

SLS technológiával nyomtatott hőre lágyuló poliuretán feszültség-nyúlás karakterisztikájának meghatározása

Determination of stress-strain characteristics of thermoplastic polyurethane printed with SLS technology

HURI Dávid¹, FILE Máté¹, NEMES Dániel^{1,2}, MAJOR Zoltán³, MANKOVITS Tamás¹

¹Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.
<https://mecheng.unideb.hu/>, huri.david@eng.unideb.hu

²Debreceni Egyetem, Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Informatikai Kar, 4028 Debrecen, Kassai Út 26.
<https://infphd.unideb.hu/>

³Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymer Product Engineering, 4040 Linz, Altenberger Straße 69.
<https://www.jku.at/institute-of-polymer-product-engineering/>

Abstract

Because thermoplastic polyurethane (TPU) is an elastomer, it has elastic and viscous properties. It is frequently used for sports equipment, automotive industry components, or special grippers used in automation due to its high flexibility, good environmental and wear resistance, and durability. TPU can be processed using 3D printing techniques; the highest level of precision and form freedom are offered by selective laser sintering (SLS) printers. Static finite element analysis using an adequately adjusted material model with displacement degree of freedom can be used to examine the design of the product that is produced in this way. The nonlinear elastic isotropic behaviour of rubber can be described by a hyperelastic material model. The material response to uniaxial, biaxial, and pure shear loads must be measured to fit the strain energy density-based models' parameters. The behaviour of the Sinterit Flexa Soft material under uniaxial loading is examined in this article.

Keywords: SLS, TPU, 3D printing, Sinterit Flexa Soft, material characteristics

Kivonat

A hőre lágyuló poliuretán (TPU) az elasztomerek csoportjába tartozik, azaz egy elasztikus és viszkózus tulajdonságokkal rendelkező polimer. Jó környezeti és kopásállóságának, továbbá nagymértékű rugalmasságának köszönhetően széles körben alkalmazott sporteszközöknél, járműipari alkatrészeknél, vagy éppen automatizálásban alkalmazott egyedi megfogókhoz. A TPU feldolgozható 3D nyomtatási technológiákkal, melyek közül a szelektív lézerszinterező (SLS) nyomtatók adják a legnagyobb pontosságot és formai szabadságot. Az így létrehozható termék tervezését statikai végeleemes analízissel és jól beállított elmozdulás szabadságfokú anyagmodellel lehet elvégezni. A gumi nemlineárisan nagymértékű rugalmas izotrop viselkedését hiperelasztikus anyagmodellel lehet leírni. Az energia alapú modellek paramétereinek illesztéséhez szükséges az egy- és kéttengelyű, valamint tiszta nyíró igénybevételre adott anyagi viselkedések meghatározása. Jelen cikk a Sinterit Flexa Soft alapanyag egytengelyű terhelés alatti viselkedését vizsgálja.

Kulcsszavak: SLS, TPU, 3D nyomtatás, Sinterit Flexa Soft, anyagi viselkedés

1. Bevezetés

A hőre lágyuló poliuretán (TPU) az elasztomerek csoportjába tartozik, azaz egy elasztikus és viszkózus tulajdonságokkal rendelkező polimer. A TPU feldolgozható 3D nyomtatási technológiákkal, melyek közül a szelektív lézerszinterező (SLS) nyomtatók adják a legnagyobb pontosságot és formai szabadságot. Egy új típusú periódikus nyílt cellás szerkezetek generálására alkalmas eljárást dolgoztak ki [1], majd azokat SLS nyomtatási eljárást alkalmazva TPU Flexa Black alapanyagból legyártva vizsgálták a rácsos kialakítás rugalmas viselkedését. A szerkezetek rugalmasságát analitikus úton határozták meg korlátozva a lineáris anyagi viselkedések tartományára a leírható alakváltozások mértékét.

