogh@bayzoltan.hu

Előzmények

A Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. 2014-ben kutatásokat végzett a „Magyar Zongora Projekt” keretei között, ahol a projekt célja egy magyar műszaki és gyártási ismeretekre alapozott, újszerű zongora prototípusának előállítás, ill. gyártástechnológiájának kidolgozása volt. Az egyik lényeges elem a szélerősítésű műanyag kompozitból álló rezonáns alkalmazása, a másik az újszerű formaterv volt.

Az irodalom értékelése után ismertették a kompozit-fejlesztésnél alkalmazott módszertant (kísérlettervezést) és a figyelembe vett paramétereket. A továbbiakban a közel 40 „kis” mintán végzett akusztikai vizsgálatok eredményeit ismertették a fa rezonánssal való összehasonlításban. Az eredményekből megállapították, hogy a lágyabb gyanta és a magasabb gyantatartalom eredményezett a fához közelebb álló akusztikai értékeket, de tekintettel arra, hogy a rezonáns komoly mechanikai igénybevételnek is ki van téve, ezeket a pusztán akusztikai szempontokat csak részben tudták figyelembe venni az ún. „fantom-zongorás” kísérletekben, ahol a végleges méretű keretbe elhelyezett, összesen ötféle rezonáns viselkedését hasonlították össze. Az erre a célra kidolgozott ragasztási módszerrel cserélhetővé tett rezonánsokon összehasonlító elemzést végeztek, és ennek eredményeire épült a végleges prototípus felépítése, amelynek akusztikai jellemzőit egy első osztályú kereskedelmi zongorával vetették össze.

A projekt eredményeként olyan prototípus jött létre, amelynek hangzása hozzáértők szerint sem marad el a hagyományos, fa-rezonánst használó legjobb zongorákétól [1].

A hegedű projekt

Az additív gyártás szinte már mindenki számára elérhető a mindennapjainkban. Számos típusból és márkából választhatunk elérhető áron. Az iparban is egyre szélesebb körben alkalmazzák a különböző additív eljárásokat és már nem csak a prototípus gyártásokban. Azonban kifejezetten érdekes kutatási és fejlesztési témák jelentek meg az ipari megoldásokon kívül is például határtudományokban és

az újszerű művészeti megoldásokban. Az additív gyártás fellendülése előtt is voltak olyan projektek, amik a kompozitok előnyét vizsgálta és összevetette más alapanyagok tulajdonságaival. A „Magyar Zongora projekt” [1] is egy klasszikus zongorát kívánt új modernebb formába önteni a jelenlegi műanyag technológiát alkalmazva.

A korábban ismertett kutatás és annak eredményeit figyelembe véve, azt tűztem ki célként, hogy FDM (Fused Deposition Modeling – szálhúzásos eljárás) 3D nyomtatási technológiával, megfelelő anyagválasztással egy olyan hangszeret hozzak létre, ami felveheti a versenyt hagyományos társaival, és esztétikailag is elfogadható. A rendelkezésemre álló gép munkaterének befogadóképessége limitálta, hogy milyen hangszerek jöhetnek szóba. Fontosnak tartottam, hogy minél kevesebb felé kelljen darabolni egy modellt, hiszen egy utólagos illesztés és ragasztás befolyásolhatja a hangképzést. Végül a választás a hegedűre esett.

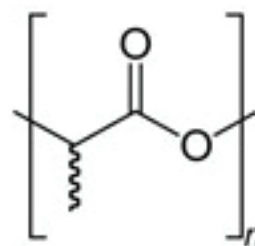
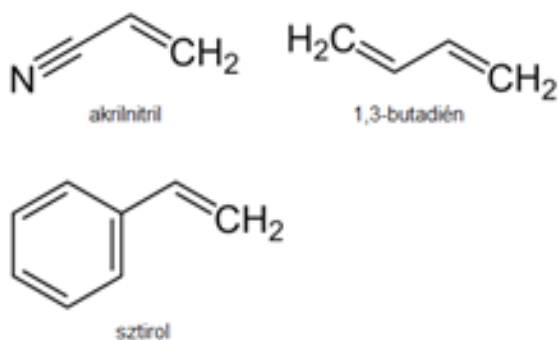
Anyagválasztás

