

3D-nyomtatott habok nyomtatásihőmérséklet-függő nemlineáris véges rugalmas-képlékeny modellezése

Printing-temperature-dependent nonlinear finite elastic-plastic modelling of 3D-printed foams

Dr. BEREZVAI Szabolcs¹, Dr. TOMIN Márton²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3; Tel.: +36-1-463-2228 berezvai@mm.bme.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3; Tel.: +36-1-463-1528 tominm@pt.bme.hu

Abstract

Recent developments in the extrusion-based additive manufacturing technologies have enabled the cost-effective production of customised and small series products with complex geometries. Contributions has demonstrated that multilayer foam structures with different densities in each layer can be used to improve the shock absorption properties of products. The use of in-situ foaming filaments in 3D printing could provide a major breakthrough in the manufacturing technology of such sandwich structures. In-situ foaming involves the use of materials where expansion occurs during the 3D printing process by varying the printing temperature. This method allows the creation of functionally layered foams with controlled porosity and graded density. In order to predict the mechanical behaviour of such density graded structures by numerical simulations, it is necessary to accurately model the polymer foam material printed at different temperatures and to describe the printing temperature dependence of the material parameters. The characteristic loading of 3D-printed foams is compression which exhibits finite strains and nonlinearly hardening deformations. This complex mechanical behaviour can be well modelled by the Deshpande-Fleck model developed for crushable foams. In our contribution an LW-PLA foaming 3D-printed filament is investigated via compression tests, while for the printing temperature-dependent material behaviour a parameter fitting procedure is proposed.

Keywords: 3D-printing, polymer foams, elastic-plastic deformations, constitutive modelling, parameter fitting

Kivonat

Az extrudáláson alapuló additív gyártási technológiák fejlődése lehetővé tette a bonyolult geometriájú, egyedi és kisszériás termékek költséghatékony gyártását. Korábbi kutatások igazolták, hogy a többrétegű, rétegenként eltérő sűrűségű habszerkezetek felhasználhatók a termékek ütéselnyelő képességének javítására. Az ilyen szerkezetek gyártástechnológiájában a 3D nyomtatás során in-situ habosodó szálak alkalmazása jelentős áttörést hozhat. Ez olyan anyagok használatát jelenti, ahol a habosodás a 3D nyomtatási folyamat során történik a nyomtatási hőmérséklet változtatásával. Ez a módszer lehetővé teszi a funkcionálisan rétegelt habok létrehozását kontrollált porozitással és változó sűrűségű rétegekkel. Annak érdekében, hogy numerikus szimulációk segítségével előre tudjuk jelezni a változó sűrűségű struktúrák mechanikai viselkedését, szükséges a különböző hőmérsékleten habosított polimer hab anyag pontos konstitutív modellezése és az anyagparaméterek nyomtatásihőmérséklet-függésének leírása. A 3D-nyomtatott habok jellemző terhelése nagy alakváltozásokkal járó összenyomás, amely véges rugalmas és nemlineárisan képlékeny deformációkkal is rendelkezik. Ezen komplex mechanikai viselkedés jól modellezhető a Deshpande-Fleck-féle roppanó hab modellel. Vizsgálataink során LW-PLA habosodó 3D-nyomtatott filament esetében végeztünk nyomóvizsgálatot és dolgoztunk ki paraméterillesztő eljárást a nyomtatásihőmérséklet-függő anyagi viselkedés leírására.

Kulcsszavak: 3D-nyomtatás, polimer habok, rugalmas-képlékeny deformációk, konstitutív modellezés, paraméterillesztés

