

FEMTOSZEKUNDUMOS LÉZERREL FELÜLETKEZELT FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMBETÉT TERMÉKÉNEK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF FEMTOSECOND LASER SURFACE TREATMENT ON INJECTION MOULDED PRODUCTS

Kun Krisztián ^{1*}, Weltsch Zoltán ¹, Liska János ¹

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2022.1.ENG.002>

Kulcsszavak:

felületi replikáció
femtosekundumos lézer
mikrostruktúrák
fröccsöntés

Keywords:

surface replication
femtosecond laser
microstructures
injection moulding

Cikktörténet:

Beérkezett 2021. október 29.
Átdolgozva 2022. március 10.
Elfogadva 2022. április 20.

Összefoglalás

Az autóiparban megnövekedett mérnöki és felhasználói igények miatt a műanyag alkatrészek minősége egyre aktuálisabb kérdés. Fröccsöntés során a formaüreg kitöltése kifejtő áramlással történik, amely a gyártási technológiai függvényében összetett héj-mag szerkezetet alakít ki a termékekben. A sebesség- és hőmérsékleti gradiens hatással van a kitöltési folyamatra, továbbá az ömledék áramlására nagymértékben hat a szerszámfelület is. A kutatásban a formaadó felületen az ömledékáramra eltérő hatást gyakorló felületi textúrákat hoztunk létre, amelyek kialakítása femtoszekundumos lézerrel történt. Célunk különböző feldolgozási technológiák mellett vizsgálni a kitöltés minőségét.

Abstract

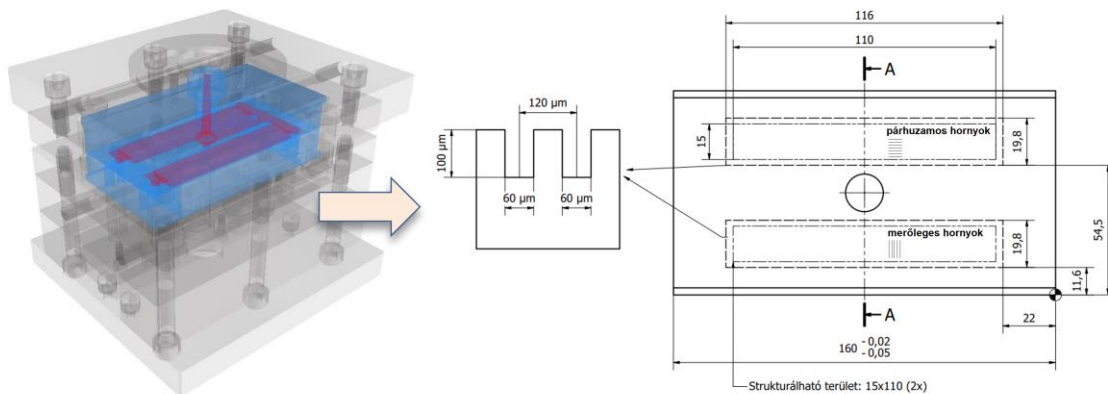
Due to increased customer needs in automotive industry, the quality of plastic parts is an increasingly relevant issue. During injection moulding, the tool cavity is filled with an expansion flow, which forms a complex shell-core structure in the products depending on the technological parameters. The velocity- and temperature gradient affects the filling process, and the melt flow is also greatly affected by the cavity surface. In this research, surface textures were created on the cavity surface that have different effects on the melt flow. These were manufactured with a femtosecond laser. The aim was to examine the quality of the filling with different processing technologies.