Az irodalmi vizsgálat rámutatott arra, hogy a kompozitok bizonyos előnyös tulajdonságaik miatt, mint amilyen a nagy szilárdság, alaktartósság és (a fához képest) kis nedvességfelvétel, a világon már több próbálkozás történt bizonyos hangszerekben egyes, eredetileg fából készült alkatrészek kompozittal való helyettesítésére. Ezek között vannak vonósok és egyéb húros hangszerek, mint a gitár, a hárfa és a zongora. Az alkalmazott megoldások között találunk mind hőre lágyuló, mint hőre keményedő mátrixú kompozitokat, esetenként nemcsak szálerősítésű laminátokat hanem műanyag habokat is. Ahol erősítő szálak alkalmaztak ott gyakran előfordult az üvegszál, szénszál, de természetes szál is [1].

A 3D nyomtatásra elvégzett irodalomkutatás alapján a legnépszerűbb és leggyakrabban használt anyagok az ABS és a PLA, így ezeket mélyebb vizsgálat alá vettem, hogy melyik lehet megfelelő anyag a hegedűhöz.

ABS

Az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) egy olyan amorf polimer, amely akrilnitril és sztirol emulziós-, vagy



2. ábra. A politejsav szerkezeti képlete [2]

termék hosszútávon, évekig használható marad [5], [6].

1. ábra. ABS monomerek szerkezeti képletei [2]

tömb polimerizációjával készül polibutadién jelenlétében (1. ábra).

A sztírol monomer biztosítja az ABS jó feldolgozhatóságát, az antikril adja a keménységet, a kémiai ellenállóságot, illetve a hőállóságot, a butadiéntől pedig a termék alacsonyabb hőmérsékleten is keményebb és rugalmasabb lesz. Különböző, specifikus tulajdonságokkal rendelkező minőségeket eredményez az összetevők arányának módosítása, illetve a speciális adalékanyagok használata.

Az ABS hosszú történelemmel rendelkezik a 3D nyomtatás világában, mivel az első olyan polimerek közé tartozik, amelyeket ipari nyomtatás során használtak. Napjainkban az ABS a PLA után a második legnépszerűbb nyomtatószerű anyag, köszönhetően az alacsony árának és a jó mechanikai tulajdonságainak, keménységének, ütésállóságának és tartósságának. Alkalmas tartós, kopásálló alkatrészek nyomtatására. Olvadáspontja magasabb a nyomtatószerű anyagokhoz képest, ebből adódóan használatkor magas nyomtatási hőmérséklet biztosítása szükséges. ABS használata esetén fontos az asztal fűtése és a megfelelő hőmérséklet-szabályozás. Hátrányai közé tartozik a vetemedésre való hajlamosága, illetve a körülményes nyomtatása. Nyomtatásakor intenzív gőz szabadul fel, ezért használata jól szellőző környezetben ajánlott [3], [4].

PLA

A politejsav, röviden PLA a legnépszerűbb biopolimerként, a biodegradábilis polimerek rendkívül fontos képviselője (2. ábra). Biológiai alapú anyagokból, például búzából, kukoricából és cukorrépából kivont keményítőből vagy cukorból állítják elő. Lebomlása során víz, humusz és szén-dioxid keletkezik, így nem szennyezi a környezetet. Lebomlás komposztban ($T > 60^\circ\text{C}$) néhány hónap alatt végbemegy, biotikus környezetben nem bomlik. Mivel a bomlása csak a kezdeti hidrolízis után indul meg, szobahőmérséklet mellett szinte teljesen stabil, a belőle készített

