



Azonos térfogatú metaanyag próbatestek terhelhetőségének vizsgálata

Test of the load capacity of test specimens of the same volume of metamaterials.

¹Csukás Martin, ²Horváth Richárd, ³Gonda Viktor, ⁴Oláh Ferenc

^{1,2,3,4} Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag-
Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország,
horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Absztrakt

Bemutatásra kerül az ún. metaanyagok kutatási eredményei különös tekintettel azok zömítési tulajdonságaira, alakváltozó képességére energiaelnyelő képességére valamint alakmemória jellemzőire. Részletesen ismertetésre kerülnek a főbb elemi cellák, valamint azok végeelem-vizsgálatának eredményei és az ilyen anyagok felhasználási területei. A kutatásban bemutatásra kerül egy olyan egységcellákból felépített és tervezett, valamint paraméterezett geometria, mely azonos térfogat mellett (azonos tömeg mellett) eltérő méretű és mennyiségű, de egymásra hasonlító elemi egységcellákból áll. Meghatározásra kerül a különböző próbatestek gyárthatósági határ mérete. A kapott eredmények tekintetében elemzésre kerültek egyedi geometriák, valamint következtetések levonása a további kutatások és fejlesztési irányok tekintetében.

Kulcs szavak: Metaanyag, önazonos, zömítés, végeelem, egységcella, paraméterezett

Abstract

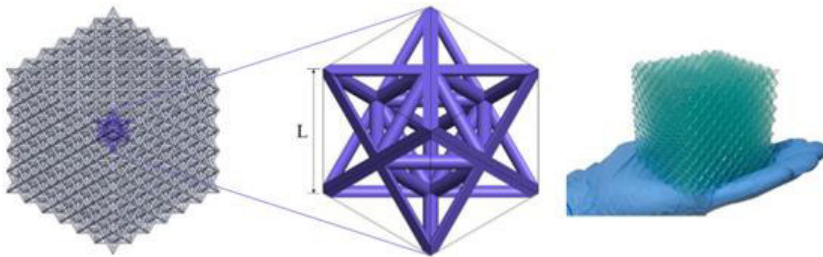
This research represents the results of meta-materials with special regard to their compaction properties, deformability, energy absorption capacity and shape memory characteristics. The main elemental cells are described in detail, as well as the results of their finite element analysis and the areas of application of such materials. The research shows geometry constructed and designed and parameterized unit cells, which consist of elementary unit cells of different size and quantity, but similar to each other, with the same volume (same weight). The limitations of production are also introduced. With regard to the obtained results, individual geometries were analyzed and conclusions were drawn regarding further research and development directions.

Keywords: metamaterials, self-identical, compression, finite element, unit cell, parameterized

1 Bevezetés

A metaanyagoknak számos érdekes és meglepő tulajdonsága van. Például M. Bodaghi, és társai tanulmányozta a 3D nyomtatással előállított nagy deformációjú lágy metaanyagokat. Elsősorban paralelogramma, téglalap, és hatszöglet alakú egységcellákat használtak. A numerikus kísérletek azt mutatták, hogy az egységcellák alakja, iránytípusa és a terhelés nagysága jelentős hatást gyakorol az anyag anizotróp tulajdonságaira nagy deformációk esetén [1]. Háromszög és négyszög alakú

egységcellák nyolcszögekből felépített architektúrájú metaanyagok csúcsaihoz való hozzáadásával kialakított próbatesteken végzett vizsgálatokat Ramin Hamzehei és társai [2]. A négyszögek hozzáadásával a nyolcszögletű szerkezet csúcsai instabilabbá válnak, ami az auxetikus viselkedés kialakulásához vezet az alkalmazott deformáció különböző szintjein. A viselkedés legfontosabb okai: a kapcsolódási pontok forgása és merevsége, valamint a cellafalak hajlítása okozták. A hierarchikus egységcellás anyagok hasznosságát tovább erősíti Mehrdad Mohsenizadeh és társainak [3] ebben a témában való kutatása, miszerint ezeknek a vázoknak az energiaelnyelésben és eloszlásban való eredményességét és hatékonyságát vizsgálják. A tanulmányozás során megfigyelték, hogy 70%-os deformáció után, a szerkezet (1.ábra) teljes mértékben képes volt visszanyerni kiinduló alakját. Ez a tulajdonság az általánosan használt energiaelnyelő szerkezeteknél elérhetetlen.



1. ábra: nyolc-rácsos egységcellákból álló szerkezet [3].

