

ÁGYÉKI GERINCSTABILIZÁCIÓS IMPLANTÁTUMOK JELLEMZŐ LATTICE STRUKTÚRÁINAK 3D NYOMTATÁSA ÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA

3D PRINTING AND MECHANICAL EVALUATION OF LATTICE STRUCTURES OF LUMBAR STABILIZATION SPINAL IMPLANTS

Molnár Luca*, Zwierczyk Péter T.**

ABSTRACT

This study focuses on the load analysis of the lattice structures typical for spinal stabilization implants fabricated by FDM technology and the selection of the most suitable lattice for a fusion spinal implant. Based on the results of the physical measurements, the finite element analysis can be validated, allowing the developed of patient specific implants to be evaluated for complex loads that would be directly applied to them in the installation environment.

1. BEVEZETÉS

1.1 Klinikai áttekintés

Globálisan jelentős közegészségügyi problémát jelentenek a gerinc degeneratív megbetegedései, leginkább az ágyéki gerincszakaszt érintve. Végző megoldásként fúziós műtéti eljárásokat alkalmaznak kezelésként, ahol egy vagy több fúziós gerincimplantátumot építenek be a sérült porckorong helyére és egy transzpedikuláris csavar-rúd rendszert a csigolyák stabilizálására. (1. ábra) Az összeintegrációs folyamat lezajlásával egy összezsugorított csigolyablokk alakul ki a sérült gerincszegmensből.

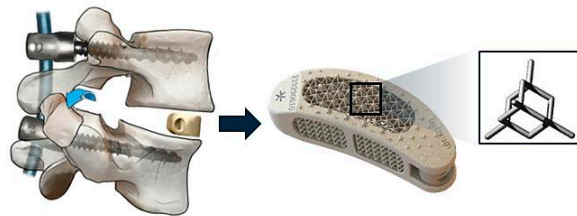
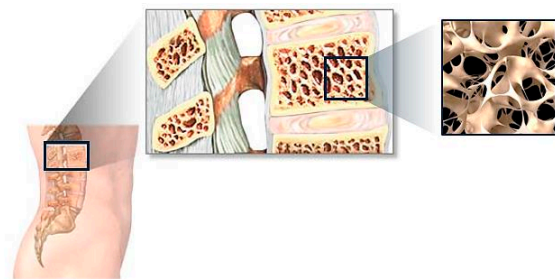
1.2 Szakirodalmi áttekintés

A fúziós gerincstabilizációs implantátumok területén a belső tereket kitöltő rácsszerkezetek, úgynevezett lattice struktúrák egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek. Ezek a celluláris struktúrák elsősorban nyílt cellás szerkezetűek és a cellakonfigurációik a tér három irányában periodikusak. [2]

Használatuk több szempontból is rendkívül előnyös. Néhányat említve, bizonyítottan elősegítik a csontosodási folyamatot a megnövekedett felület és a trabekuláris csontszövetet imitáló belső kialakításuk miatt. Továbbá lehetővé teszik a komplett szerkezet mechanikai teherbírásának és egyéb tulajdonságainak

könnyebb optimalizálását, mint a sztochasztikus habok vagy tömör szerkezetek esetében.

Az 1. ábra szemlélteti a tárgyalt lattice struktúrákat egy jellemző gerincimplantátumban az anatómiai és műtéti környezettel.



1. ábra Gyémánt lattice struktúrával ellátott TLIF gerincimplantátum rácsszerkezete a csigolya trabekuláris csontszövetével bemutatva [1, 2, 3, 4]

A lattice struktúrák tulajdonságai és viselkedése közvetlenül függ az anyagtól, a gyártási technológiától, illetve az egységcellák tulajdonságaitól és térbeli elrendeződésétől. Előállításuk mind fémes mind polimer anyagok esetében additív gyártással történik. Azonban a széles körben alkalmazott biokompatibilis PEEK anyag esetében a kis méretű szerkezet és a magas hőmérséklet miatt ez technológiai kihívásokba ütközik.