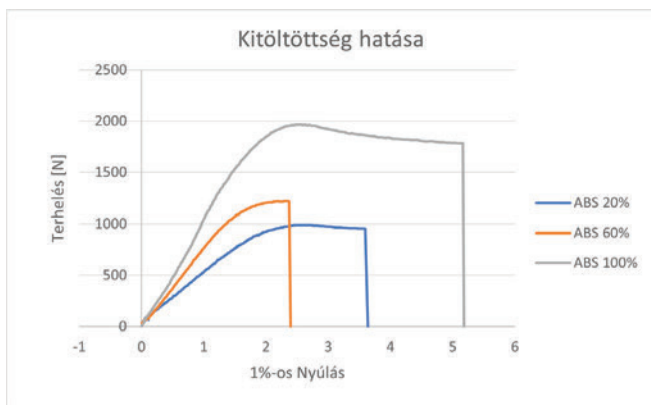
Anyagvizsgálatok

A fentebb vizsgált két anyagra **Suhaj Anett** kutató-társammal a „3D nyomtatási paraméterek hatásának vizsgálata a termék mechanikai tulajdonságaira” [7] című TDK dolgozatunkban végeztünk vizsgálatokat, aminek az eredményeit tovább hasznosítottam jelenlegi kutatásomban. A korábbi tanulmányban végzett mérés során összesen 30 darab 3D nyomtatással készült próbatestet vizsgáltunk meg. A szakító vizsgálatokat a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló laboratóriumában hajtottuk végre, Instron 8803 univerzális szervohidraulikus anyagvizsgáló berendezés használatával. Ez az anyagvizsgáló berendezés alkalmas statikus és fásasztó vizsgálatok végzésére. A berendezésen három különböző mérestartományú erőmérő cella használható, 500 kN-os, 25 kN-os, illetve 5 kN-os cella. Vizsgálataink során az 5 kN-os cellát használtuk. A nyomtatott próbatesteket húzó igénybevitel terhelte. A próbatestekre a befogás után, Instron Clip-on típusú nyúlásmérőt helyeztünk manuálisan. majd az anyagvizsgáló berendezésen 10 mm/perc húzási sebességet állítottunk be.

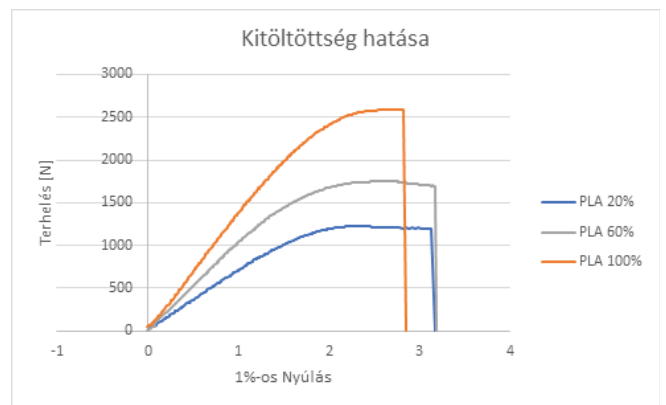
A vizsgált paramétereket az 1. táblázat foglalja össze. Az eredmények ABS tekintetében a 3-4. ábrán, PLA vonatkozóan pedig az 5-6. ábrán tekinthetőek meg. A hegedűhúrok (a következő sorrendben: E-A-D-G) megközelítőleg 71-53-45-45 [N] erővel terhelik a hegedű testet és a nyakat [9]. Tehát a mérések alapján az ABS és a PLA is megfelelő polimer lehet hiszen a legtöbb paraméter kombináció esetében közel 1000 [N] terhelés is képesek elviselni. Az egyszerűbb gyárthatóság tekintetében a PLA-ra esett a választás. A hegedű projektet a cseh Fillamentum vállalat támogatta a saját fejlesztésű anyagaival, így a végtermékhez Fillamentum filamenteket használtam.