1. Bevezetés

A fal menti súrlódás következtében az ömledék dugószerű áramlással halad a formaüregben. Hosszú molekulájú anyagok áramlásánál a sebességprofilból adódik, hogy a fal melletti orientáció mértéke magasabb. A termék közepe felé haladva az orientáció csökken. Korábbi kutatásokra alapozva, a fröccsöntés során a szerszám formaadó felületének felületi minősége hatással van a kitöltésre és a hűtés hatékonyságára. A kutatás célja megállapítani, hogy eltérő mikrofelületi struktúrák kitöltését hogyan befolyásolják egyes folyamatparaméterek. Az alkalmazott fröccsöntő

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: kun.krisztian@gamf.uni-neumann.hu

szerszám terméke két szabványos hajlító próbatést. Használatát az álló oldali formaadó betét egyszerű geometriája indokolta, amely lehetővé tette felületén olyan mikrostruktúrák kialakítását, amelyek a fröccsöntés során az ömledékáramra eltérő hatást gyakorolhatnak. A betét felületén, a két gyártott próbatesttel közvetlen kapcsolatban lévő területeken az áramlási iránnyal merőleges és párhuzamos hornyok kerültek kialakításra. A polimer ömledék befolyásolására készült hornyok tervezett mélysége 100 μm (1. ábra). A felület texturálása egy Monaco 1035-80-40 típusú ipari femtoszekundumos lézerberendezéssel valósult meg. A cél olyan gyártástechnológia alkalmazása volt, amellyel a mikrostruktúrák egységes méretű és minőségű felületegységeket alkotnak a szerszám betéten. Olyan megfelelően összehangolt folyamatparaméterek beállítására volt szükség, amelyeknél a lehető legszabályosabb geometriák mellett a lehető legkisebb a hőhatásövezet. Kiemelt szempont a technológiára jellemző hibák elkerülése, például a plazma képződés, az esetleges olvadékmaradványok és az oxidáció. [1][2][3][4]



1. ábra. A kísérleti fröccsöntő szerszám CAD modellje és az álló oldali formabetét rajza.

A vizsgált szakirodalmak alapján megállapítható, hogy a femtoszekundumos lézerrel történő megmunkálás eredményét számos tényező befolyásolja. A beállítási paramétereket tekintve nincs egyetértés a kutatók között: különböző impulzushosszal, frekvenciával és teljesítménnyel vizsgáldtak, eltérő eredményekkel. [5][6][7][8]

A korábbi kutatások alapján: [9]

- mikrostruktúrának a 200 μm -nél kisebb felületeket értjük,
- a termékvastagság értéke minimum 2 mm lehet a megfelelő kitöltés érdekében,
- az elvárt méretpontosság a megmunkálás során 0,127 mm (0.005 inch).

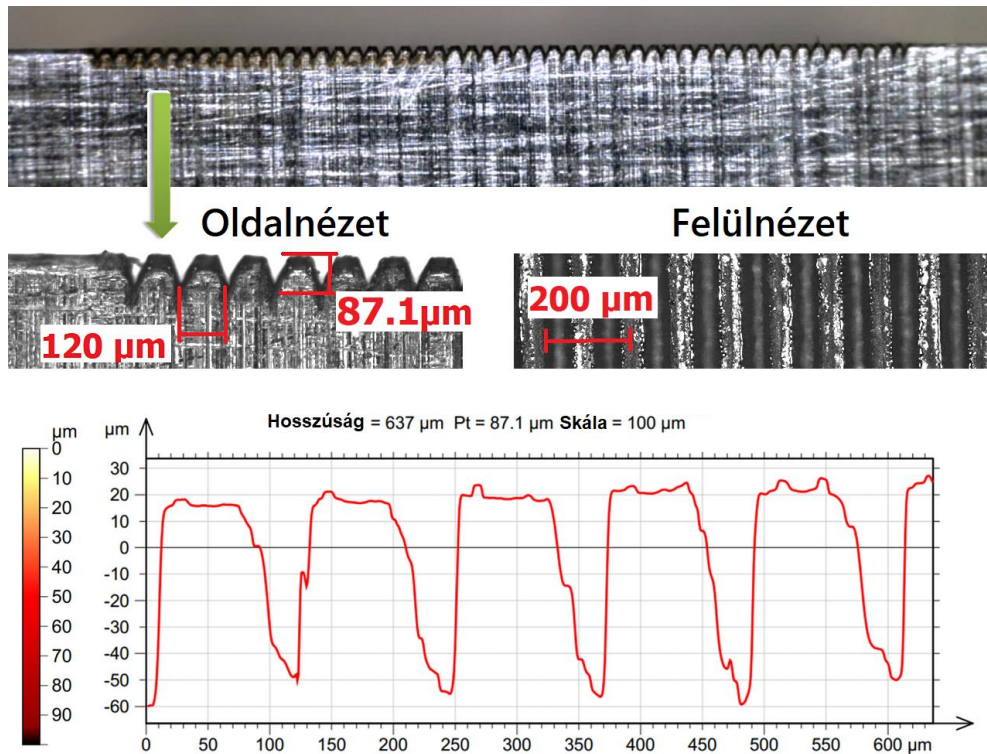
A femtoszekundumos lézeres megmunkálás során a formabetétet argongázban felületkezeltük. Az alkalmazott lézerberendezés egy LINOS F-Theta-Ronar típusú szkeneroptikával volt szerelve. Az optika segítségével irányíthatjuk a lézersugarat a felületre, egy $f = 254$ mm fókusztávolságú lencsén keresztül. Az alkalmazott technológiai beállításokat az 1. táblázat tartalmazza.