A TPU kis erő hatására is jelentősen deformálódik, míg a terhelés megszűnése után visszanyeri kiinduló alakját. Statikai végeselemes analízis előkészítése során jól beállított elmozdulás szabadságfokú anyagmodellt kell alkalmazni. A TPU termékek tervezéséhez elengedhetetlen a feszültség és alakváltozás közötti törvényszerűségek ismerete és azok modellezése, melyre a legátfogóbb irodalom Bergström könyve [2]. Ehhez elsőként szükséges a TPU terhelési esetére adott mechanikai viselkedések matematikai leírására alkalmas anyagmodell kiválasztása, majd anyagspecifikusan meg kell adni az anyagegyenletekben szereplő paraméterek értékeit [3]. Ezen paraméterek meghatározása bizonyos esetekben egyszerű, anyagvizsgálatokból direkt úton kapható (rugalmassági modulus). Más esetben úgynevezett paraméter optimalizálási eljárást kell végezni, melyre célszoftverek állnak rendelkezésre, például a Hyperfit [4], vagy az MCalibration [5].

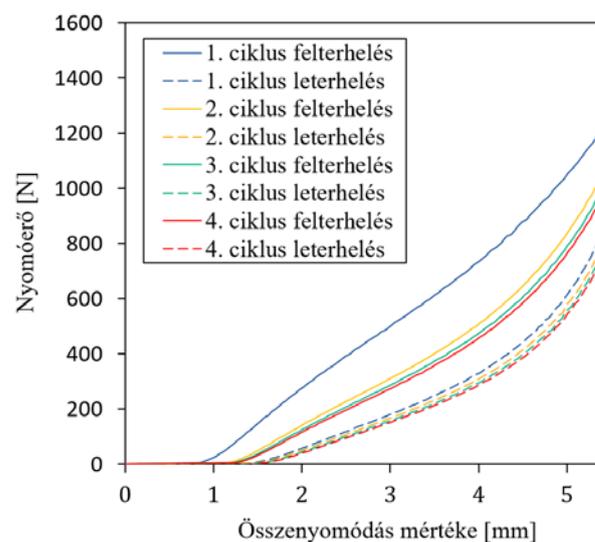
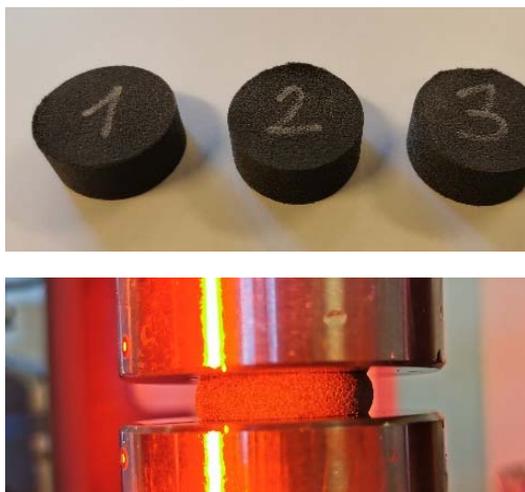
A matematikai modell az anyagi választ származtathatja a lokális anyagi viselkedések és interakciók mikromechanikai modellezéséből, vagy fenomenológiai modellezés során a mérhető makroszkopikus mennyiségek, mint a feszültség és alakváltozás közötti kapcsolatból. A nemlineárisan nagymértékű rugalmas izotrop viselkedés leírására a hiperelasztikus anyagmodell alkalmas, mely az ide vonatkozó kontinuummechanikai háttérrel az alakváltozási energia segítségével írja le a feszültség és deformáció közötti kapcsolatot [6–8]. A fenomenológiai modellek közé tartozik a teljesség igénye nélkül a Mooney-Rivlin [9,10], az Ogden [11], a Yeoh [12] és a mikromechanikai modellek közelítéséből létrehozott Arruda-Boyce [13] és Gent [14] anyagmodellek. Az energiaalapú modellek pontosságát az egytengelyű húzó és nyomó, a kéttengelyű húzó, az egyszerű nyíró terhelésre adott válaszokkal lehet vizsgálni.