1 Táblázat. Nyomatási paraméterek

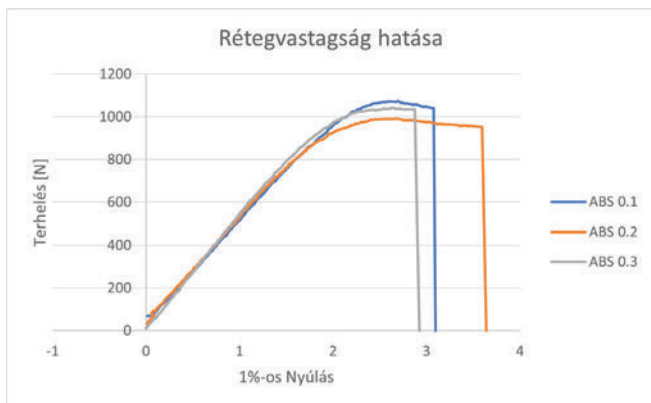
Próbatest csoport	Anyag	Kitöltöttség [%]	Rétegvastagság [mm]	Kitöltés típusa	Asztal hőm. [°C]	Fej hőm. [°C]	Befoglaló rétegek	Karima (réteg:körvonal)	Sebesség [m/s]
1.	PLA	20%	0,1	TM	65	210	6-6-3	nincs	65
2.	PLA	20%	0,2	TM	65	210	3-3-3	nincs	65
3.	PLA	20%	0,3	TM	65	210	2-2-3	nincs	65
4.	PLA	60%	0,2	TM	65	210	3-3-3	nincs	65
5.	PLA	100%	0,2	TM	65	210	3-3-3	nincs	65
6.	ABS	20%	0,1	TM	110	240	6-6-3	3:13	65
7.	ABS	20%	0,2	TM	110	240	3-3-3	3:13	65
8.	ABS	20%	0,3	TM	110	240	2-2-3	3:13	65
9.	ABS	60%	0,2	TM	110	240	3-3-3	3:13	65
10.	ABS	100%	0,2	TM	110	240	3-3-3	3:13	65



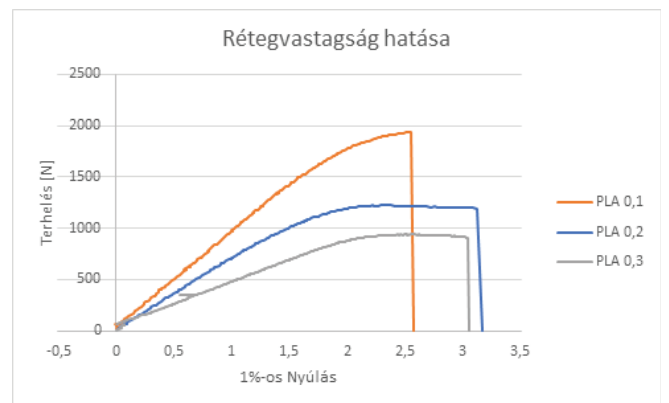
3. ábra. ABS nyomtatószal használatával készült próbatestek diagramjai különböző mértékű kitöltések használatával



5. ábra. PLA nyomtatószal használatával készült próbatestek diagramjai különböző mértékű kitöltések használatával



4. ábra. ABS nyomtatószal használatával készült próbatestek diagramjai különböző rétegvastagságok használatával



6. ábra. PLA nyomtatószal használatával készült próbatestek diagramjai különböző rétegvastagságok használatával

A modell és nyomtatás

A HovaLabs [10] korábban beszkenelt egy valós Stradivarius mesterhegedűt és abból kiindulva létrehozta egy 3D-s modellt. Ezt a modellt a köz és alkotók számára elérhetővé tették, hogy szabadon felhasználható legyen modellezési és kutatási célokra. Kiinduláshoz én is ezt a modellt alkalmaztam. Első körben változtatások nélkül nyomtattam egy részleteiben eredeti Hovalin-t, Hobbyking Grey-White „Change color” típusú PLA filamentből. Az esztétikai eredmény kifogástalan lett (7. ábra), egy ilyen replikát lehet maga Antonio Stradivari olasz hegedűkészítő is megirigyelne.