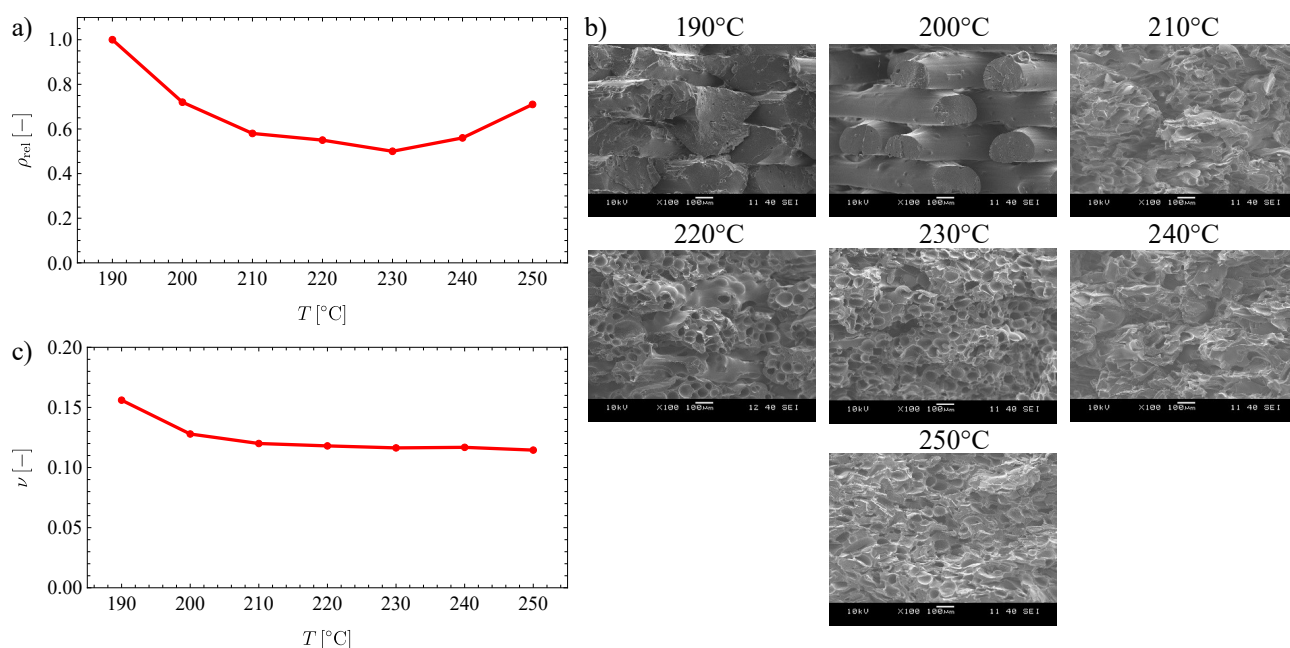
1. BEVEZETÉS

Az extrudáláson alapuló additív gyártási technológiák fejlődése lehetővé tette a bonyolult geometriájú, egyedi és kis szériás termékek költséghatékony gyártását [1]. Korábbi kutatások igazolták, hogy a többrétegű, rétegenként eltérő sűrűségű habszerkezetek felhasználhatók a termékek ütéselnyelő képességének javítására [2]. Ugyanakkor, jelenleg az ilyen szendvicsszerkezetű anyagok előállítása jellemzően két technológiai lépésben történik: az egyes habosított rétegek előállítása, majd szendvicstruktúra kialakítása [3, 4]. A fenti technológiai problémára megoldást jelenthet 3D nyomtatás során in-situ habosodó szálak alkalmazása, amely jelentős áttörést hozhat a 3D-nyomtatott habszerkezetek előállításában. Ez olyan anyagok használatát jelenti, ahol a habosodás a 3D nyomtatási folyamat során történik, és annak mértéke a nyomtatási paraméterek (pl.: hőmérséklet) változtatásával szabályozható. Ez lehetővé teszi a funkcionálisan rétegelt habok létrehozását kontrollált porozitással és változó sűrűségű rétegekkel [5].

Annak érdekében, hogy numerikus szimulációk (végesselemez szimulációk) segítségével előre tudjuk jelezni a változó sűrűségű struktúrák mechanikai viselkedését, szükséges a különböző hőmérsékleten habosított polimer hab anyag pontos konstitutív modellezése és az anyagparaméterek nyomtatási hőmérséklet-függésének leírása. A korábbi kutatási eredményeink alapján megállapítható, hogy a 3D-nyomtatott in-situ habosodó anyagok mechanikai viselkedése nagy deformációkkal és alakváltozásokkal jár, valamint jelentősek a maradó deformációk is köszönhetően a nemlineárisan keményedő tulajdonságnak [6].

