

KÉRDŐJELEK AZ ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁKBAN (MARADÓ FESZÜLTSEGEK POLIMEREK NYOMTATÁSÁKOR)

QUESTIONS OF ADDITIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES (RESIDUAL STRESSES OF 3D PRINTED POLYMERS)

Borbás Lajos Ph.D., Főiskolai Tanár EDUTUS Műszaki Intézet

Ficzere Péter Ph.D., egyetemi adjunktus BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS. A gyártástechnológia rohamos fejlődése eredményeként megvalósított termékek anyagtulajdonságai, határállapotú jellemzői, ciklikus terhelések hatására bekövetkező viselkedése mára azt mondhatjuk, sok tekintetben ismert. Tudjuk, a nyomtatott termékek anyagjellemzői nyomtatási irányfüggőek, az a tény is ismert, hogy az előállított termék viselkedése ortotróp anyagtörvényekkel jellemezhető [1], [2]. Ahhoz, hogy numerikus analízis segítségével a szerkezetek viselkedését előre le tudjuk írni, az anyagjellemzők kísérleti eljárásokkal történő meghatározásra van szükségünk [3]. A számos ismert jellemző mellett azonban még vannak kérdőjelek, amelyek a szerkezetek időbeni viselkedésére jelentős befolyással vannak. Ezek közé tartozik a nyomtatott anyagok, szerkezetek maradó feszültségeinek kérdése, amelyek ismerete elengedhetetlen a szerkezet viselkedésének pontos megértéséhez. Jelen dolgozat a polimerek „C technológiával gyártott elemeinek maradó feszültségeinek alakulásába nyújt betekintést.

ABSTRACT. The additive production technology, commonly called 3D printing, ensures the production of individually tailored products. The material properties (directional, orthotropic material properties) the boundary states and the behavior of products coming from cyclic loads today may be regarded as more or less known. To understand the behavior of the polymer materials and structures printed with heat-generation the investigation of the residual stresses generated by production technology is indispensable. In our paper we focused to the Fused Deposition Modelling (FDM) technology of polymers to reveal the residual stresses generated from one of the heat-induction manufacturing technologies.

1. BEVEZETÉS

Alkatrészek, szerelt szerkezeti egységek gyártásában a felépítéses - jelenleg a köznyelvben additív gyártástechnológiaként (vagy 3D nyomtatásként) – gyártási eljárások megteremtették környezetünk egyénre szabott kialakítását, az élet minden területén [4],[5], [6]. Ezen eljárások a réteges felépítésen alapulnak, amelynek során az alapanyag valamely hő bevezetéses eljárás alkalmazásával (függvényében annak anyagjellemzőire) halmazállapot változást követően felveszi a tervezett alkatrész alakját. Mindeközben két alkalommal is (a felhevítés majd a visszahűlés fázisában) térfogatváltozáson esik át, ennek következtében nagy felszínre, térfogatelemekre vonatkoztatva viszkózus állapotból szilárd halmazállapotba jutva egyenlőtlen hűlést szenved, amely maradó deformációk, így maradó feszültségek kialakulását eredményezi [7]. Jelen dolgozatunk a polimerek egy lehetséges gyártástechnológiájának eljárását, az FDM technológiát vizsgálja maradó feszültségek feszültségvizsgálat átvilágító technikájának alkalmazásával.

1.1. Az „Olvasztott, egymásra épülő formázás” (Fused Deposition Modelling, FDM)

Polimer termékek additív gyártástechnológiai eljárásai közül az utóbbi években (lejárt szabadalom) az egyik leggyakrabban használt eljárás a FDM technológia. Az eljárással extrudált polimer alapanyagból hevítőfejen (hőbevezetés) és a hozzá csatlakozó fűvőkán keresztül átjuttatva réteges lerakással készítjük el termékeinket. Az eljárás során lehetőségünk van a rétegvastagság, valamint a gyártás egyes beállítási paramétereinek, úgymint lerakási sebesség, felhevítési hőmérséklet, valamint a lerakó felület hőmérsékletének szabályzására [8]. Jelen dolgozatban a „Polylactic Acid” (PLA, Politejsav) alapanyagokat vizsgáltuk. Gyártás során az alapanyagot 220°C-os