Jelen munkában célunk a *Sinterit Flexa Soft* nyomtatóporból SLS nyomtatási technológiával előállított próbatetek vizsgálata, továbbá a hiperelasztikus anyagmodellek illesztéséhez szükséges feszültség-nyúlás karakterisztika meghatározása. A gyártó az alapanyag adatlapján az általános műszaki anyagjellemzőket adja meg (szakítószilárdság, szakadási nyúlás, Shore keménység) [15], melyek alapján az anyag nemlineáris viselkedésének leírására alkalmas anyagmodell nem dolgozható ki. Az SLS technológiával előállított alapanyag mechanikai tulajdonságait befolyásolja a nyomtatáshoz használt por finomsága. A nyomtatóport őrléssel különböző finomságúra lehet feldolgozni, mely ismerten hatással van az SLS nyomtatott anyag sűrűségére. Finom és durva őrlésű porból nyomtatott és fröccsöntéssel készített TPU alapanyagú szakító próbatetek mérését végezték el egy kutatásban. Az eredmények alapján a durva szemcséjű nyomtatópor rossz hatással van a mechanikai anyagparaméterekre [16]. Jelen vizsgálatunkban finom őrlésű port alkalmazunk és eltekintünk az egyéb gyártási technológiai paraméterek hatásának vizsgálatától is.

2. Anyag és módszer

2.1. Próbatestek előkészítése TPU alapanyagból SLS nyomtatási technológiával

A vizsgálatokhoz szükséges három darab hengeres nyomó próbatestet egy *Sinterit Lisa* (Krakkó, Lengyelország) SLS nyomtató segítségével készítettük el az ISO 7743 szabványban meghatározott geometriai méretekre az 1. ábrán láthatóan.



1. ábra. Az SLS technológiával nyomtatott hengeres TPU próbatest nyomóvizsgálati elrendezése és deformációja a maximális összenyomódáskor, továbbá az 1-es jelű próbatestre az előterhelő és mért ciklusok alatt felvett erő-elmozdulás karakterisztika

A próbatetek alapanyagául az 55-75 μm nagyságú *Sinterit Flexa Soft* nyomatóport választottuk. A G-kód létrehozásához a *Sinterit Studio Profiles* szeletelőszoftvert használtuk 0,075 mm-es rétegmagassággal, míg az egyéb technológiai paramétereket a gyártó által javasolt értékre választottuk.

2.2. Egytengelyű nyomóvizsgálat a nyomtatott hengeres TPU próbatetekeken

A nyomóvizsgálatokhoz az Instron 68TM-10 típusú (Norwood, MA, USA) elektromechanikus egytengelyű anyagvizsgáló gépet és az Instron AVE 2 (Advanced Video Extensometer) érintésmentes optikai nyúlásmérőt használtuk. A mérést az ISO 7743 szabványban leírt 'A' módszer alapján végeztük el az 1. táblázatban található mérési körülmények között. A mérési felépítés a 1. ábrán látható, a sűrűlódás csökkentésének céljából a nyomólapokat mechanikai polírozással készítettük elő és teflon alapú kenőolajat alkalmaztunk a nyomófelületeken. A szabványban előírt három előterhelési ciklust követően vettük fel a későbbi számításokhoz szükséges negyedik felterhelés alatt mért erő-alakváltozás félciklus pontjait, az 1-es jelű próbatestre kapott értékek az 1. ábrán láthatóak.