A PEEK polimerből készült lattice struktúrával rendelkező implantátumokat speciálisan erre a célra fejlesztett ipari FDM (Fused Deposition Modelling azaz ömledékrétegzés) 3D nyomtatókkal hozzák létre, ami jelenleg egy fejlesztés alatt álló terület ugyanis jelenleg csak néhány ilyen implantátum került piaci forgalomba.

* Gépészmérnök hallgató (MSc), Gép- és Terméktervezés Tanszék (GT3), Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Felelős szerző, e-mail: molnar.luca@gt3.bme.hu

** Egyetemi adjunktus (PhD), Gép- és Terméktervezés Tanszék (GT3), Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

1.3 Célkitűzés

A kutatás célja az ANSYS szoftverben elérhető lattice egységcellák generálási paramétereinek változtatásával a mechanikai tulajdonságok vizsgálata és összehasonlítása. Továbbá az FDM 3D nyomtatóval gyártott próbatetek végzett fizikai mérések során tapasztaltak implementálása végeselemes környezetbe, hogy a struktúrák viselkedése összetettebb in vivo terhelési modellekre is vizsgálhatóvá váljon. Ez a megszerzett tudás a későbbiekben lehetővé teszi a teljesen betegspecifikus implantátumok fejlesztését.

2. MÓDSZER

2.1 3D nyomtatott próbatetek

A tanulmányban 4 x 3 darab próbatest fizikai vizsgálata lett elvégezve, amelyek struktúra és rúdvastagság alapján különböztethetők meg, ami három különböző egységcella-kialakítást és két eltérő rúdvastagságot jelent. A próbatetek a SpaceClaim 2021 R2 programban lettek generálva és a BME Gép- és Terméktervezés Tanszék Stratasys F170 ipari FDM 3D nyomtatójával ABS polimer anyagból kerültek kinyomtatásra. [5]

1. táblázat 3D nyomtatás paramétereit









Anyag	Stratasys F123 ABS-M30 hőre lágyuló polimer filament (orange, dark grey)
Folyáshatár	88,3 MPa
Rugalmassági modulus (E)	2,2 GPa
Támasanyag	Stratasys F123 QRS (oldható)
Támasanyag kitérítési stílusa	bekerítő (surround), önhordó (45°-os szög)
Rétegvastagság	0,178 mm
Nyomtatási sebesség	~40 mm/s
Pontosság	0,02 mm (XY)

Ezek egységesen 30×30×30 mm nagyságú kockák, amelyeknek élei mentén egy 3 mm vastagságú négyzetkeresztmetszetű váz található. A belső struktúrát minden esetben nyolc egységcella építi fel, amelyek összeolvadnak a vázzal. A váz teherbírási gyakorolt hatása nem volt a vizsgálat tárgya. Az egységcellák további tulajdonságait a 2. táblázat részletezi.

A tanulmányban a kristályszerkezetekkel analóg felületen és térben középpontos rácsszerkezetek és egy gyémánt struktúrához hasonló több térbeli támaszelemmel rendelkező úgynevezett lapcentrált

bipiramis kockarács vagy octet rács is kiválasztásra került. A leggyakoribb gyémánt egységcella nem megvalósítható a próbatetek kialakítása miatt, mivel ekkora egység-cellaméret esetén a belső támaszrudak nem érintkeznek a külső vázzal. Az egységcellák méretei nagyobbak, mint amiket humán gerincimplantátumokban alkalmaznak, az elérhető FDM technológia nyomtatási határai miatt. A kisebb rúdkeresztmetszetű, térben centrált egységcellájú próbatetek keresztlátásán nem csak a különböző rácsszerkezet fajták összehasonlítása, de a rúdvas-tagságnak a teherbírási gyakorolt hatása is vizsgálható.