hőmérsékletre hevítjük, ahol az megfolyik. Az anyag megfelelő helyre történt lerakását követően hűteni kell, így biztosítható a megfelelő feltétel az anyag kikeményedéséhez (polimerizáció befejeződése). Egy adott réteg annak lerakásakor még magasabb hőmérsékletű, mint környezete, valamint az a réteg, amelyre rányomtatjuk. Az éppen lerakott réteg lineáris mérete - a hőtágulás következtében - nagyobb, mint a teljesen kihűlt, szobahőmérsékletű darabé. Ez a tény a réteg hülésekor annak zsugorodását okozza, A zsugorodás mértéke számítható, a tervezett alkatrész megvalósításakor figyelembe vehető. A tárgy építésének kezdetén az első (alsó) rétegek a tárgyasztalra (platform) kerülnek. Ahhoz, hogy azon stabilan megálljon a nyomtatott tárgy a tárgyasztalhoz kell tapadnia, ahol melegen, kiterjedt méretében rögzül az asztalhoz. Hülése során így zsugorodásában gátolva éri el környezete hőmérsékletét, amely jelenség az anyagban meghatározott mértékű feszültséget indukál. Ennek oka a gyártás során a viszkoelasztikus állapotból történő egyenlőtlen hülés [9]. Meghatározására roncsolásos, valamint roncsolás-mentes eljárásokat alkalmazhatunk, melyek sorában az optikai feszültségvizsgálat alkalmasan megválasztott eljárása is figyelembe vehető. A tárgyasztalon levő anyag, annak folyamatos hőmérséklet csökkenése okán a benne kialakult feszültség hatására tapadása megszűnik, elválik a tárgyasztaltól (warping), felhajlik. Ez a jelenség – azon túlmenően, hogy rontja a tárgy alak- és mérethűségét, további kérdéseket vet fel az alkatrész terhelhetőségi határállapotaival,- így felhasználhatóságával kapcsolatban is.

1.2. Optikai feszültségvizsgálat alkalmazása 3D nyomtatott termék jellemzőinek ellenőrzésekor

Az optikai feszültségvizsgálat eljárása során az optikailag átlátszó (alapértelmezésben homogén, izotrop [10]) anyagot polarizációs szűrők között vizsgálva a terhelés hatására kialakuló alakváltozások interferencia kép formájában (rendszámkok és iránycsávok, melyek alkalmasak a deformációs mező mértékének, valamint a deformációs állapot irányainak meghatározására) megjeleníthetővé válnak. Az alkalmazott fényforrástól függően (monokromatikus vagy kevert fényforrás) az észlelt interferencia kép színes, vagy szürkeárnyalatos képként vizsgálható. A deformációs mezőkből a vizsgált anyag

jellemzőinek ismeretében annak feszültségi állapota meghatározható. A vizsgálati technika alapanyagai a technika fejlődésével rohamosan bővülnek, így napjainkban 3D nyomtatással is lehetőségünk nyílik feszültségoptikai vizsgálatokra alkalmas anyag előállítására [11], [12], [13]. Esetünkben a nyomtatást követően elkészített próbatest gyártása során keletkezett feszültségei, a maradó feszültségek is meghatározhatók. Amennyiben a késztermékben gyártási feszültségek keletkeznek, terheletlen állapotban is megjelennek a rendszámkok (színsávok), amelyek az anyagban lévő kezdeti deformációra, így a feszültségekre utalnak. A kialakuló színsávbrák elemzésével meghatározható az anyagban lévő feszültségek nagysága és jellege (húzó vagy nyomó). Így a különböző elrendezésben és különböző nyomtatási paraméterekkel történő gyártással készült darabokon terheletlen állapotban végzett vizsgálatokkal azok gyártási, maradó feszültségei kimutathatók. A kapott eredmények elemzésével a megfelelő gyártási paraméterek, elrendezések, technológiák meghatározhatóak annak érdekében, hogy a gyártás során keletkező feszültségeket csökkenteni tudjuk.