1. táblázat Az SLS technológiával nyomtatott hengeres TPU próbatetek nyomóvizsgálatának körülményei

Vizsgálati hőmérséklet, relatív páratartalom	23 [°C]; 50 [%]
Előterhelő ciklus száma, nagysága, sebessége	3 ciklus; 5 [mm]; 50 [mm/min]
Mért ciklus száma, nagysága, sebessége	4. ciklus; 5 [mm]; 50 [mm/min]
Mérési felépítés	Polírozott nyomólapok kenéssel

3. Eredmények

3.1. A nyomtatott TPU feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikája nyomó terhelésre

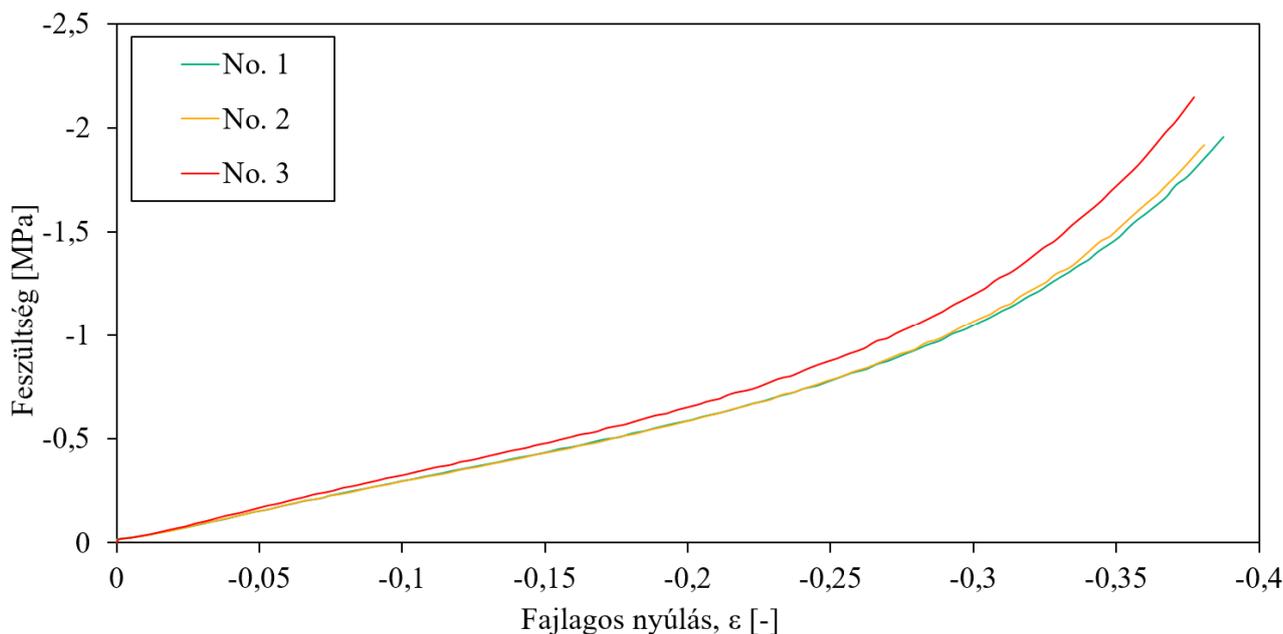
A próbatest kialakítása és a mérési körülményei is ideálisnak tekinthetők, így ebben az esetben az összenyomódás mértéke és a szükséges terhelőerő között közel lineáris összefüggés a jellemző kis alakváltozás esetén (20 [%]-os deformációig). A geometriai hibából adódó lineáristól eltérő mérési eredményeket ezen viselkedést figyelembe véve korrigáltuk. Sűrűlódásmentes csúszást feltételezve a próbatest és fémlap között, a nyomásból adódó feszültségeloszlás homogén, így a mérési feszültség

$$\sigma_{x,e} = \frac{F}{A_0}, \quad (1)$$

ahol A_0 az azonosító állapotban lévő keresztmetszet. A méretváltozást a terhelés előtti hosszra vonatkoztatva a fajlagos nyúlást (mérési fajlagos nyúlás, Biot-féle nyúlás) kapjuk, melyet a vizsgálandó hossz mentén összegezve az alábbi összefüggés határoz meg pontosan

$$\varepsilon_{x,e} = \frac{\Delta L}{L_0} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L_0} = \frac{1}{L_0} \int_{L_0}^L dL = \frac{1}{L_0} [L]_{L_0}^L = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 = \lambda_x - 1. \quad (2)$$