1. Táblázat. Alkalmazott gyártástechnológia a Monaco 1035-80-40 típusú femtoszekundumos lézerberendezéshez

Átlagteljesítmény	15 W
Energia	30 μJ (188 kHz-en)
Frekvencia	188 kHz
Hullámhossz	1035 \pm 5 nm
Impulzushossz	270 fs
Módus	TEM00, M2 <1,2
Pásztázási sebesség	5 m/s
Pásztázási ismétlések száma	30

1.1. A formabetét felületén kialakult mikrogeometriák elemzése

A formabetét felületére létrehozott, ömledékáramra párhuzamos és merőleges hornyok a nagyobb vizsgálati hossz miatt egy Keyence VHX-2000 típusú digitális mikroszkóppal, míg a pontosabb felületi topográfia érdekében egy Leica DCM8 típusú felületvizsgáló berendezéssel vizsgáltuk. A tervezett 100 µm-es horonymélység az alkalmazott technológiai beállítások mellett a 2. ábrán látható minőségben, átlagosan 87.1 µm mélyen került kialakításra. A hornyok ék alakja azzal magyarázható, hogy a fókuszeltolást követően a sugár divergenciája miatt, a fókuszhelyzettől pozitív irányban (a sugárderék fölött) is elértük az ablációs határt, ami tovább szélesítette a csatornát.



2. ábra. A formabetét felületének mikroszkópi- és felülettópográfiai képei

1.2. A fröccsöntéshez használt anyag bemutatása

A geometriai peremfeltételek rögzítését a fröccsöntött alapanyag meghatározása követte. A választás egy olyan polimerre esett, amelyre jellemző olyan ipari alkalmazhatóság, ahol előfordulhatnak mikrostruktúrák. A választott polimer egy TATREN RM 85 82 Clear márkánévre hallgató polipropilén (PP). Előnyös tulajdonsága, hogy kiemelt folyóképességgel és kiváló feldolgozási stabilitással rendelkezik. Jellemző tulajdonságait a 2. táblázat foglalja össze.

2. Táblázat. A vizsgált TATREN RM 85 82 Clear technikai adatlapja szerinti tulajdonságai [10]

Tulajdonságok	mértékegység	
Ajánlott feldolgozási hőmérséklet:		
Olvasási hőmérséklet	190 - 230	°C
pvT tulajdonságok:		
MFI (folyásindex)	85	g/10 min
Mechanikai tulajdonságok:		
Húzószilárdság	30	MPa
Nyúlás folyáshatárnál	12	%
Rugalmassági modulus	1250	MPa

2. A kísérleti módszer

A Taguchi kísérlettervezés alkalmazását a választott folyamatparaméterek optimális kombinációjának kiválasztása indokolta. Használatával megtalálható a választott faktorok és azok szintjei közül a legmegfelelőbb kombináció, az ideális gyártástechnológia, amely jelen kutatásban a legjobban kitöltött mikrogeometriát jelenti. Mivel a mikrofelületi textúrák a gyakorlatban esztétikai szerep mellett sok esetben funkcióval is (ragasztás, jelölés stb.) bírhatnak a formaüreg részletesebb kitöltése minőségi terméket eredményez. Célunk vizsgálni a betétet leképező polimer termék mikrostruktúráinak mélységét, összehasonlítva azokat a formaadó elemmel.