2. MÓDSZER

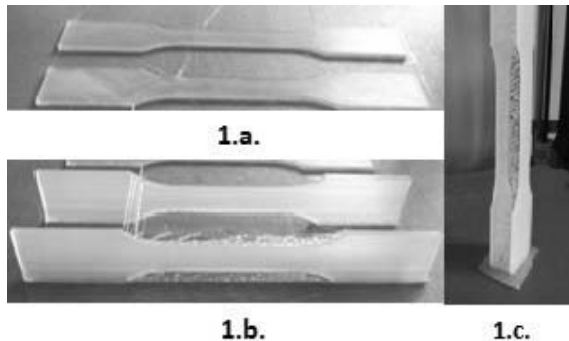
2.1 FDM technológiával gyártott termékek anyagjellemzői

A rétegről rétegre való építési gyártástechnológiából adódóan és az irodalomkutatásból azt feltételezhetjük, hogy a nyomtatott anyag nem izotrop. Ebben az esetben az anyagjellemzők a különböző irányokban eltérőek, azaz irányfüggőek. Ezért a különböző irányokban és különböző helyzetekben gyártottuk le a szabványos szakítóvizsgálatok során használt rövid szakító próbatesteket ($l=130$, $l_0=40$, $b=20$, $h=2$ mm, MSZ EN ISO 527-3).

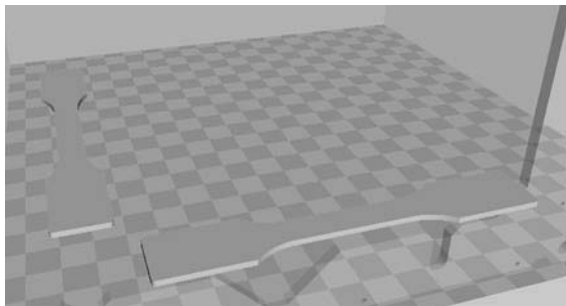
2.2. Próbatestek anyagjellemzők meghatározására

Vizsgálataink során alapvetően az anyagjellemzők tekintetében a nyomtatási irányfüggőségre, valamint a nyomtatott próbatestek feszültségmentes állapotára voltunk kíváncsiak. Fenti összefüggések tisztázása érdekében ugyanazon próbatestet síkjában fektetve, arra állítva, majd függőlegesen állítva is kinyomtattuk (1. ábra). Vizsgáltuk továbbá a

síkon belüli nyomtatás irányfüggőségét is annak érdekében (2. ábra), hogy a tervezők számára egyértelmű adatokat szolgáltatassunk a helyes anyagtörvény (anyagmodell) megválasztása érdekében.



1. ábra. Nyomtatási irányok az anyagjellemzők meghatározására. 1.a. Fektetett elrendezés, 1.b. állított elrendezés, 1.c. függőlegesen álló elrendezés



2. ábra. Nyomtatott próbatestek síkon belüli irányfüggés meghatározására

Elkészült próbaestjeinket a vizsgálgépben polarizációs szűrők közt vizsgáltuk alaphelyzetben kereszttezett polarizátor állásban (egész rendszámok meghatározása). A folyamatról készített felvételek elemzéséből úgy a kezdeti, valamint a tönkremenetelt követő feszültségállapot meghatározhatóvá vált.

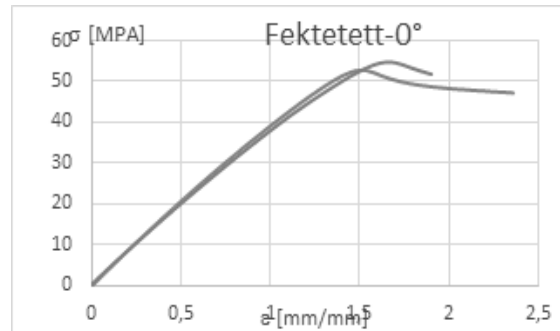
3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

A következőkben az egyes nyomtatási irányokhoz tartozó jellemző szakítóvizsgálati eredményeket, valamint a terhelési folyamat során rögzített optikai feszültségvizsgálati felvételeket mutatjuk be.

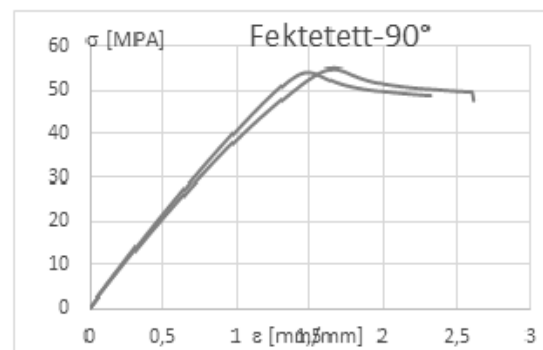
3.1. Fektetett helyzetű nyomtatás

A 3 ábrán egy fektetett helyzetű nyomtatás szakító diagramját láthatjuk a síkban egymásra merőleges nyomtatási irányokban készült diagramok bemutatásával, míg a 4. ábrán ugyanezen nyomtatási irányban készített feszültségoptikai felvételeket találunk. A 4. ábra tüzetes vizsgálatából láthatjuk, hogy a

kezdeti állapot közel feszültségmentes, valamint a tönkrement (elszakadt) próbatest is feszültségmentesnek tekinthető. Az adott síkban 90°-ban nyomtatott elrendezés gyakorlatilag azonos eredményeket szolgáltatott, így azok külön bemutatásától eltekintünk.

