Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Járműipari szerszámok strukturált felületeinek vizsgálata mikro- és makrogeometriai jellemzők változtatásával

című doktori értekezés tézisfüzete

Szerző:

Kun Krisztián

okleveles gépészmérnök

Témavezetők:

Dr. Weltsch Zoltán
egyetemi docens

Dr. Líska János
főiskolai docens

Budapest
2023

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS 1

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS 2

2.1. FELÜLETI MIKROSTRUKTÚRÁK LÉTREHOZÁSA A GYAKORLATBAN 2
2.2. MIKROSZKOPIKUS MÉRETŰ FELÜLETEK LEKÉPEZŐDÉSE 3
2.3. A MECHANIKA TULAJDONSÁGOK ÉS A MIKROSTRUKTÚRÁK KAPCSOLATA 4
2.4. A SZÉN NANOCSŐ HATÁSA PP/CNT NANOKOMPOZITBAN 6
2.5. A SZAKIRODALOM KRITIKAI ÉRTÉKELÉSE 7

3. KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK 8

3.1. A KUTATÁSI TERV ISMERTETÉSE, CÉLOK MEGFOGALMAZÁSA 9

4. KÍSÉRLETI ANYAGOK, BERENDEZÉSEK ÉS ELJÁRÁSOK 11

4.1. AZ ELSŐ KÍSÉRLETSOROZATHOZ HASZNÁLT STRUKTURÁLT BETÉT 11
4.2. A MÁSODIK KÍSÉRLETSOROZATHOZ HASZNÁLT STRUKTURÁLT BETÉT 12
4.3. AZ ELSŐ KÍSÉRLETSOROZATHOZ FELHASZNÁLT ALAPANYAG 14
4.4. A MÁSODIK KÍSÉRLETSOROZATHOZ FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK 14
4.5. PRÓBATESTEK GYÁRTÁSA KOMPLEX KÍSÉRLETTERVEK ALAPJÁN 14
4.6. VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK ISMERTETÉSE 15
4.6.1. Mikroszkópi vizsgálatok 15
4.6.2. A folyási mutatószám (MFI) meghatározása 15
4.6.3. Hárompontos hajlítóvizsgálat 16
4.6.4. Charpy-féle ütve hajlító vizsgálat 16
4.6.5. Szakítóvizsgálat 16
4.6.6. Dinamikus Mechanikai Analízis - DMA vizsgálat 16

5. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK 17

5.1. AZ ELSŐ KÍSÉRLETSOROZAT EREDMÉNYEINEK KIÉRTÉKELÉSE 17
5.1.1. A szerszámbetétek lézeres felületkezelésének eredménye 17
5.1.2. A fröccsöntött próbatestek leképeződésének eredménye 19
5.1.3. Mikrostruktúrákból adódó geometriai merevség meghatározása 20
5.1.4. A hajlítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése 21
5.1.5. Az ütve hajlító vizsgálat eredményeinek kiértékelése 24

5.2. A MÁSODIK KÍSÉRLETSOROZAT EREDMÉNYEINEK KIÉRTÉKELÉSE 26
5.2.1. A szerszámbetétek lézeres felületkezelésének eredménye 26
5.2.2. A fröccsöntött próbatestek leképeződésének eredménye 27
5.2.3. A szakítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése 30
5.2.4. A DMA vizsgálat eredményeinek kiértékelése 31

6. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK 37

7. A KUTATÁSHOZ TARTOZÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE 39

8. IRODALOMJEGYZÉK 41

1. Bevezetés

A járműiparban a műanyag termékekkel szembeni elvárások az esztétika, a felületi minőség, a méretpontosság és a növekvő mechanikai tulajdonságok terén egyre nagyobbak. Számos alapanyagfejlesztés és különleges feldolgozási technológia lát napvilágot, melyeknek köszönhetően a fröccsöntés az ipar ezen szegmensének folyamatosan fejlődő, húzóágazata marad. A megnövekedett vásárlói igények miatt egyre meghatározóbb kérdés a műanyag alkatrészek minősége. [1] Fröccsöntés során a feldolgozási paraméterek és termikus jelenségek egzakt hatása nem ismert a kívánt mikrofelületek kitöltésére. Ugyanakkor a minőségi késztermék előállítása megköveteli a kitöltési- és a tömörítési fázis tökéletes ismeretét. [2]