A polimer habok nemlineáris rugalmas-képlékeny viselkedésének leírására számos megközelítés érhető el a szakirodalomban. A Gibson-Ashby-féle leírasmód mikromechanikai úton írja le a habok nemlineáris feszültség-alakváltozás karakterisztikáját a ρ_{rel} relatív sűrűség és empirikusan meghatározható geometriai paraméterek függvényeként [7]. Ezek a mikromechanikai modellek alkalmasak az alapvető anyagszerkezettani jellemzők becslésére (pl.: nyomószilárdság, folyáshatár, sűrűsödési alakváltozás), de nem alkalmazhatóak a véges alakváltozások formalizmusán alapuló numerikus szimulációk során. A mikromechanikai megközelítés mellett széles körben alkalmazzák az ún. fenomenológiai leírasmódot, amely a mutatott deformációkomponenseknek megfelelő konstitutív modell illesztésén alapul. A habok rugalmas-képlékeny deformációinak leírására az ún. *roppanó hab modellek* alkalmazhatóak [8]. Ezek szakirodalmi alapját a Desphande-Fleck-féle roppanó hab modell jelenti, amely bevezetését alumínium habokon kísérletei eredményei ösztönözték. Annak ellenére, hogy az anyagmodellt fémhabokra fejlesztették, számos szakirodalomban alkalmazzák őket a polimer habok rugalmas-képlékeny viselkedésének modellezésére is [9, 8].

Munkánk célja, hogy egy LW-PLA habosodó 3D-nyomtatott filament példáján keresztül bemutassuk a 3D nyomtatott habok rugalmas-képlékeny viselkedésének változását a nyomtatási hőmérséklet függvényében, valamint ismertessük az alkalmazható konstitutív modellt a hozzá kapcsolódó paraméterillesztési eljárással. A javasolt eljárás lehetővé teszi, hogy az in-situ habosodó anyagokból előállított szendvicsszerkezetek esetében a konstitutív modell paramétereinek változásával leírjuk a különböző sűrűségű rétegek mechanikai viselkedését.



1. ábra. A vizsgált 3D-nyomtatott hab a) relatív sűrűsége, b) elektromikroszkópos (SEM) felvételei és c) Poisson-tényezője a vizsgált 190 – 250°C nyomtatási hőmérséklet tartományon [6]

2. MECHANIKAI MÉRÉSEK

Vizsgálataink során egy kereskedelmi forgalomban is elérhető, 1,75 mm átmérőjű in-situ habosodó politejsav (PLA) filamentet használtunk (típus és gyártó: LW-PLA, COLORFABB B.V. (Belfeld, Hollandia)), amely a nyomtatási hőmérséklettől függően eltérően habosodik. A filament alapját jelentő PLA anyag üvegesedési átmeneti hőmérséklete 55 – 60°C, olvadási hőmérséklete 150 – 160°C. A gyártói adatlap szerint a habképzőszer bomlási hőmérséklete 230°C. A mechanikai vizsgálatok során használt próbatestek FDM technológiával "orgininal Prusa Mini" (Prusa Research, Cseh Köztársaság) 3D nyomtatóval készültek, amelynek hasznos munkatere 180 × 180 × 180 mm. A nyomtatáshoz egy 0,4 mm átmérőjű E3D V6 fűvókát használtunk. További 3D-nyomtatási paraméterek: 0,2 mm rétegmagasság, 100%-os kitöltöttség, ±45° kitöltési szög. A nyomtatási sebesség a kitöltésnél 115 mm/s, míg a kerületnél 45 mm/s volt. A mechanikai mérések során használt próbatest 20 × 20 × 20 mm oldalhosszúságú kocka volt. Az in-situ habosodás szempontjából releváns 190–250°C hőmérséklettartományon 10°C-os lépésekben vizsgáltuk az anyagi viselkedést, összesen 7 különböző nyomtatási hőmérsékleten: $T = 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250^\circ\text{C}$. A különböző hőmérsékleten nyomtatott próbatestek méretpontosságát úgy biztosítottuk, hogy a habosodás miatti térfogatnövekedés kompenzálása céljából hőmérsékletenként eltérő extrúziós szorzót állítottunk be.