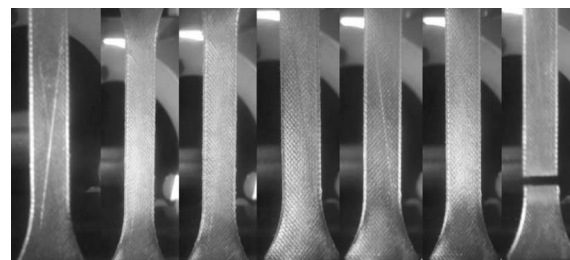


3.a.



3.b.

3. ábra. Fektetet elrendezésben nyomtatott próbatestek szakítóvizsgálati eredményei. 3.a. ábra 0° nyomtatási irány, 3.b. ábra 90° nyomtatási irány

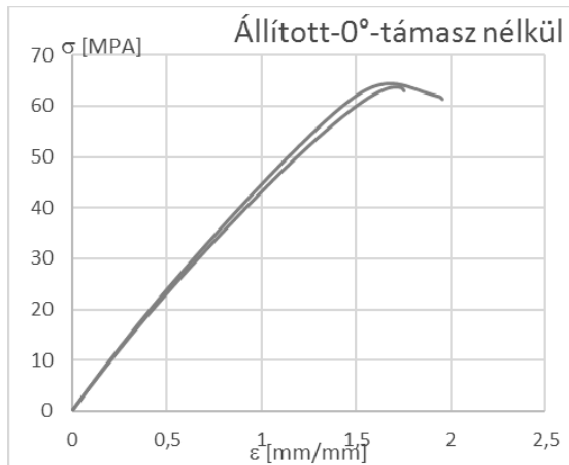


4. ábra Fektetett elrendezésben (0°) gyártott próbatesteken végzett szakítóvizsgálatok során polarizációs szűrők között készített egész rendszámú képsorozat

3.2. Állított helyzetű nyomtatás

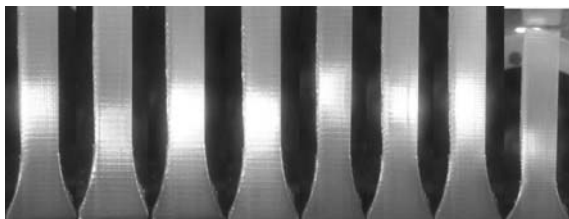
Ebben az elrendezésben próbaestjeinket támasztékkal, valamint a nélküli kivitelben is elkészítettük. Természetesen a korábban bemutatottak alapján itt is vizsgáltuk a síkon belüli izotropia kérdését az egymásra merőleges nyomtatási irányok eredményeinek feldolgozásával. Hasonlóan a fektetett kivitelnél

tapasztalathoz itt sem találtunk síkon belül irányfüggő viselkedésre utaló eredményeket. A nagyobb terhelhetőséget a támasz nélküli kivitelek mutatták, így jelen dolgozatunkban ezeket az eredményeket mutatjuk be (5. ábra).



5. ábra Állított elrendezésben nyomtatott próbatetek szakítóvizsgálati eredményei

A polarizációs optikai felvételeket a 6. ábra mutatja.

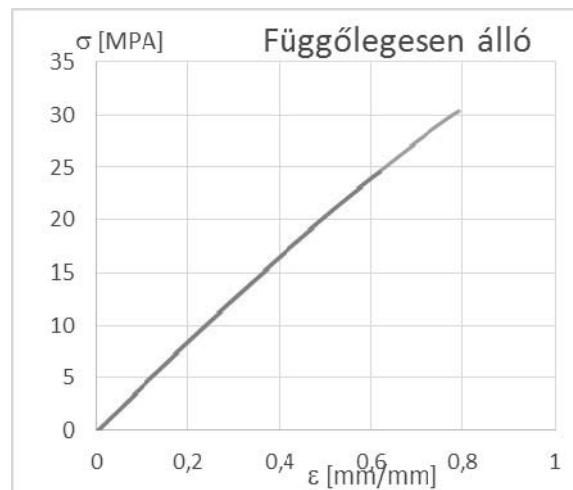


6. ábra Állított elrendezésben támasz nélküli gyártott próbatesteken végzett szakítóvizsgálatok során polarizációs szűrők között készített egész rendszámú képsorozat