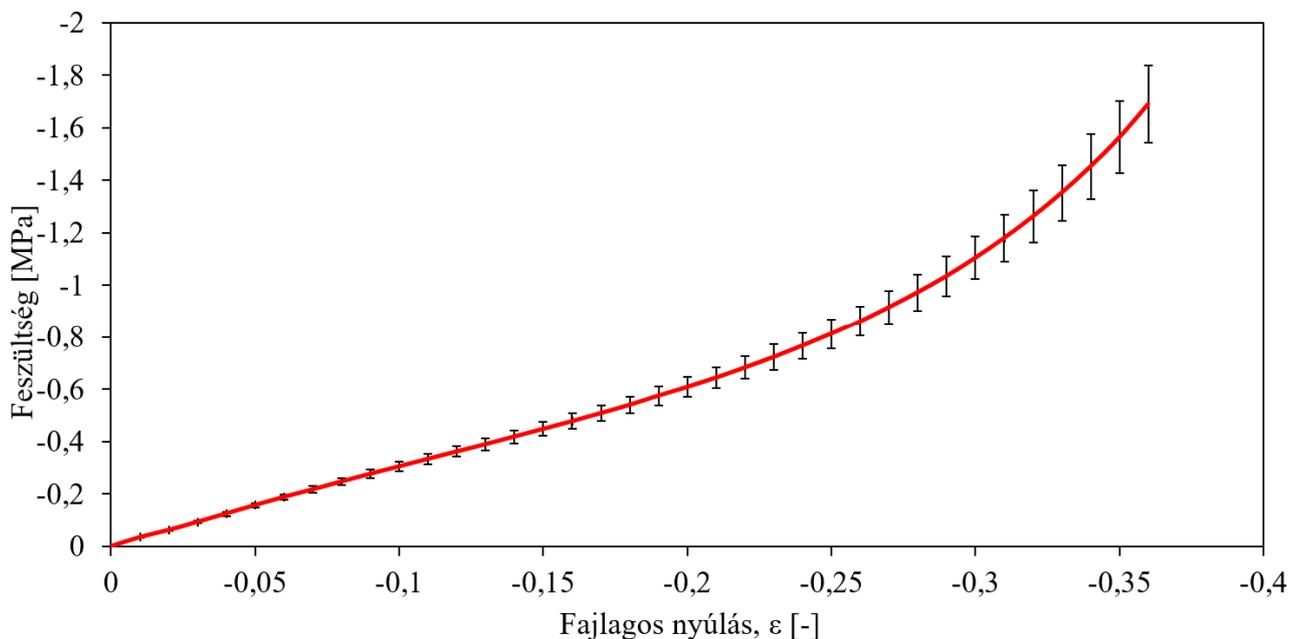
A (1-2) összefüggéseket felhasználva a próbatetekre meghatároztuk a mérési feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikákat, az eredményeket a 2. ábra mutatja. A karakterisztikák a 20%-os fajlagos nyúlásértékét követően erősen nemlineáris viselkedést mutatnak. A 3-as jelű próbatestre meghatározott feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztika eltérést mutat az első két próbatesten mért értékektől. Ennek oka lehet a megváltozott sűrűlódási feltétel vagy a próbatetek nyomtatási téren belüli pozíciójából adódó gyártási paraméterek változása. A hibaok azonosítására a sűrűlódás által nem befolyásolt terhelési esetre elvégzett mérési vizsgálattal lenne lehetőség mint például az egytengelyű húzóvizsgálat.