7. ábra. 3D nyomtatott Hovalin

Második lépésben, az elkészült hegedűt elvittem **Sz. Bíró Marianna**, a Miskolci Szimfonikus Zenekar prímhegedűséhez és **Soós Gábor** hegedűművészhez, hogy szakmailag vizsgálják meg azt. A gyártástechnológiai megoldás mind a két művészt lenyűgözte és láttak benne fantáziát, azonban hangtechnikai oldalról a következő megállapítások születtek:

- A hegedű túl halk,
- az aktuális merevítés nehéz,
- a nyak túl rövid, így nehezebb rajta teljes skálán játszani,
- lebegő húrlábra lenne szükség,
- két ponton felfekvő híd alkalmazásával növelhető a hasznos rezgőfelület.

Az így nyert tapasztalatok alapján, először a merevítő rúddal kísérleteztem, ami a műanyag elemek tehermentesítésére szolgál. Az eredeti Ø8x500 mm-es tömör acélrúd helyett, 1 mm falvastagságú 8 mm

átmérőjű, 500 mm hosszú acél csövet, majd az acélrúddal azonos paraméterű tömör alumínium rudat végül pedig az acél csővel megegyező paraméterű alumínium csövet használtam. Az összes megoldás ellátja a merevítés szerepét, mégis ergonómia szempontjából az alumínium cső közelít a legjobban ahhoz az érzethez, amit egy fa hegedű biztosít. A legjobb megoldás egy karbon cső alkalmazása lenne, azonban a kutatás alatt, nem sikerült ilyen terméket beszerezni, tehát ez az opció megmarad a jövőbeli tesztekhez.

Ezt követően a modellen a következő változtatásokat hajtottam végre [11-14]. A „híd” elemet megpróbáltam kikönnnyíteni, de továbbra is megtartani, mint integrált elem, azonban így se esztétikai se teherviselési szempontból nem lett optimális, tehát elvettem az integrált lehetőséget és külön elemként terveztem újra, mint ahogy egy fa hegedű esetében is használatos. Az integrált húrlábat is megszüntettem és előkészítettem a modellt lebegő húrláb befogadására, aminek a felfogatása a merevítő csőben lesz központosítva. Kísérleteztem különböző hanglyukakkal, ahol az „f” lyuk potenciális repedés keltő szerepet vett fel az „f” csúcsos közepében. Az „S” hanglyuk bizonyult ideálisnak. Továbbá a nyakat újraterveztem, hogy 1:1 méretazonos legyen skála tekintetében egy igazi fából készült hegedűnyakkal. Nyomtatási oldalról egy hegedű test nyomtatása 0,3 mm-es rétegvastagság, 2 körvonal, 30% kitöltés mellett ~400 g anyagot és ~36-40 órát, egy teljes nyak pedig 0,2 mm-es rétegvastagság, 30%-os kitöltés és 3 körvonal mellett, ~100 g anyagot és 9-11 órát igényel. A nyomtatási minőség rontásával csökkenthető a gyártási idő, azonban ez jelentősen befolyásolja az esztétikai megjelenést és a hangzás minőségét is, mert látható bordázottság alakul ki a hangképző felületeken. A kitöltési mintázatok nem befolyásolták egyik paramétert se és elhanyagolható volt az össztömeg tekintetében is. Az utolsó modell esetében a hegedű nyaka nem PLA-ból készült, hanem a Fillamentum által biztosított CPEHG100-as polimerből, ami tovább növelte a merevséget. A CPEHG100-as anyag azonban a teljes hegedű testre nem volt a legalkalmasabb, mert az ABS-hez hasonlóan minimális hajlam figyelhető meg „warping-ra” (széleken való torzulás és felválás) és folyamatos 260-280 °C-os nyomtatási hőmérsékletet igényel, ami a jelenleg alkalmazott gépen burkolat nélkül közel 40 órán keresztül komoly kihívást jelentene. A nyak nagy felületi kiterjedése és az alkalmazott karima miatt nem produkált semmilyen problémás jelenséget. Az így készült hegedű a 8. ábrán látható.