2.1. A kísérleti peremfeltételek

A középértékek meghatározásánál a fröccsöntő gép teljesítményét és az alapanyag tulajdonságait vettük alapul. A fröccsöntőgép beállításait a 3. táblázat foglalja össze.

3. Táblázat. A fröccsöntéshez használt gépbeállítások.
A kísérlettervezéshez használt változókat kiemeltük (A, B, C)

<u>Adagolás</u>		<u>Fröccsöntés</u>	
Kerületi sebesség	200 mm/s	Átkapcsolási nyomás	350 bar
Torlónyomás	50 bar	Fröccssebesség	(A) 80 cm³/s
Adag	40 cm ³		
<u>Dekompresszió</u>		<u>Utónyomás</u>	
Sebesség	3 cm ³ /s	Átkapcsolási pont	14 cm ³
Adag	3 cm ³	Utónyomás (nyomás)	(B) 350 bar
<u>Fröccsegység</u>		Utónyomás (idő)	30 s
Dűzni	200 °C	Hűtési idő	(C) 30 s
1. zóna	190 °C	Ciklusidő	61.8 s
2. zóna	180 °C		(változhat)
3. zóna	170 °C		

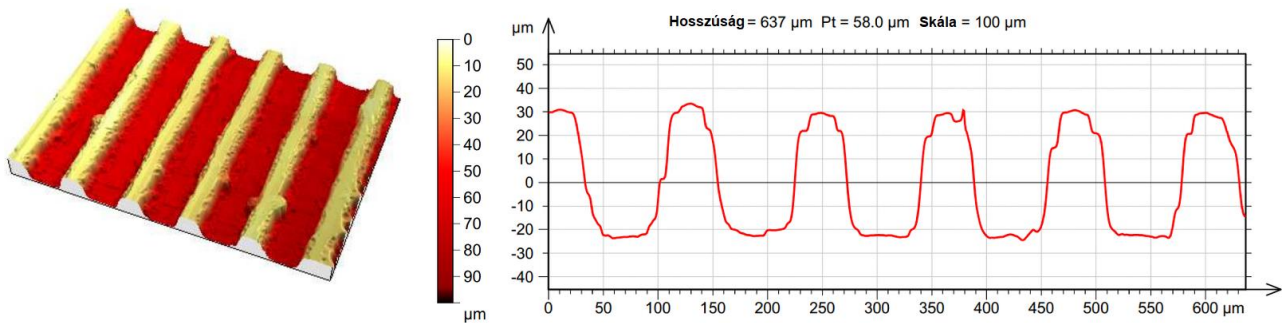
Taguchi filozófiáját követve, egy olyan kölcsönhatások nélküli kísérletterv került kialakításra a Minitab szoftverben, amelyben a faktorok nincsenek kapcsolatban egymással. A tapasztalatok alapján három technológiai változót vettünk figyelembe: a fröccssebességet (A), az utónyomást (B) és a hűtési időt (C). A kísérletterv szintjeit tekintve a középértékektől (amelyet a gyártói adatlap határozott meg) -30%-kal alacsonyabb és +30%-kal magasabb értékeket tartalmazott. Az így létrejött kísérletterv a 4. táblázatban látható.