Korábbi publikációnkban a próbatestek cellastruktúráját a különböző nyomtatási hőmérsékleten JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóp segítségével vizsgáltuk (lásd 1/b ábra), valamint sűrűségmérést is végeztünk, amelyből meghatároztuk a hab és a mátrix anyag sűrűségviszonyát leíró relatív sűrűség változását (lásd 1/a ábra), amelyet a

$$\rho_{\text{rel}} = \rho_{\text{hab}} / \rho_{\text{mátrix}} \quad (1)$$

összefüggés definiál. Az eredmények jól mutatják, hogy a habosodás 210°C fokon figyelhető meg először, ennél kisebb nyomtatási hőmérsékletek esetén a nyomtatásra jellemző rövid tartozkodási idő miatt nem volt elegendő az átadott hőmennyiség a habképzőszer bomlásához, így nem történt habosodás. A relatív sűrűség minimumát 230°C-os nyomtatási hőmérséklet esetében éri el, e felett már az ömledékszilárdság csökkenése, illetve a habképzőszer bomlása miatt a cellák egy része összeomlik, és így inhomogén cellaszerkezet alakul ki jelentősen kisebb cellasűrűséggel. Ezen kívül a húzópróbatesten elvégzett DIC mérések alapján az általánosított Poisson-függvény illesztésével leírtuk az anyag Poisson-tényezőjének változását a nyomtatási hőmérséklet függvényében, amelyet a 1/c ábra mutat [6].

2.1. Egytengelyű nyomómérések

A vizsgált 3D-nyomtatott próbatestek nyomtatási hőmérséklet-függő anyagmodellezéshez egytengelyű nyomóméréseket végeztünk a BME Polimertechnika Tanszékén lévő Zwick Z005 kétoszlopos szakítógéppel. A szakítógép egy AST KAP-E erőmérő cellával volt felszerelve, amely maximális mérési kapacitása 50 kN. A nyomófejek kezdeti távolsága $H_0 = 25$ mm volt, a keresztfejsebesség $v = 5$ mm/min. A mérés kezdetekor egy $F_{\text{pre}} = 2$ N nagyságú előterhelést alkalmaztunk $v_{\text{pre}} = 20$ mm/min keresztfejsebességgel. Minden nyomtatási hőmérséklethez 3-3 db próbatestet vizsgáltunk. A mért-erő elmozdulás ($F - u$) görbékből először a mérési feszültség - nyomási alakváltozás ($P - \varepsilon_c$) karakterisztikát határoztuk meg, felhasználva, hogy

$$P = \frac{F}{A_0}, \quad \text{és} \quad \varepsilon_c = \frac{u}{L_0}, \quad (2)$$

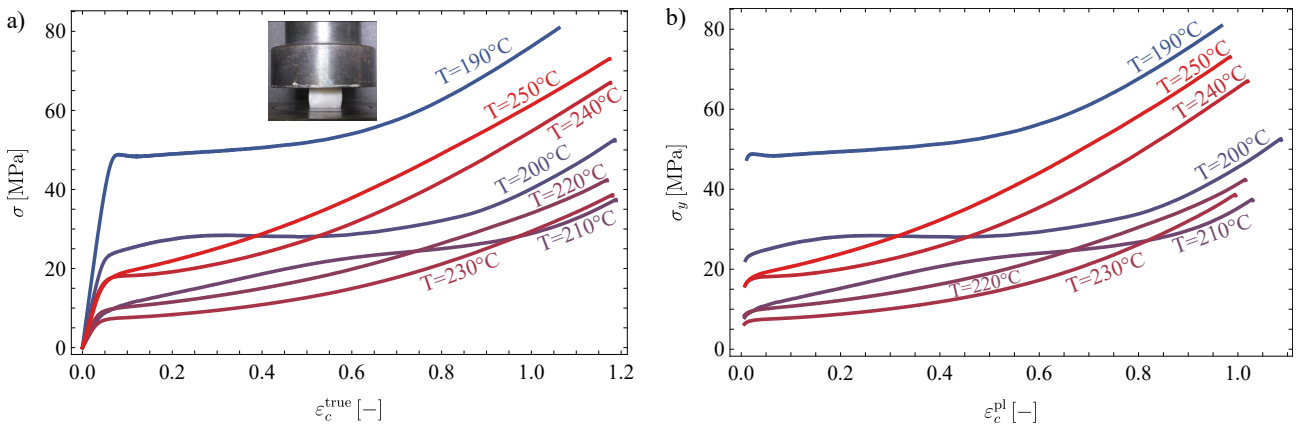
ahol F a mért erő, $A_0 = 400$ mm² a próbatest keresztmetszete, P a nyomófeszültség, u az elmozdulás, L_0 a próbatest magassága, míg ε_c a nyomási alakváltozás. A mérési eredmények feldolgozása során az ún. *slack correction* módszerrel korrigáltuk a nyomómérések kezdeti szakaszára jellemző kezdeti konvex felterhelési szakaszt, amely a nyomófejek és a próbatest teljes keresztmetszete között fokozatosan kialakuló érintkezés következménye. Felhasználva, hogy a pillanatnyi keresztmetszet kifejezhető az A_0 kezdeti keresztmetszet, a ν Poisson-tényező és ε_c segítségével, mint