1. táblázat. Próbatelek paramétereit

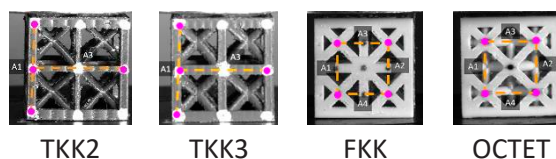
Cellatípus	térben középpontos kockarács		felületen középp. kockarács	bipiramis lapcentrált kockarács
	TKK2	TKK3	FKK	OCTET
Rövidítés	TKK2	TKK3	FKK	OCTET
Cellaméret	15 mm			
Rúdvastagság	2 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Relatív térkitöltési arány	13,9%	31,2%	36,1%	53,3%
3D modell (felső nézet)				
3D modell (trimetrikus nézet)				

Fontos megjegyezni, hogy az ABS változó arányban polimerizálható, a gyártási folyamat és a gépi pontosság befolyásolhatja tulajdonságait. Mindegyik próbatest megegyező építési irányban lett előállítva, és ebből az irányból lettek terhelve a nyomó vizsgálat alatt. A modellek nem önhordóak, ezért a nyomtatáshoz használt támaszanyagot el kellett távolítani. Ez vegyszeres áztatással történt. Az áztatásnak a mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatása nem ismert.

2.2 Fizikai mérések

A mechanikai tulajdonságok egytengelyes statikus nyomóvizsgálattal lettek megvizsgálva, amelynek során az alkalmazott erő és az ennek hatására bekövetkező elmozdulás mellett előre definiált pontok elmozdulásai optikai nyúlásmérő műszerrel lettek rögzítve. Ehhez ZWICK Z250 Tensile Tester szakítógépe és Mercury Monet típusú DIC videoextenzométer lett használva.

Az optikai méréshez felrajzolt pontok közötti távolság a TKK próbadarabok esetében 28 mm és a másik két esetben 15 mm volt.



1. ábra. Felvett mérési pontok

A méréskor a próbatetek két lap közé kerültek behelyezésre. Ezeket a felső elem vagy más-néven keresztfej állandó 5 mm/min sebességgel függőlegesen lefelé terhelte. Továbbá 2 N előterhelés lett alkalmazva.

2.3 Végeselemes modell

A végeselemes módszerekkel (VEM) végzett vizsgálatok jelentős mértékben tudják csökkenteni a nyomtatott rácsszerkezetek teljes jellemzéséhez szükséges kísérleti munkát. A pontosság függ a modellhez rendelt anyagtulajdonságoktól, a háló minőségétől és az elemi lattice cellák egyszerűsítésétől.

A tanulmányban az egyes rácsszerkezetek szolid elemekkel lettek közelítve. A kockarácsok két lap közé kerültek befogásra, a mérési összeállítást alapul véve. A végeselemes analízis célja az elmozdulásmező elemzése.

A számításához lineáris anyagmodell került alkalmazásra, azaz kimenő mennyiség egyenesen arányos a bemenettel és az arányossági tényező a rugalmassági modulus. A 4. táblázat foglalja össze az alkalmazott anyagok vizsgálatok szempontjából fontos jellemzőit.

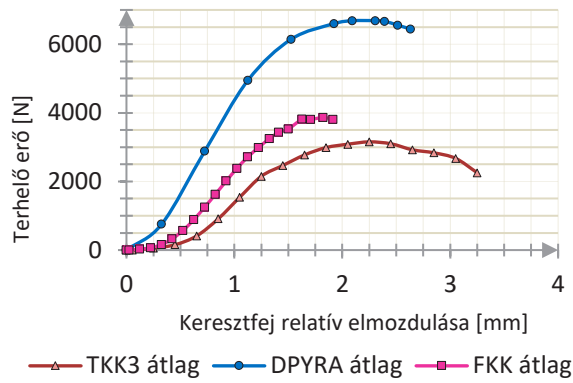
2. táblázat. VEM anyagjellemzők

Anyag	E [GPa]	ν [-]	Sűrűség [kg · m ⁻³]
ABS polimer	2,2	0,4078	1050
Szerkezeti acél	200	0,3	785

A vizsgálatokhoz erővezérelt megközelítés lett alkalmazva, ahol a kompressziót kifejtő lap felső felületére egy megoszló erőt került definiálásra időben egyenletesen erőterheléssel. Továbbá az alsó lap minden szabadságfoka korlátozva lett. Az érintkező felületek között konstans 0,2 [-] együtthatójú súrlódásos kontakt lett beállítva.