4. Táblázat. Minitab 19 szoftver segítségével generált Taguchi kísérletterv [7]

#	Fröccssebesség [cm ³ /s]	Utónyomás [bar]	Hűtési idő [s]
1.	56	245	20
2.	56	350	30
3.	56	455	40
4.	80	245	30
5.	80	350	40
6.	80	455	20
7.	104	245	40
8.	104	350	20
9.	104	455	30

2.2. A felületi leképeződés mikroszkópi elemzése

A kitöltési minőség vizsgálatára Leica DCM8 típusú felületvizsgáló berendezést használtunk. Az egyes kísérleti beállításokból 3-3 terméket vizsgáltunk, minden termék esetében 3 mérési szakasz került elemzésre, a próbatest első, középső és utolsó harmadában, ~600 μ m hosszon. Így összesen 81 szakasz leképeződésének vizsgálata történt meg. A termékeken mért átlagos struktúra mélységeket táblázatban rögzítettük. Egy mérési szakasz eredményét szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra. Mikroszkópi vizsgálati eredmény párhuzamosan strukturált, magas fröccsöntési sebességgel (104 cm³/s) gyártott próbatest esetén.

3. A mérési eredmények kiértékelése

A Minitab szoftverben generált kísérletterv a mérési eredmények (mélységek) rögzítése után kiértékelhető. Az eredményekből látható, hogy a folyási iránnyal párhuzamos hornyok megvezették az ömledékáramot. A jelenség azzal magyarázható, hogy míg az ömledék áramlásával párhuzamos hornyok esetében az óriásmolekulák képesek orientálódni a fröccsöntés során, addig a merőleges hornyok esetében a molekulák nem állnak be az olvadékmozgással párhuzamos irányba, ennek következtében a mikrostruktúrák kevésbé, rosszabb minőségben replikálódnak. A párhuzamos hornyokban áramló ömledék kedvezően orientálódik és egyenletesebb kitöltést mutat. A merőleges és párhuzamos mikrostruktúrákat tartalmazó próbatesteken mért mélységek átlagértékeit a 5. táblázat tartalmazza.

5. Táblázat. A merőleges és párhuzamos mikrostruktúrával rendelkező termékeken végzett mikroszkópi mérések átlagértékei és a kitöltések minősége

Kísérletek száma [#]	Merőleges hornyok mélysége [μ m]	A szerszám 87.1 μ m mélységének %-os kitöltése [%]	Párhuzamos hornyok mélysége [μ m]	A szerszám 87.1 μ m mélységének %-os kitöltése [%]
1.	14.1	16.2%	23.8	27.3%
2.	15.1	17.3%	37.6	43.2%
3.	22.3	25.6%	36.2	41.6%
4.	27.9	32.0%	39.7	45.6%
5.	29.8	34.2%	48.2	55.3%
6.	34.7	39.8%	49.3	56.6%
7.	41.2	47.3%	55.8	64.1%
8.	40.3	46.3%	51.0	58.6%
9.	45.7	52.5%	58.0	66.6%