$$A = A_0 \cdot (1 - \varepsilon_c)^{-2\nu}, \quad (3)$$

a valós feszültség - valós alakváltozás ($\sigma - \varepsilon_c^{\text{true}}$) karakterisztika előáll, mint

$$\sigma = \frac{F}{A} = P(1 - \varepsilon_c)^{2\nu}, \quad \text{és} \quad \varepsilon_c^{\text{true}} = -\ln[1 - \varepsilon_c]. \quad (4)$$

A különböző nyomtatási hőmérsékletek esetén mért valós feszültség - valós nyomási alakváltozás karakterisztikát a 2/a ábra szemlélteti egy-egy reprezentatív próbatest mért görbéje alapján. Az eredmények jól mutatják, hogy a nyomtatási hőmérséklet növelésével először jelentősen kisebb feszültségek ébrednek, de 230°C-os nyomtatási hőmérséklet felett ismét emelkedni kezdenek a feszültség értékek, amely teljes összhangban van azzal a tendenciával, amit korábban a relatív sűrűség változása mutatott.



2. ábra. A a) valós feszültség - valós nyomási alakváltozás $\sigma - \varepsilon_c^{\text{true}}$ illetve b) a keményedési görbék a folyáshatár - valós képlékeny nyomási alakváltozás $\sigma_y - \varepsilon_c^{\text{pl}}$ görbék különböző nyomtatási hőmérsékletek esetén

A következő lépésben rugalmassági modulusz (E) értékeit határoztuk meg a valós feszültség - valós nyomási alakváltozás görbék kezdeti érintőjének meredekségeként. Ezek numerikus értékét a 4. táblázat tartalmazza, illetve az értékek változását nyomtatási hőmérséklet függvényében az 4. ábra szemlélteti.

A fentiek felhasználásával előállíthatjuk a rugalmas-képlékeny anyagi viselkedés keményedési görbét, amelyet a folyáshatár - képlékeny nyomási alakváltozás kapcsolat ír le. Ehhez először meghatároztuk a képlékeny folyás kezdeti pontját, amelyet a lineárisan rugalmas, 1D Hooke-törvény ($\sigma = E \cdot \varepsilon_c^{\text{true}}$) görbétől való 10%-os relatív hibával rendelkező első mérési pont jelölt ki. A képlékeny folyás kezdeti pontja előtti pontokat elvetettük, az ezt követő mérési pontokhoz pedig meghatároztuk az $\varepsilon_c^{\text{pl}}$ képlékeny nyomási alakváltozás értékeit, felhasználva, hogy

$$\varepsilon_c^{\text{pl}} = \varepsilon_c^{\text{true}} - \varepsilon_c^{\text{rug}} = \varepsilon_c^{\text{true}} - \frac{\sigma}{E}, \quad (5)$$

ahol $\varepsilon_c^{\text{rug}}$ a rugalmas alakváltozás. A keményedési görbe meghatározásához az így kapott $\varepsilon_c^{\text{pl}}$ képlékeny nyomási alakváltozás és a hozzá tartozó folyáshatárt kell ábrázolnunk amelyet a 2/b ábra szemlélteti. Itt is megfigyelhető a korábban megfigyelt jelleg, miszerint a habosodás megindulásával kisebb a keményedés mértéke, de elérve a 230°C-os nyomtatási hőmérsékletre tartozó minimumát, a keményedési görbék ismét növekedni kezdenek, köszönhetően a kisebb expánzióknak.