2. ábra. A próbatestekre számított mérnöki σ - ε jelleggörbe egytengelyű nyomóvizsgálat esetén

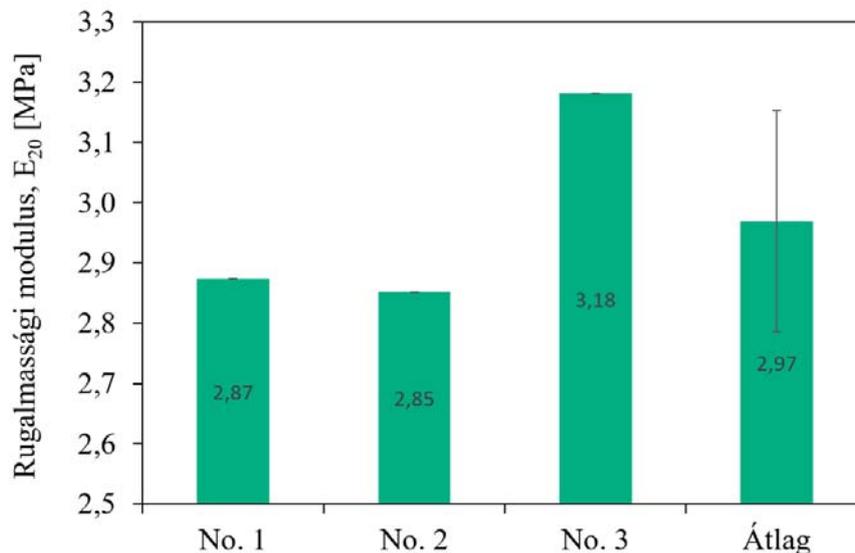
3.2. Az átlagos feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztika meghatározása lineáris interpolációt alkalmazva

A három darab gumi próbatest átlagos mérnöki feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikájának meghatározásához és az adathalmaz pontjainak csökkentése céljából a próbatestek $\varepsilon = \{0; 0,01; 0,36\}$ fajlagos nyúláshoz tartozó feszültségeit a mért értékek közötti lineáris interpolációval határoztuk meg Matlab nyelven írt szkript segítségével. Így megkaptuk az viselkedését leíró átlagos mérnöki $\sigma - \varepsilon$ jelleggörbét, melyen külön feltüntettük a próbatestek azonos fajlagos nyúlásértékhez tartozó feszültségértékeinek szórását is a 3. ábrának megfelelően.



3. ábra. A próbatestek átlagos mérnöki σ - ε jelleggörbéje és a mért értékek szórása egytengelyű nyomóvizsgálat esetén

A 2. ábrán a próbatestekre meghatározott feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikák közel lineáris viselkedést mutatnak 20%-os fajlagos nyúlásig. A mérési eredményekből így meghatároztuk a 0 – 20 [%]-os fajlagos nyúlás tartományban a TPU E_{20} rugalmassági modulusát, melynek eredményét a 4. ábra mutatja. A hármas jelű próbatestre felvett rugalmassági modulus értéke a karakterisztikák során tapasztaltakhoz hasonlóan eltér. Az átlagos rugalmassági modulus értékétől azonban kevesebb mint 10%-os relatív hibával tér el ami elfogadható a mérést befolyásoló súrlódási állapot mellett.



4. ábra. A nyomtatott TPU alapanyagú próbatestek rugalmassági modulusa, átlaga és szórása