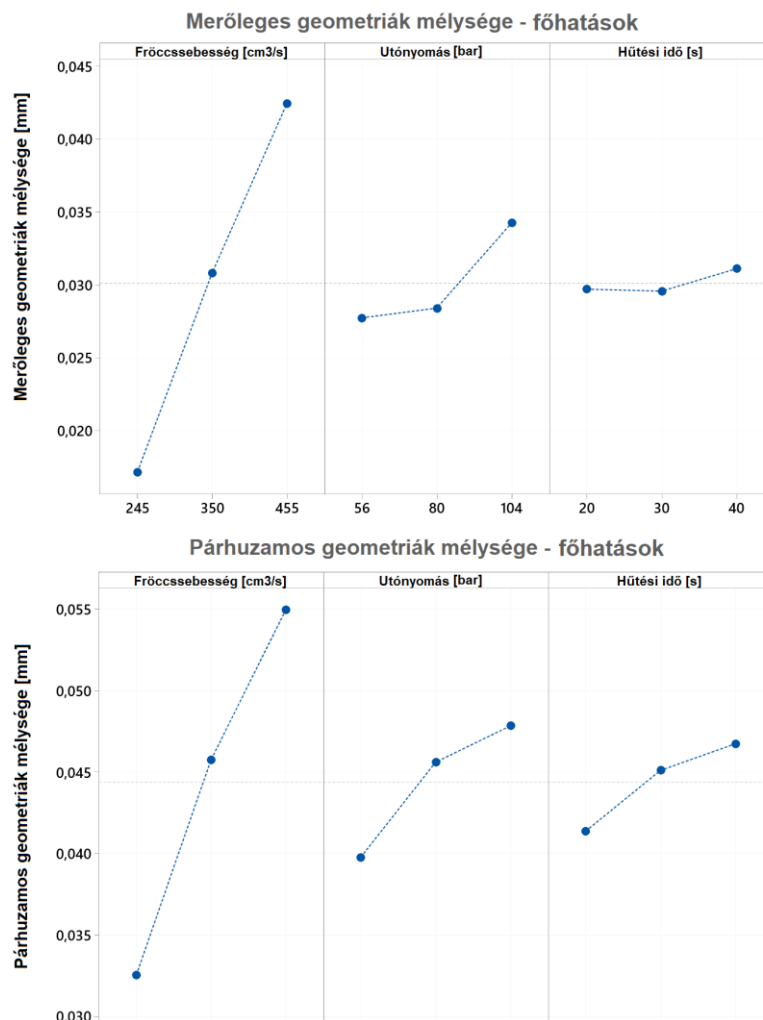
A kísérletterv kiértékelésének célja, hogy meghatározzuk mely tényezők vannak legnagyobb hatással a kitöltési minőségre. A Taguchi a robusztussággal szorosan összefüggő úgynevezett jel-zaj viszonyszámokkal (SN) számol. A jel-zaj viszony kiszűri a szórásból az átlag miatti növekedést

vagy csökkenést. A 4. táblázatban összegzett átlagértékek birtokában a Taguchi terv kiértékelhető a Minitab segítségével. Az értékeléshez használt célfüggvény a *Larger is Better*. (1)

$$SN_L = -10 \log \left(\sum_i \left(\frac{1}{y_i^2} \right) / n \right) \quad (1)$$

- y az adott faktorszintű kombinációra adott válaszok,
- n a válaszok száma.

Rangsorolva a faktorokat a legnagyobb befolyással a fröccssebesség volt (4. ábra). Az átlagértékhez képest 30%-os csökkenés drasztikus romláshoz vezetett a kitöltésben, míg a 30%-os növelés a legjobb leképeződést eredményezte. Az utónyomást 30%-kal csökkentve nem jelentkező számottevő változás, viszont növelve az értéket jelentős javulást mutatott a formaüreg kitöltése. A főhatások rangsorában a hűtési idő volt a legkisebb befolyással. A merőleges hornyokkal rendelkező termékeknél növelve a hűtési időt a ciklusidő a formaüreg kitöltésének szempontjából érdemtelenül növekszik. Ezzel szemben a párhuzamos struktúráknál a hűtési időt növelve megfigyelhető javulás a kitöltésben.



4. ábra. A Minitab szoftver által generált főhatások helyzete a kitöltési minőségre, az ömledékárammal merőleges és párhuzamos struktúrával rendelkező próbatestek esetén.

A kiértékelés alapján ahhoz, hogy a legmélyebb mikrogeometriai leképeződést érhessük el a fröccsöntött termékeken az ajánlott fröccsöntési technológia az alkalmazott faktorokat tekintve:

- Fröccssebesség: 104 cm³/s,
- Utónyomás: 455 bar,
- Hűtési idő: 20 s a merőleges, 30 s a párhuzamos hornyok esetén.

4. Összegzés

A kutatásban egy kísérleti fröccsöntő szerszámot alkalmaztunk, melynek terméke két szabványos próbatest. A szerszám formaadó felületén femtosekundumos lézerrel kialakított mikrostruktúrák keresztátlós vizsgálatát végeztük. Napjaink járműipari trendje szerint a polimer termékek felületi struktúrája kiemelt szerepet kap. Mivel a mikrofelületi textúrák a gyakorlatban esztétikai szerep mellett sok esetben funkcióval is (ragasztás, jelölés stb.) bírhatnak a formaüreg teljes kitöltése a minőségi késztermékek alapfeltétele.