3. ANYAGMODELL

Az előző pontban bemutatott anyagi viselkedés leírására a Deshpande-Fleck-féle [9] rugalmas-nemlineárisan képlékeny roppanó hab modellt alkalmaztuk. Ezt az anyagmodellt eredetileg alumínium habokon végzett kísérleti eredmények alapján vezették be, de azóta széles körben alkalmazzák polimer habok maradó deformációinak modellezésére is [8]. Az anyagmodell a kereskedelmi fogalomban lévő végesselemes megoldókban (Abaqus [10], LS-DYNA [11]) is elérhető, de kissé eltérő felírásmóddal. Kutatásunkban az LS-DYNA MAT154 *Crushable Foam* anyagmodelljében lévő felírásmódot alkalmazzuk, amely szerint a Φ folyási függvényt a

$$\Phi = \sigma_{\text{egy}} - \sigma_y \quad (6)$$

alakban írhatjuk fel, amelyben σ_{egy} az egyenértékű feszültség, míg σ_y a folyáshatár. A Deshpande-Fleck-féle elmélet szerint az egyenértékű feszültség

$$\sigma_{\text{egy}} = \sqrt{\frac{(\sigma_{\text{egy}}^{\text{HMH}})^2 + \alpha^2 \sigma_m^2}{1 + (\alpha/3)^2}} \quad (7)$$

alakban írható fel, amelyben $\sigma_{\text{egy}}^{\text{HMH}}$ a HMH-féle egyenértékű feszültség, míg σ_m a közép-feszültség, amelyek felírhatóak, mint

$$\sigma_{\text{egy}}^{\text{HMH}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s}, \quad \text{és} \quad \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - \sigma_m \mathbf{I}. \quad (8)$$

A fenti összefüggés egy ellipszis alakú folyási felületet ad meg, amelyet az α paraméter jellemez, amely kifejezhető a ν_{pl} képlékeny Poisson-tényező segítségével, mint

$$\alpha = \sqrt{\frac{9(1 - 2\nu_{\text{pl}})}{2(1 + \nu_{\text{pl}})}}. \quad (9)$$

A Deshpande-Fleck-féle anyagmodell esetében egy $\sigma_y(\varepsilon_c^{\text{pl}})$ nemlineáris keményedési függvényt szükséges definiálni, amely a habokra jellemző plató és sűrűsödési szakaszokat is magába foglalja. Mivel a habok jellemző terhelése az összenyomás, ezért a keményedési törvényben a $\varepsilon_c^{\text{pl}}$ nyomási képlékeny alakváltozás szerepel. Az LS-DYNA felírásmódját alkalmazva a keményedési törvényt felírható, mint

$$\sigma_y = \sigma_p + \gamma \frac{\varepsilon_c^{\text{pl}}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left[\frac{1}{1 - (\varepsilon_c^{\text{pl}}/\varepsilon_D)^\beta} \right], \quad (10)$$

amelyben σ_p , γ , α_2 és β paraméterek, míg ε_D a sűrűsödési alakváltozás. Ez utóbbi minden terhelési esetben más alakban írható fel, de közvetlenül származtatható a ρ_{rel} sűrűségértékből és a folyási felület α paraméteréből. Egytengelyű esetben

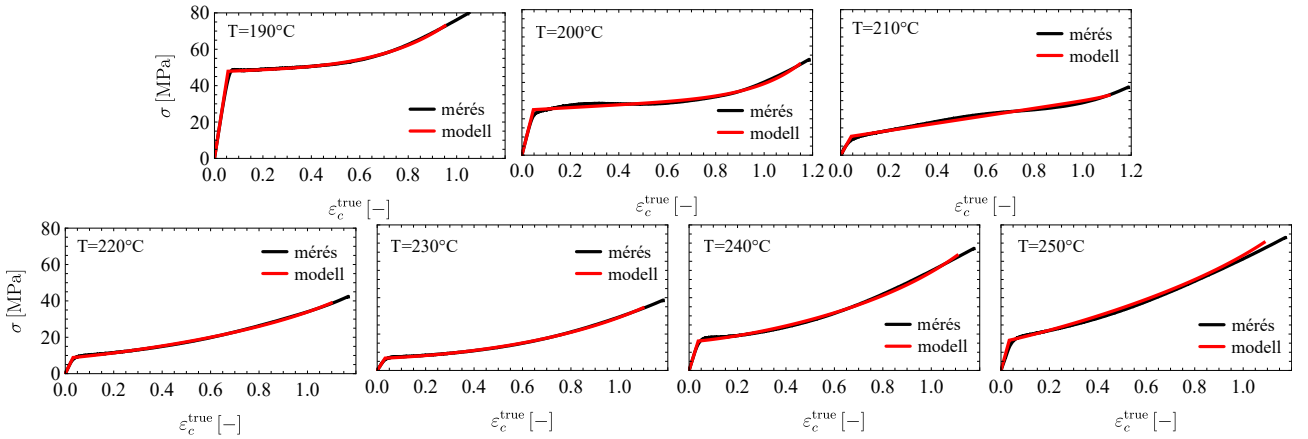
$$\varepsilon_D = -\frac{9 + \alpha^2}{3\alpha^2} \ln(\rho_{\text{rel}}). \quad (11)$$