Összegzés

A tanulmányt sikeresnek könyvelhetjük el, hiszen olyan prototípus jött létre, amelynek hangzása hoz-



8. ábra. Módosított 3D nyomtatott hegedű

záértők szerint is közel áll a hagyományos, fából készült hegedűkhöz. Az additív eljárással készült hegedű előnyei, hogy egyedi megjelenést biztosítanak, könnyen személyre szabható, könnyű az utánpótlás (a test és a nyak is külön cserélhető). Maga a gyártási folyamat megközelítőleg két napot vesz igénybe, továbbá idő és anyagi oldalról is gazdaságosnak tekinthető. Illetve, hogy a "csoda zongora" esetében is megállapításra került, a műanyag egyik nagy előnye a fával szemben, hogy nedves, páradús környezetben, például egy cseppkőbarlang koncert esetén

sem hangolódik el. A jövőbeli kutatásban érdemes lehet, más anyagokat is megvizsgálni, karbon csőre cserélni a jelenlegi alumíniumot és tovább finomítani a nyomtatási paramétereket.

Irodalomjegyzék

- [1] Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.; (2014). Magyar zongora projekt
- [2] Resinex hivatalos oldala ABS és PLA - <http://www.resinex.hu/poiimertipusok/>
- [3] Hobbyking hivatalos oldala – ABS, https://hobbyking.com/en_us/pla-3d-printer-filament-white.html
- [4] Simplify 3D hivatalos oldala - ABS
- [5] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- [6] HTábi T.: Biopolimerek, biopolimerkompozitok előadás, 2015.
- [7] Bodnár I.: Hulladékgazdálkodás IV., Műanyag és gumi hulladékok feldolgozása és hasznosítása, előadás, 2016.
- [8] Balogh B., Suhaj A.; (2018). 3D nyomtatási paraméterek hatásának vizsgálata a termék mechanikai tulajdonságaira
- [9] Hegedűhúrok terhelése, <https://www.violinstringreview.com/tension-chart.html>
- [10] Hovalin hegedű, <https://www.hovalabs.com/>
- [11] Goldemberg, E. (2016). Mood, Posture and Rhythmic Feedback: MONAD Studio's Sonic Experiments with 3D-Printed Musical Instruments. Architectural Design, 86(6), 108-117.
- [12] Schleske, M. (2002). Empirical tools in contemporary violin making: Part I. Analysis of design, materials, varnish, and normal modes. Catgut Acoust. Soc. J.(Series II), 4, 50-64.
- [13] Heron-Allen, E. (2013). Violin-making: A historical and Practical Guide. Courier Corporation.
- [14] Weisshaar, H., & Shipman, M. (1988). Violin restoration: a manual for violin makers. Los Angeles: Weisshaar-Shipman.

Hivatkozások ellenőrzése: 2020.09.18.

Az Anyagvizsgálók Lapjának online látogatottsága

Az online platform 2017-es indulásától 2019 év végéig 7.164 diszkrét oldalletöltés jellemezte a forgalmat. Az oldalletöltések több mint egynegyede külföldről történt. A 2020-as jelen lapszámig összesített statisztika a látogatók számának szignifikáns növekedését jelzi, hiszen az ezévi oldalletöltések száma 8.659 darabbal az elmúlt évek átlagának kétszeresét is meghaladja. A hazaihoz képest a külföldi látogatók részaránya erősen lecsökkent, de ez nem a külföldi 1.765 oldalletöltés csökkenésének, hanem egyértelműen a hazai közönség jelentős bővülésének köszönhető.