4. Összegzés

Ezen munkában egy SLS technológiával nyomtatott hőre lágyuló poliuretán (TPU) próbatest egytengelyű nyomó terhelésre adott válaszána meghatározását ismertettük. Az egytengelyű nyomóvizsgálatok alatt a próbatestek hordósodása volt tapasztalható, mely a próbatest és nyomólap közötti súrlódás eredménye. A nyomóvizsgálat alatt a jelenség nem kerülhető el, azonban a nyomtatott próbatest nyomó felületeire tapadt olvadt porszemcsék eltávolításával a felületi érdességet lehetne javítani a jövőben. A terhelési ciklusok alapján a TPU viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. A próbatestekre meghatározott feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikák közül a 3-as jelű próbatest eredménye eltérést mutat. Ennek oka lehet az eltérő kenési állapot, melyet az alapanyag porózus szerkezetének olaj felvevő képessége elősegít, tovább a próbatestek nyomtatási téren belüli pozíciójából adódó gyártási paraméterek változása. A mérési adatmennyiség csökkentésére és az átlagos feszültség-fajlagos nyúlás karakterisztikának a meghatározására megfelelő eljárás az adatpárok lineáris interpolációval való számítása. A nyomó terhelésre kapott adatsor használható a hiperelasztikus anyagmodellek illesztésére. Az alapanyagra meghatároztuk a rugalmassági modulus értékét, mely segítségével az anyagi viselkedés jól közelíthető 20 %-os deformációig lineárisan rugalmas anyagmodellel.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OMAA 11öu5 - Entwicklung von Materialmodellen für 3D-gedruckte elastomere und kurzphaseverstärkte Verbundwerkstoffe (DE-JKU) projekt támogatta.

Irodalmi hivatkozások

1. Efremov, S.; Martínez, J.; Lefebvre, S. 3D Periodic Cellular Materials with Tailored Symmetry and Implicit Grading. *Comput. Des.* **2021**, *140*, 103086, doi:10.1016/j.cad.2021.103086.
2. Bergström, J. *Mechanics of Solid Polymers*; Elsevier, 2015; ISBN 9780323311502.
3. Tamás, P.; Bojtos, A.; Décei-Paróczy, A.; Fekete, R.T. *Végeselem Módszerek*; BME MOGI, 2014; ISBN 9789633131459.
4. Bortoli, D.D.; Wrubleski, E.; Marczak, R.J. Hyperfit – Curve Fitting Software For Incompressible Hyperelastic Material Models. *21st Brazilian Congr. Mech. Eng.* **2011**, doi:10.13140/2.1.4055.7448.

5. MCalibration; PolymerFEM LLC; Dover, MA, USA; <https://polymerfem.com/mcalibration/>;
6. Bonet, J.; Wood, R.D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*; 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, 2008; ISBN 978-0-511-39468-3.
7. Kozák, I. *Kontinuummechanika*; Miskolci Egyetemi Kiadó: Miskolc, 1995;
8. Ward, I.M.; Sweeney, J. *Mechanical Properties of Solid Polymers*; John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK, 2012; Vol. 1; ISBN 9781119967125.
9. Rivlin, R.S. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. I. Fundamental Concepts. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.* **1948**, *240*, 459–490, doi:10.1098/rsta.1948.0002.
10. Mooney, M. A Theory of Large Elastic Deformation. *J. Appl. Phys.* **1940**, *11*, 582–592, doi:10.1063/1.1712836.
11. Ogden, R.W.; A, P.R.S.L. Large Deformation Isotropic Elasticity – on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.* **1972**, *326*, 565–584, doi:10.1098/rspa.1972.0026.
12. Yeoh, O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1993**, *66*, 754–771, doi:10.5254/1.3538343.
13. Arruda, E.M.; Boyce, M.C. A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *J. Mech. Phys. Solids* **1993**, *41*, 389–412, doi:10.1016/0022-5096(93)90013-6.
14. Gent, A.N. A New Constitutive Relation for Rubber. *Rubber Chem. Technol.* **1996**, *69*, 59–61, doi:10.5254/1.3538357.
15. Flexa Soft Sinterit Available online: <https://sinterit.com/materials/flexa-soft/> (Utolsó letöltés: 2023.02.20).
16. Dadbakhsh, S.; Verbelen, L.; Vandeputte, T.; Strobbe, D.; Van Puyvelde, P.; Kruth, J.-P. Effect of Powder Size and Shape on the SLS Processability and Mechanical Properties of a TPU Elastomer. *Phys. Procedia* **2016**, *83*, 971–980, doi:10.1016/j.phpro.2016.08.102.