4. PARAMÉTERILLESZTÉS

Az előző fejezetben bevezetett Deshpande-Fleck-féle anyagmodell keményedési görbáját illesztettük a különböző nyomtatási hőmérsékleten mért keményedési görbékre. Az illesztést *Wolfram Mathematica* szoftverben az *NMinimize* globális optimumkereső eljárással végeztük, amelyben a Q hibafüggvényt négyzetes hibaösszegként definiáltuk, mint

$$Q = \sum_{i=1}^N \left(\sigma_y^{\text{mért}} - \sigma_y(\varepsilon_c^{\text{pl,mért}}) \right)^2, \quad (12)$$

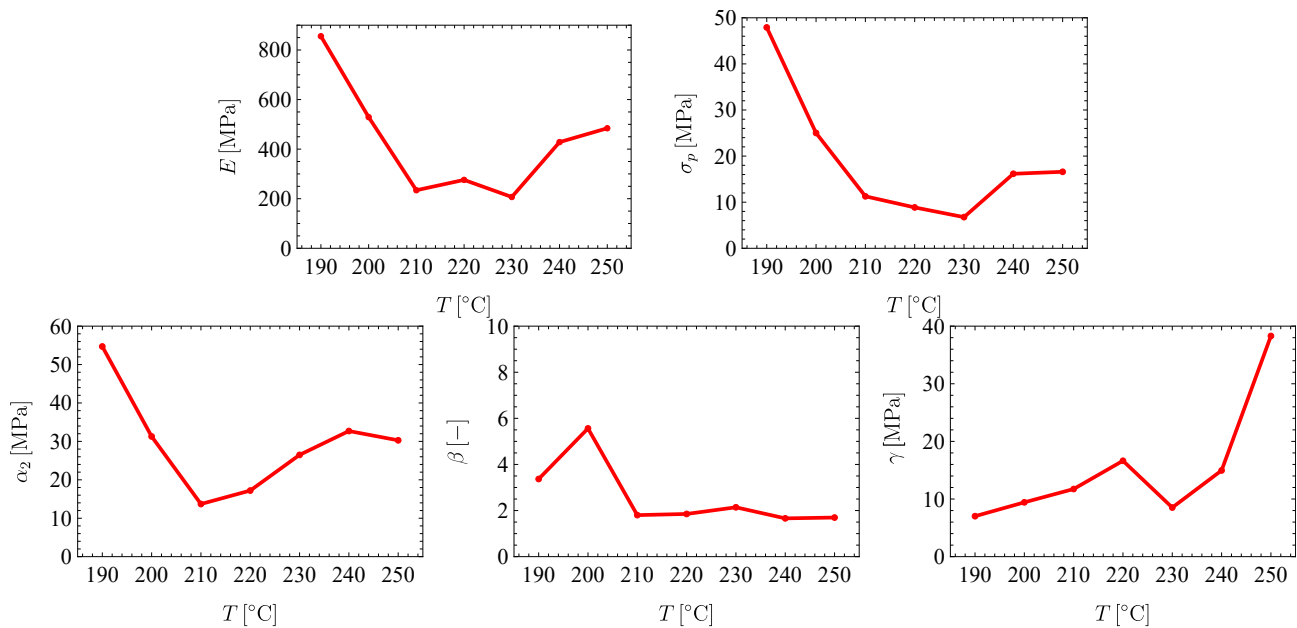
ahol N a mérési pontok száma, $\sigma_y^{\text{mért}}$ és $\varepsilon_c^{\text{pl,mért}}$ a mért keményedési függvények pontjai. Mivel az illesztés során most egytengelyű mérési adatokat használtunk, így az elliptikus képlékeny folyási felület α értéke nem befolyásolja az eredményeket. Ezt a szakirodalmi adatok alapján $\alpha = 1,96$ értékkel közelítettük [11]. A 3. ábra a mért és az illesztett valós feszültség - valós nyomási alakváltozási görbék összevetését mutatja. Az illesztett nemlineáris keményedési görbe illesztett paramétereinek numerikus értékét a 4. táblázat foglalja össze, míg az egyes paraméterek nyomtatásihőmérséklet-függését a 4. ábra szemlélteti.