Yafei Zhang és társai [4] egytengelyű zömítővizsgálatokon és végeselemes szimulációkon keresztül tanulmányozták az alábbi szerkezeteket. Az anyagok és szerkezetek helyi deformációi általában az instabilitás, illetve a gyártási folyamatok vagy az üzemidő során bekövetkező különféle erőhatások következményei. Mindig bizonytalan módon fordulnak elő. Léteznek olyan tervezett metaanyag szerkezetek, amelyek statikus terhelés mellett rendkívül rendezett helyi deformációt mutatnak. Tovább erősíti a metaanyagok eredményességét Yanyu Chen és társai [5] kutatása, amelyek során hierarchikus méhsejt szerkezetek cellái progresszív meghibásodási, azaz alakváltozási módot mutatnak, amelyek sejtfalai háromszög alakú rácskonfigurációjú cellákból (5/b) épülnek fel. Ez javítja a merevséget és az energiaelnyelést egytengelyű nyomás alatt. Ezekben a hierarchikus méhsejtkekben ciklikus terhelés mellett nagy energiaelosztás és alak integritás tapasztalható nagy mértékű deformáció esetén is (ami akár 60%). Ezen kívül nem hanyagolható el a nagyszerű alakmemória hatás sem. Felhasznált anyagminőség VeroWhite (üveges polimer) volt. A struktúrát 3D nyomtatási technológiával hozták létre.

2 Metaanyag geometria fejlesztése

Kutatásaink során cél volt különböző felépítésű próbatestek terhelhetőségének a maximalizálása, állandó térfogat és méret mellett. A kiinduló darab (2.ábra) egy 50x50x50 [mm] próbatest, amelyből négy darab 25x25x25 [mm] egység lett eltávolítva, fenntartva az egyenlő falvastagságot. Az egységcellák önismétlődők, mennyiségük növekedésével a méretük és a közöttük lévő falvastagság csökkenni fog ($V=\text{áll.}$), darabszámuk eléri a 81. Jelen tanulmányban a szerkezeteket additív gyártási módszerrel állítottuk elő, 4, 9, 16, 25, 64, 81 cellaszámokkal. Ezeket úgy hoztuk létre, hogy 50x50 egységcellákat x és y irányban egymás mellé építettük. A cellafalak vastagsága függvénye a cellaszámnak. Mivel a szerkezetek mélysége azonos, ebben a tanulmányban a darabok sűrűségét állandónak tekintjük. A négyzeteknél, amelyeket ismételtünk a sűrűség állandón tartása érdekében a cellafalak vastagsága csökken. Erre mutat példát a 2., 3. 4. ábra, illetve az azonos térfogathoz (területhez) tartozó egységcellák és méreteinek meghatározását ismerteti az 1. táblázat.

Jelölések:

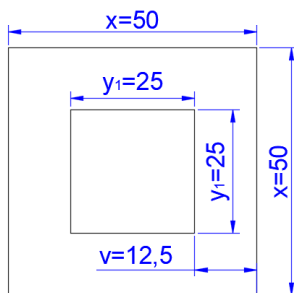
T_1 – 1-es próbatest területe [mm^2]

Indexek – próbatestek jelzése + cellák száma

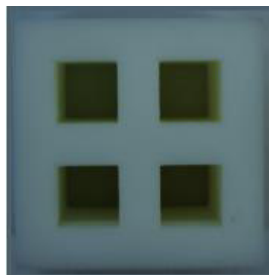
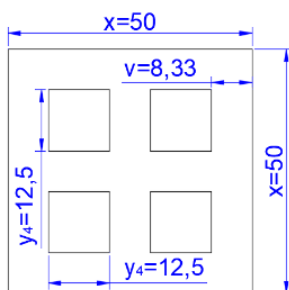
v – falvastagság [mm]

x – próbatest befoglaló mérete [mm]

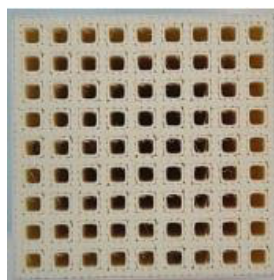
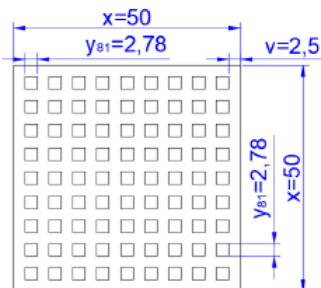
y – önismétlődő cellák befoglaló méretei [mm]