3. EREDMÉNYEK

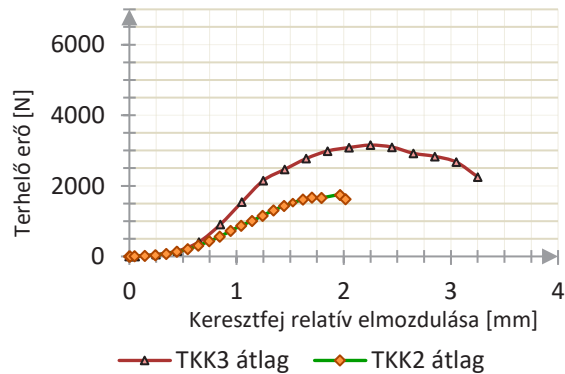
A keresztfej relatív elmozdulása alkalmas a kiértékelésre, ugyanis a mérés kis terhelő erői nem okoznak számottevő deformációt a fejen. Minden mérési esetben az egyes időpillanatok alapján lett meghatározva a mért terhelés és az elmozdulás értékek számtani közepe, amelyek között függvény-kapcsolat írható fel. Az alábbi diagramok ezeket mutatják be.



1. diagram. Mérési eredmények átlagolt függvényei elemi cellák alapján

Megállapítható, hogy a TKK3 próbateteknek a legalacsonyabb a teherbírása, de szívósabbak, mint a FKK rácsszerkezetűek, amelyek már relatív kis terhelés hatására ridegen eltörtek és a testből polimer szilánkok váltak ki. Az OCTET próbatetek mutatták legmagasabb ellenállást a nyomóterhelésre. Ennek egyik oka, hogy ebben a rácsszerkezetben a külső vázat leszámítva szinte csak döntött helyzetű rövidebb rúdelemek találhatók, illetve a relatív térkitöltési arány is ennél a cellatípusnál a legmagasabb a vizsgáltak közül.

A lattice struktúrák a támasztékok rúdát-mérőjének függvényében is meg lettek vizsgálva.



2. diagram. Mérési eredmények átlagolt függvényei rúdát-mérő alapján

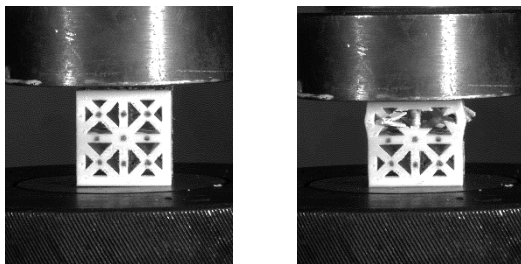
Ezek alapján megállapítható, hogy a nagyobb rúdát-mérő szívósabb viselkedéssel és jobb teherbírással társul. Fontos megjegyezni, hogy a relatív sűrűség a TKK2 rács típusnál volt a legkisebb.

3.1 Végeselemes modell hitelesítése

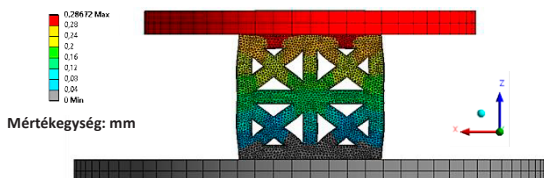
A végeselemes modell hitelesítéséhez az optikai méréshez felvett mérési pontok elmozdulásai kerültek felhasználásra.