A femtosekundumos lézerberendezéssel kialakított mikrostruktúrák (hornyok) orientációját az áramlási irányára párhuzamosan és merőlegesen alakítottuk ki, amelyek eltérően befolyásolták az ömledéket. A formaadó elemen kialakult felület mikrogeometriáját mikroszkóppal vizsgáltuk. Mivel a formaadó felület teljes struktúrált hosszát tekintve egységes mélységet és geometriát mértünk (köszönhetően a kontrollált anyagválasztásnak) replikáció vizsgálata következett.

A kutatás kezdeti célkitűzésének megfelelően, három folyamatparaméterek hatását vizsgáltuk a kitöltési minőség tekintetében: fröccssebesség, utónyomás, hűtési idő. Taguchi kísérletterv segítségével elemeztük a változók szerint gyártott termékek leképeződésének minőségét. A kísérleti terv elkészülte után az értékelés eredményeként technológiai ajánlás született részletes felületi replikációhoz.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052 számú pályázat támogatásával jött létre. A projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által meghirdetett pályázat keretében valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Solomon, N., Solomon, I., & Sanduleac, E. (2019). Material flow influence on the quality of molded parts. *Polymer Bulletin*, 76(11), 5981-6000.
DOI: [10.1007/s00289-019-02832-w](https://doi.org/10.1007/s00289-019-02832-w)
- [2] Uffe Arlø Theilade, Hans Nørgaard Hansen: Surface microstructure replication in injection molding, *Int J Adv Manuf Technol* (2007) 33:157–166
DOI: [10.1007/s00170-006-0732-y](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0732-y)
- [3] Ann-Katrin Holthusen, Oltmann Riemera, Jörg Schmützb, Axel Meiera: Mold machining and injection molding of diffractive microstructures, *Journal of Manufacturing Processes* 26 (2017) 290–294
DOI: [10.1016/j.jmapro.2017.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.014)
- [4] Sha, B., Dimov, S., Griffiths, C., & Packianather, M. S. (2007). Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3), 284-296
DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019)
- [5] Ortiz, R.; Aurrekoetxea-Rodríguez, I.; Rommel, M.; Quintana, I.; Vivanco, M.d.; Toca-Herrera, J.L. Laser Surface Microstructuring of a Bio-Resorbable Polymer to Anchor Stem Cells, Control Adipocyte Morphology, and Promote Osteogenesis. *Polymers* 2018, 10, 1337.
DOI: [10.3390/polym10121337](https://doi.org/10.3390/polym10121337)
- [6] Temmler, A.; Qi, S. Surface Structuring by Laser Remelting (WaveShape): Microstructuring of Ti6Al4V for a Small Laser Beam Diameter and High Scan Speeds. *Micromachines* 2021, 12, 660.
DOI: [10.3390/mi12060660](https://doi.org/10.3390/mi12060660)
- [7] Raimbault, O., Benayoun, S., Anselme, K., Maclair, C., Bourgade, T., Kietzig, A. M., ... & Donnet, C. (2016). The effects of femtosecond laser-textured Ti-6Al-4V on wettability and cell response. *Materials Science and Engineering: C*, 69, 311-320.
DOI: [10.1016/j.msec.2016.06.072](https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.072)
- [8] Johannes Preußner, Sabine Oeser, Wulf Pfeiffer, André Temmler, Edgar Willenborg: Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces *Trans Tech Publications Ltd, Switzerland* (2014) 568-573
DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568)
- [9] Eladl, A., Mostafa, R., Islam, A., Loaldi, D., Soltan, H., Hansen, H. N., & Tosello, G. (2018). Effect of process parameters on flow length and flash formation in injection moulding of high aspect ratio polymeric micro features. *Micromachines*, 9(2), 58.
DOI: [10.3390/mi9020058](https://doi.org/10.3390/mi9020058)
- [10] Technical Datasheet of Polypropylene TATREN RM 85 82 C, Seen: 2021.10.01.
https://www.molgroupchemicals.com/userfiles/products/80/80_tds_en.pdf