A felvételek tanulmányozásakor megállapítható, hogy a vizsgálat megkezdésekor annak kezdeti, külső teher nélküli állapotában a próbatest nem feszültségmentes. A vizsgálat kezdeti szakaszában a próbatest polarizációs optikai képe alapján annak feszültségmentes állapota hozzávetőleg 400 N körüli terhelési értéknél alakul ki.

3.3. Függőlegesen álló elrendezés

A függőlegesen álló helyzetben nyomtatott próbatesteken végzett szakítóvizsgálatok eredményei a 7. ábrán láthatók.



7. ábra Függőlegesen álló helyzetben nyomtatott próbatest szakító diagramja

A függőlegesen állítva nyomtatott próbatestek terhelhetősége mintegy 50%-a a fektetve, ill. az állítva nyomtatottakénak.

3.4. FDM technológiával gyártott próbatetek szilárdsági jellemzői

3.4.1 Szakítóvizsgálatok összesített eredményei

Az 1. táblázat foglalja magában a különböző irányban gyártott próbatestjeink vizsgálati eredményeit. A táblázat eredményei jól mutatják, hogy a nyomtatási irány jelentős hatással van mind a terhelhetőségre, mind pedig a rugalmassági moduluszra.

1. táblázat. különböző irányban gyártott próbatestjeink vizsgálati eredményei

	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Young modulus E [MPa]
Fekvő-0°	53,73±0,99	2885,76 ± 29,53
Állított-0°	63,98925±0,36	3405,125 ± 51,225
Függőlegesen álló	27,464±2,928	2891,227 ± 6,695

3.4.2. Optikai feszültségvizsgálat

eredményeinek feszültségre történő átszámítása

A vizsgált próbatest geometriai adatai (vastagsága), valamint feszültségoptikai jellemzői (k vizsgálati anyag érzékenységi tényezője, amely tartalmazza a megvilágító fényforrás vonatkozó hullámhosszi adatait) alapján az észlelt rendszámok és a feszültségi állapot közti kapcsolat (null-balance kompenzáció alkalmazásával) az optikai feszültségvizsgálat alapegyenletének alkalmazásával az alábbi módon számítható:

$$\sigma = \sigma_1 = \frac{k \cdot E}{1 + \nu} = \frac{0,68 \cdot 10^{-3} \cdot 2,35 \cdot 10^4}{1 + 0,39} = 11,49 \text{ MPa} \quad (1)$$

ahol: k a próbatest érzékenységi tényezője,
 E a rugalmassági modulusa,
 ν a Poisson tényezője
 σ a szélső szál észlelt feszültsége

Mindezekre figyelemmel a 400 N körüli terhelési érték (lásd 6. ábra) a próbatestben mintegy 15 MPa húzófeszültséget jelent.

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

- Vizsgálataink eredményeképpen megállapítható, hogy a korábbi feltételezésünknek megfelelően - más additív technológiákhoz hasonlóan - a PLA anyag esetében is eltérők az anyagjellemzők az építés irányában és arra merőlegesen.
- A statikus terhelési kapacitás meghatározására irányuló szakítóvizsgálatok eredményeit megvizsgálva látható, hogy sem az eredmények közti eltérések, sem jellegbeli különbségek nem utalnak eltérő anyagjellemzőkre a sík különböző irányában. Ez a tény másként fogalmazva azt jelenti, hogy a nyomtatott anyag adott síkon belül iránytól függetlenül azonos tulajdonságokkal rendelkezi, így itt izotropnak tekinthető.
- Ugyanakkor erre a síkra merőlegesen, az építési irányban, függőlegesen álló próbatest esetében jelentős eltéréseket láthatunk mind az anyagjellemzők értékeiben, mind pedig a terhelésviselés jellege tekintetében. Ezen próbatestek terhelhetősége (terhelési kapacitása) nagyságrendileg a fele, mint a fekvő elrendezésben nyomtatott próbatesteké.
- Mindezekből megállapítható tehát, hogy az FDM típusú, additív gyártástechnológiákkal készített, hőbevezetéssel gyártott alkatrészek anizotrop anyagmodellel modellezhetők. Jellemzésükre az anizotrópia egy speciális fajtája az orthotrop anyagmodell a legalkalmasabb. Ezen belül is, az ún. semi-orthotrop anyagmodellel közelíthetjük legjobban a valóságot. Ebben a megközelítésben síkban izotropnak tekintjük az anyagot adott anyagjellemzőkkel, ugyanakkor az arra merőleges irányban ettől eltérő anyagjellemzőket kell használnunk, amely

jellemzők függvényei a nyomtatási paramétereknek (nyomtatási vastagság, sebesség, hőmérsékletek).