A polimer termékeken leképeződött mikrostruktúráknak nem csak esztétikai, hanem funkcionális szerepük is lehet. Amennyiben a formaadó felületen merevítő bordákhoz hasonló mikrostruktúrákat hozunk létre, akkor azok fröccsöntés során megváltoztathatják a nyírófeszültség alakulását. Az ömledék a struktúrák területén orientálódik. A leképződött felületek továbbá a termék keresztmetszetének inerciáját is növelik. A formaadó felület megváltoztatása tehát befolyásolhatja a termék anyagszerkezetből és geometriából adódó merevségét.

A kutatás célkitűzése modern, járműipari alkalmazhatóságban jelentős fejlődés előtt álló gyártástechnológiával, fröccsöntő szerszám formaadó felületén speciális felületi struktúrák létrehozása, azok hatástanulmánya. Kutatásom során két, egymásra épülő kísérletsorozatot végzek el, amelyekben próbatest-fröccsöntő szerszámok formaadó felületén femtoszekundumos lézer segítségével mikrostruktúrákat hozok létre. Első esetben a struktúrák ömledékfronthoz mért orientációjának-, míg a másodikban az mélységüknek hatását vizsgálom. Cél olyan tudományos- és ipari értékkel bíró eredmények biztosítása, amelyekkel kimutatható, hogy a módosított formafelület a polimer ömledék áramlására-, ezen keresztül a felületek kitöltésére- és a fröccsöntött termékek mechanikai tulajdonságaira milyen befolyást gyakorol. Alapanyagnak járműipari alkalmazású polipropiléneket, illetve azok újrahasznosított és szén nanocsővel erősített változatait használom.

2. Irodalmi áttekintés

A kutatásomban igazodva a járműipar fejlődési tendenciáihoz a legnagyobb részarányban használt gyártási eljárást, a fröccsöntést és a legnagyobb volumenben feldolgozott alapanyagot a polipropilént (PP) alkalmaztam. Ugyanakkor célom nem alapanyag-fejlesztésre irányult, hanem a fröccsöntő szerszám formaadó felülete és a polimer ömledék közötti kapcsolat vizsgálatára. [3]

2.1. Felületi mikrostruktúrák létrehozása a gyakorlatban

Mikrostruktúra kifejezést a szabvány szerint [4] a polimertechnikában is használják, mérettartománya a fellelhető szakirodalomi állásfoglalások szerint 1 µm-től 100 µm-ig terjed. B. Sha és mtsai. tanulmányukban ugyanakkor 200 µm méret alatti felületegységekként hivatkozott a mikrostruktúrákra. [5]

A struktúráknak nem csak esztétikai, hanem a termék mechanikai tulajdonságait módosító funkciói is lehetnek. Létrehozásuk számos gyártástechnológiával megvalósítható. [6]

Femtoszekundumos lézerek alkalmazása más felületsturkturálásra alkalmas eljárásokhoz képest, ipari körülmények között előnyös lehet, hiszen:

- A mikroforgácsolás legnagyobb hátrányát, a bonyolult szerszámgeometria-kialakítást és szerszámkopást kiküszöböli.
- A fotokémiai maratáshoz hasonlítva nem igényel vegyi anyagokat és egyéb fogyóeszközöket, így nem termel veszélyes hulladékot.
- Más termikus eljárásoknál kedvezőbb, hiszen a hőhatás övezet elhanyagolható.
- A mikro-szikraforgácsoláshoz képest a folyamat gépi ideje számottevően kevesebb. [7], [8]

Calabrese L. és mtsai. kutatásukban rámutattak arra, hogy az eljárás alternatívája jelenhet olyan termikus energián alapuló gyártási módszereknek, mint az elektro-erózió vagy a kémiai energiát hasznosító litográfiai megmunkálások. [9]–[14]