2. ábra: Alapegységcella



3. ábra: Négy egységcellás modell és ez alapján nyomtatott próbatest



4. ábra: Nyolcvanegy egységcellás modell és ez alapján nyomtatott próbatest

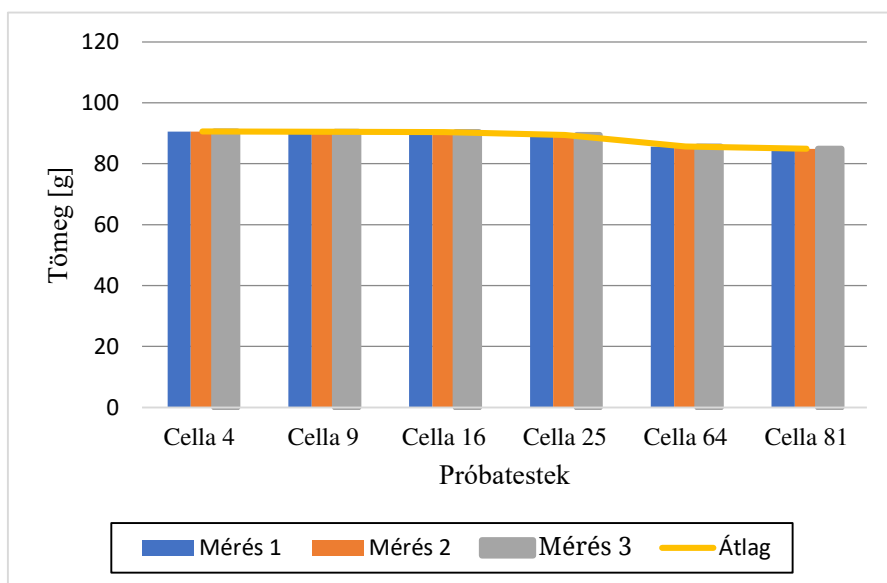
1. Táblázat: Számítás menete, lépésenként egy alapegységcellát tartalmazó próbatestre:

$T_1 = x^2 - y_1^2$
$T_4 = x^2 - 4 \cdot y_4^2$
$T_1 = T_4$
$x^2 - y_1^2 = x^2 - 4 \cdot y_4^2$
$y_1^2 = 4 \cdot y_4^2$
$y_4^2 = \frac{y_1^2}{4}$
$y_4 = \frac{y_1}{2} = 12,5mm$

Ez alapján a számítás elvégezhető tetszőleges számú egységcella esetén is.

3 Eredmények, összefoglalás

Isquared ABS X-Treme ABS tekercsből készültek a próbatestek. Az általunk gyártott darabok az FDM technológiával lettek létrehozva, a gyártóeszköz a következő volt: Dimension BST 768 3D-s gyors prototípus-nyomtató amivel összesen 6 darab próbatest került legyártásra. Ezt követte a kész darabok tömegmérése Mettler Toledo AB204 digitális analitikai mérlegen. Minden mérést háromszor végeztünk el, és azokat átlagoltam. Ez látható a 4. ábrán. Elvárás volt a darabok tömegének állandósága a 2. pontban említett számítások alapján. A mérések igazolták kalkulációkat, ugyanis kis tűréshatáron belül egyezést mutattak. Ebből kifolyólag kijelenthető az azonos befoglaló méretek és tömegek egyezése változó mennyiségű önhasonulós celláktól függetlenül.



5. ábra: Tömegmérések eredményei diagramba foglalva

A cellák számának növekedése a falvastagság csökkenését eredményezi, ezáltal egyre pontosabbnak kell lennie a nyomtatónak, gyártástechnológiának. Nagy cellaszámok esetén a gyártási technológia befolyásolta a gyártás minőségét, amik a zömítési eredményekben is

tapasztalhatók.

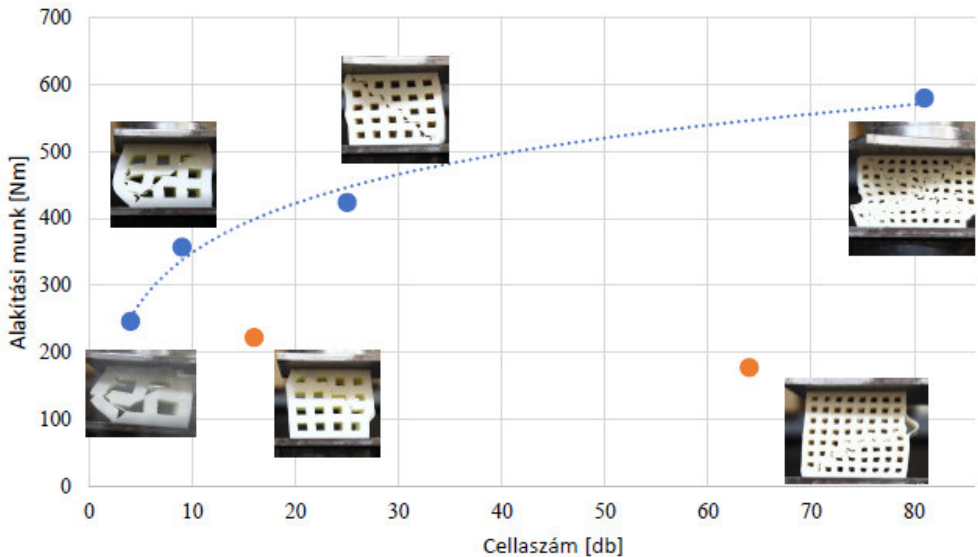
Zömítés során alkalmazott berendezés egy TTM-100-as univerzális gép volt. Az alkalmazott mérőgép maximális terhelőképessége 100 kN. A terhelés sebessége 4 mm/min volt. A mérést megelőzte a készülékek kalibrálása, amihez egy útmérőt és egy mikrométert használtunk.