5. IRODALOM

- [1] Ficzer P, Borbás L, Material law for numerical analysis of rapid prototype products, In: Francesca Cosmi, Francesco Iacoviello (szerk.), 9th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics (YSESM 2010). Konferencia helye, ideje: Trieste, Olaszország, 2010.07.07-2010.07.09. Trieste: Università degli Studi di Trieste, 2010. pp. 9-12., (ISBN:978-88-95940-30-4)
- [2] Ficzer Péter, Borbás Lajos, Gyors-prototípus készítő eljárással gyártott termékek anyagtulajdonságainak meghatározása végeeselemes analízis számára, GÉP 60:(10-11) pp. 36-39. (2009)
- [3] Szűcs Nóra Alexandra; Szép Gergely; Szabó Ferenc; Kovács Norbert Krisztián, Korszerű gyártástechnológiák szerepe az egyszer használatos orvostechikai eszközök fejlesztésében, Polimerek, 2016, 2(8), pp 232-237, ISSN 2415-9492
- [4] Ficzer Péter, Borbás Lajos, Török Ádám, Usage of rapid prototyping in vehicle manufacturing, In: Stanislaw Borkowski, Dorota Klimecka-Tatar (szerk.), Toyotarity: Elements of the organization's mission. 225 p., Dnepropetrovsk: Yurii V Makovetsky, 2011. pp. 182-193., (ISBN:978-966-1507-70-7)
- [5] Ficzer P, Borbás L, Gyors prototípus anyagok orvosi alkalmazásának lehetőségei, kérdései, In: Borbás Lajos (szerk.), Korszerű anyagok és gyártástechnológiák alkalmazása a gyógyászatban. Konferencia helye, ideje: Tatabánya, Magyarország, 2014.05.30-2014.05.31. Tatabánya: Magyar Biomechanikai Társaság, 2014. p. 17., (ISBN:978-963-88981-2-8)
- [6] Horváth Ákos Márk, Ficzer Péter, Rapid prototyping in medical sciences, PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES / ARCHIWUM INŻYNIERII PRODUKЦИИ 8:(3) pp. 28-31. (2015)

- [7] Ficzere P, Borbas L, Szebenyi G, Reduction possibility of residual stresses from additive manufacturing by the optical photostress method, In: Aulova Alexandra, Rogelj Ritonja Alenka, Emri Igor, 33rd Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics: Book of Abstracts. 205 p., Konferencia helye, ideje: Portoroz, Szlovénia, 2016.09.20-2016.09.23. Ljubljana: Slovene Society of Experimental Mechanics, 2016. pp. 92-93., (ISBN:978-961-94081-0-0)
- [8] Györi M, Ficzere P, Use of Sections in the Engineering Practice, PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 45: pp. AiP-4. (2017)
- [9] Masing: Handbuch Qualitätsmanagement Gebundene Ausgabe – 14. Mai 2007 von Tilo Pfeifer (Herausgeber), Robert Schmitt (Herausgeber), V. átdolgozott kiadás, Carl Hanser Verlag München, 2007.
- [10] Thamm, Ludvig, Huszát, Szántó: Szilárdáságtan kísérleti módszerei. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
- [11] Ficzere P , Borbás L, New Application of 3D Printing Method for Photostress Investigation, MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS 3:(4) pp. 969- 972. (2016), doi: 10.1016/j.
- [12] Ficzere Péter, Borbás Lajos, Lovas László: Feszültségoptikai vizsgálatok fejlesztési lehetőségei 3D nyomtatási technológia segítségével, GÉP LXVI:(5-6) pp. 43-46. (2015), ISSN 0016-8572
- [13] Peter FICZERE, Usage of 3D printing in photostress investigation, PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES / ARCHIWUM INŻYNIERII PRODUKCJI 7:(2) pp. 16-19. (2015)