2.2. Mikroszkopikus méretű felületek leképeződése

A mikrostrukturált alkatrészek sorozatgyártásában is kulcsfontosságú technológia a fröccsöntés, hiszen az egy termékre vetített költséghányad alacsony, így ipari léptékkel mérhető volumen jellemzi. A polimer termékek felületén kialakuló mikrostruktúrák a formaadó felületek leképezésével jönnek létre, így felületreplikációról beszélhetünk. A strukturált felületű alkatrészek minőségét számos paraméter befolyásolhatja.

Uffe Arlø Theilade és Hans Nørgaard Hansen kutatásuban megállapították, hogy a hőmérséklet egy fontos tényező a replikáció során, ugyanis emelve az ömledékhőmérséklet értékét a mikrostruktúrák kitöltése közel a duplájára nőtt. Hasonló magasságváltozás tapasztalható a fröccssebesség emelése esetében. [17]

Attia U. és mtsai. által jegyzett kutatási összefoglalóban felhívták a figyelmet arra a jelenségre, miszerint a magas szerszámhőmérséklet csökkentheti a megdermedt réteg vastagságát és késlelteti az üreg lehűlését, így több anyag juthat be a mikrostruktúrákba. A kutatók több publikációs eredményre hivatkozva megfogalmazták az „anyag hezitálás” kifejezését, amelyet arra a hatásra vonatkoztattak, ahol az ömledék nagy sebességgel lép be a strukturált szerszámüregbe, majd a mikrostruktúrákat kihagyja és „átfolyik” felettük. Ezeket a kitöltetlen területeket az ömledék csak a fröccsöntési fázis végén, az utónyomás hatására tudta leképezni. [18]–[20]

B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths és M.S. Packianather mikroméretű formák leképeződését vizsgálták. PP alapanyagnál ún. gyűrűk kialakulását tapasztalták, ami magyarázható, hogy az anyag „hezitál”, vagyis ideiglenesen megáll és csak a végső üregnyomás elérése után tölti ki a mikrofelületeket. A jelenség az olvadék külső rétegének dermedéshez vezet, miközben az olvadékáram belseje tovább halad. Ezt ellensúlyozva a fröccssebesség és az ömledékhőmérséklet növelésével érték el azt, hogy több ömledéket tudtak bejuttatni a maximális üregnyomás elérése előtt. [5]

Chang H. és Young W. kutatásukban megállapították, hogy a hűtési idő változtatásával a zsugorodás mértéke szignifikánsan változhat. [21]

Yokoi H. és mtsai kutatásukban a kitöltés minőségének mérőszámaként meghatározta a TR tényezőt (Transcription Ratio). A leképződés jóságát (minőségét) vizsgáló TR-tényező lényegében a szerszámon kialakított struktúra mélységét hasonlítja össze a terméken leképzett felület maximális magasságával. A kutatók a vizsgálatuk során fontos megállapítást tettek, miszerint bár korábbi eredmények arra utaltak, hogy a mikrostruktúrák leképezésekor a szignifikáns tényezők hőmérséklethez köthetők (ömledék- és szerszámhőmérséklet), emelésüknek korlátot szab az anyag degradációja és az a tény, hogy a magasabb szerszámhőmérséklet hosszabb hűtési időt, így hosszabb ciklusidőt is jelent.

2.3. A mechanika tulajdonságok és a mikrostruktúrák kapcsolata

Pantani R. és mtsai. kutatásukban rámutattak, hogy a fröccsöntési folyamat során mindig létrejön valamilyen mértékű molekulaorientáció, amely a fröccsöntött termék keresztmetszetében különböző. [22] Yin J. és mtsai méréseikkel bizonyították, hogy fröccsöntési folyamat során polimer ömledék zárt üregben (szerszámbetét) való áramlásakor, a fal melletti rétegek sebessége, az üreg közepén áramlókéhoz képest kisebb lesz a súrlódás következtében. [23]