A nyomtatott próbatestek végeselemes vizsgálatát Marc Mentat 2019 szoftverrel végeztük. Napjainkban a mérnöki tervezés és alkotás elengedhetetlen részét képezik ezek a szoftverek, hiszen a szimulációból kapott eredmények alapul szolgálnak a gyártást megelőző méretezésben továbbá a tervezésben. Minden vizsgálandó darabnak elkészítettük a végeselemes szimulációját ezek közül a következők emelhetők ki:

- Négy egységcellás darab, esetén az alakítás kezdeti szakaszán a szélső tartó rudak nyomó igénybevételt szenvednek, további alakítás után a szélső tartók kihajlanak míg a középső tartó rudak nyomó igénybevételt szenvednek a szimuláció alapján.
- A szimuláció végső lépései alapján megállapítottuk, hogy a kritikus alakváltozás keresztirányú, amiket igazolnak a zömített darabok tönkremenetelei. 25-ös cellaszámú darab esetén a végeselemes szimulációval hasonló eredményre jutottunk.

Munkánk során elvégeztük a próbatestek zömítő vizsgálatát, az ebből kinyert adatok diagramba lettek foglalva. Az említett gyártási hibát igazolták a vizsgálatok kiértékelései. A zömítő erő növekedést prezentált a cellák számának növekedésével, ezt a tendenciát tartotta amíg meg nem jelentek a nyomtatásból adódó anyaghiányos helyek. Kis egységcella szám esetén jellemzően az első meghibásodást követően a szerkezet nem volt képes elnyújtani az erő-út diagrammot azaz az alakításhoz szükséges munka kisebb volt, maximális erő elérése után a terhelő erő 0-ra csökkent. Ezzel szemben nagy egységcella szám esetén tapasztalható, hogy a maximális terhelő erő elérése után csökkent, majd növekedni kezdett, majd ismét csökkent. Nagy cellaszámok esetén a szerkezet zömítéssel szemben kifejtett ellenállása addig a pontig növekedett, amíg a stuktúra valamelyik tartója összenyomódott, ekkor a terhelő erő csökken, a folyamatosan egymásra rakódó rétegek az összenyomódást lassították ennek következtében további terhelést volt képes felvenni a struktúra. Nagy mértékben befolyásolta a tönkremenetelt az első repedés kiindulása, maximális munka illetve terhelés esetén ezek a repedések a szélső sarokban lévő cellákból indultak.

Az alakításhoz szükséges munka is meghatározásra került, a zömítő görbe alatti terület meghatározásával, minden esetben az első nagyobb erő csökkenésig vettük figyelembe a görbét, ennek az eredményei a következő diagramban láthatók (6.ábra).



1. ábra: Alakítási munka cellaszám függvényében

A vizsgáltab vont hat munkadarab következtében a pontok csak egy jellegre utalhatnak. Sárga pontok esetén a tönkremenetel nem a szélső cellákból indult ezt gyártási, esetleg zömítési tényezők befolyásolhatták. Alakítási munka – cellaszám közötti összefüggés pontos vizsgálatához és eredményéhez további vizsgálatok szükségesek..

4 Hivatkozások

- [1] Bodaghi, M., Damanpack, A. R., Hu, G. F., & Liao, W. H. (2017). Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing. *Materials & Design*, 131, 81-91
- [2] Hamzehei, R., Kadkhodapour, J., Anaraki, A. P., Rezaei, S., Dariushi, S., & Rezadoust, A. M. (2018). Octagonal auxetic metamaterials with hyperelastic properties for large compressive deformation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, 96-105.
- [3] Mohsenizadeh, M., Gasbarri, F., Munther, M., Beheshti, A., & Davami, K. (2018). Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption. *Materials & Design*, 139, 521-530.
- [4] Zhang, Y., Wang, Y., & Chen, C. Q. (2019). Ordered deformation localization in cellular mechanical metamaterials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 123, 28-40.
- [5] Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C. W., & Wang, L. (2018). 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Materials & Design*, 137, 226-234.