3. ábra. Az illesztett és a mért valós feszültség - valós nyomási alakváltozás összevetése

5. KONKLÚZIÓ

Az illesztési eredményekből jól látszik, hogy a Deshpande-Fleck-féle rugalmas-képlékeny anyagmodell nagy pontossággal képes leírni a vizsgált in-situ habosodó anyag viselkedését a vizsgált nyomtatási hőmérséklet tartományon. A paraméterek változása jól igazodik az anyagszerkezettani megfigyelésekhez, az E kezdeti rugalmassági modulusz, a σ_p kezdeti folyáshatár és a sűrűsödési jelleget leíró α_2 paraméter nyomtatásihőmérséklet-függése az 1/a ábrán látható relatív sűrűségváltozásnak megfelelően változik. Megállapítható továbbá, hogy a keményedési törvény lineáris jellege (γ paraméter) magasabb hőmérsékleteken válik dominánssá. A nemlineáris keményedési törvényt jellemző paraméterek változása nem ennyire jól azonosítható a görbe nemlineáris jellege miatt, de mindhárom görbe esetében megfigyelhetőek változások. Az így létrehozott nyomtatásihőmérséklet-függő anyagmodell könnyen és hatékonyan implementálható a végeselemes megoldókban a változó sűrűségű szendvicsszerkezetek numerikus vizsgálatához és optimalizációjához.



4. ábra. A Deshpande-Fleck-féle modell paramétereinek változása a nyomtatási hőmérséklet függvényében

Az illesztett Deshpande-Fleck-féle anyagparaméterek a 190 – 250°C hőmérséklettartományon 1. táblázat

	E [MPa]	σ_p [MPa]	α_2 [MPa]	β [-]	γ [MPa]
190°C	855,48	47,91	54,70	3,36	7,02
200°C	529,18	25,01	31,29	5,56	9,42
210°C	234,21	11,27	13,69	1,81	11,73
220°C	275,94	8,86	17,21	1,85	16,64
230°C	206,89	6,75	26,49	2,14	8,82
240°C	428,32	16,16	32,69	1,66	14,95
250°C	484,19	16,59	30,28	1,69	38,29

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K 146236 és NKKP STARTING 149473 pályázata támogatta. A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] S. C. Altiparmak, V. A. Yardley, Z. Shi, J. Lin *Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives*. Journal of Manufacturing Processes. Elsevier, 2022, 83, 607-636
- [2] M. Tomin, D. Török, T. Pászthy, Á. Kmetty *Deformation analysis in impact testing of functionally graded foams by the image processing of high-speed camera recordings*. Polymer Testing. Elsevier, 2023, 122, 108014
- [3] N. Gupta *A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression*. Materials Letters. Elsevier, 2007, 61(4-5), 979-982
- [4] Y. Shimazaki, S. Nozu, T. Inoue *Shock-absorption properties of functionally graded EVA laminates for footwear design*. Polymer Testing. Elsevier, 2016, 54, 98-103
- [5] K. Kalia, A. Ameli *Additive manufacturing of functionally graded foams: Material extrusion process design, part design, and mechanical testing*. Additive Manufacturing. Elsevier, 2024, 79, 103945
- [6] M. Tomin, N. Lukács, Sz. Berezvai *Development of density-graded sandwich structures with in-situ foaming filaments in additive manufacturing*. SPE FOAMS Conference. 2024, pp. 7.
- [7] L. J. Gibson, M. F. Ashby. *Cellular solids: Structure and properties*, Cambridge University Press, 1997.
- [8] N. J. Mills. *Polymer Foams Handbook Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [9] V. S. Deshpande, N. A. Fleck *Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Elsevier, 2000, 48, 1253-1276
- [10] Dassault Systèmes: *Abaqus*, 2022.
- [11] ANSYS Inc.: *LS-Dyna*, version: R14.0.0.