Minden esetben a maximális erőnél kisebb erő érték alapján lett elvégezve a validáció, mivel a végeselemes

számításban kisebb terheléssel gyorsabban és biztosabban végbemegy a szimuláció.

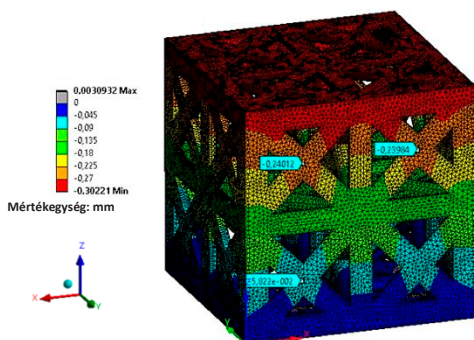


2. ábra. FKK próbatest fizikai mérése



3. ábra. FKK modell eredő elmozdulásmezője 1810 N erővel terhelve 4,5x nagyítással

A pontok koordinátáit 5. ábra és a mért eredményeket a következő 4. táblázat foglalja össze.



4. ábra. FKK modell „z” irányú elmozdulása és a rögzített mérési pontok szemléltetése

3. táblázat. Mérések kiértékelése

	A ₁ távolság	A ₃ távolság
Az optikai mérés eredménye	14,9986 mm	14,9982 mm
VEM analízis eredménye	14,9367 mm	14,9490 mm
VEM relatív hibája	0,41%	0,33%

A többi modell is ez a módszer szerint került kiértékelésre és minden esetben 0,5% hibahatáron belüli értékek adódtak, tehát verifikáltnak tekinthető a végeleemes anyagmodell.

ÖSSZEFOGLALÁS

Megállapítható, hogy a próbatestek teherbírása a relatív térkitöltéssel növekszik, azaz az OCTET rács rendelkezik a legnagyobb kitöltési aránnyal így ez terhelhető a legnagyobb erővel. Mivel a gerincben a

dinamikus hatások végett a nyugalmi helyzet 400 N nagyságú nyomó terheléséhez képest akár ennek többszöröse is fel-léphet, így ebből a szempontból a vizsgált struktúrák közül ez rácsszerkezet a legalkalmasabb a gerincimplantátumok térkitöltésére.

A végeleemes anyagmodell hitelesítésre került, ezáltal a belső részeket kitöltő struktúra-szerkezet optimalizálható betegspecifikus in vivo terhelésekre, így hosszútávon lehetséges teljesen egyedi implantátumok biomechanikai fejlesztése és később gyors additív gyártása.

SUMMARY

It was concluded that the load-bearing capacity of the specimens increases with relative density, with the OCTET lattice having the highest fill ratio, making it the most load-resistant. Considering that the dynamic load on the spine can significantly exceed, this lattice structure is the most suitable for the implant. The finite element material model was validated, allowing for the internal structure to be optimized for patient-specific in vivo loads, enabling the long-term development and rapid additive manufacturing of fully customized implants.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-2-BME-422 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOM

- [1] Benjamin, C., Dugdale, D.C., Conaway, B., 2023. Vertebroplasty - Normal anatomy: MedlinePlus Medical Encyclopedia. MedLinePlus, https://medlineplus.gov/ency/presentations/100204_1.htm
- [2] Maconachie, Tobias, Martin Leary, Bill Lozanovski, Xueze Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, és Milan Brandt. „SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges”. Materials & Design 183: 108137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>
- [3] Taurus – Syntropiq <https://syntropiq.com/implants/taurus/>
- [4] Truckenmueller, P., Czabanka, M., Bayerl, S.H., Mertens, R., Vajkoczy, P., 2021. Oblique insertion of a straight cage during single level TLIF procedure proves to be non-inferior in terms of restoring segmental lordosis. Brain and Spine 1, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.bas.2021.100302>
- [5] Stratasys ABS-M30 Data Sheet, ISO 9001:2015, https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/abs-m30/mds_fdm_abs-m30_0921a.pdf