Belina K. tudományos közleményében kiemelte, hogy a sebességprofilból adódóan, a fal melletti orientáció mértéke magasabb, mint az üreg közepén. A folyamat során burkoló hártya fejtődik rá a szerszám falára, amely tovább hűl. A fal melletti réteg nyújtva orientált. A még ömledék állapotú és már megszilárdult rétegek közötti nyíróhatás hozza létre a nyírt orientált réteget, majd a termék közepe felé haladva, kevésbé orientált, vagy orientálatlan rétegeket találunk. [2] Ezen hatások következtében a fröccsöntött próbatestekben egy bonyolult héj-mag szerkezet jön létre, amelyet a feldolgozási paraméterekkel szabályozhatunk, illetve a felületi struktúrákkal befolyásolhatunk. [24]

Gomik C. kutatásában már mikrostrukturált felületű fröccsöntő szerszám áramlási viszonyait is vizsgálta. Munkájában megjegyezte, hogy a szerszámfal közelében a dugószerű áramlásnak köszönhetően a nyírási sebesség nagyobb, erősen orientált rétegek alakulnak ki. Ugyanakkor a rétegek kialakulását a mikrostruktúrák ömledékfrontra gyakorolt hatása befolyásolhatja. [25]

Porfyrakis K. és mtsai. a feldolgozási paraméterek, a mikrostrukturált szerszámfelület és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolatot keresték poli(metil-metakrilát) (PMMA) alapanyagú próbatesteket vizsgálva. Megállapították, hogy a felületi mikrostruktúrák (bordák) miatt az anyagáramlás nyomása és a nyírófeszültség növekszik. A fröccsöntött anyag a felületi struktúrák területén orientálódik. A formaadó felület megváltoztatása befolyásolta az ömledék áramlási képét, illetve a nagyobb felület miatt a fűtött szerszámon keresztül nagyobb hőmennyiséget tudunk bevinni a rendszerbe, aminek következtében a fal menti dermedés kisebb mértékű. [26]

Solomon N. és kutató kollégái tudományos publikációjukban komplex kísérlettervvel vizsgálták fröccsöntéssel, PP alapanyagból gyártott, strukturált felületű (bőr hatású) járműipari alkatrészek kitöltését. A vizsgált faktorok közül a kitöltés minőségét a fröccsöntési sebesség befolyásolta a legnagyobb mértékben, majd hatásának körülbelül a felével rendelkezett a szerszámhőmérséklet és az ömledékhőmérséklet változtatása. [27]

A részletezett szakirodalmi forrásokban a kutatók minden esetben újrahasznosítatlan, úgynevezett originál alapanyagot használtak. A reciklálás az anyag morfológiai szerkezetében jelentős változást okoz. Jellemzően a molekulalánc vagy a kristályos szerkezet sérül. Ezek negatív hozadéka a mechanikai tulajdonságok romlása. [28], [29] Az originál alapanyag adatlapjában feltűntetett fizikai jellemzők helyreállítására üveg- és szénszálas ötvözés mellett a járműiparban egyre elterjedtebb a szén nanocsővel (CNT) történő társítás, amely nanokompozitokat eredményez.

2.4. A szén nanocső hatása PP/CNT nanokompozitban

Grimmer C. és Dharan C. kutatásukban ötvözték az erősítő fázisokat, üvegszál erősítésű PP alapanyagot további 1 m/m% CNT tartalommal társítottak. Vizsgálva a próbatestek kifáradását legalább 60% javulást tapasztaltak a szén nanocsővel történő erősítésnek köszönhetően. [30]

Ashok Gandhi R. és kutatótársai tanulmányában olvasható a CNT aránya milyen hatással van a PP/CNT kompozitok keménységére. Kutatásukban 1, 3, 5 és 7 m/m% CNT tartalmú PP/CNT kompozitok tulajdonságait vizsgálták. A keménység fontos mechanikai tulajdonság, amely meghatározza a polimer kompozitok alkalmazhatóságát. A kutatók eredménye alapján a PP/CNT kompozit keménysége jelentősen növekszik a CNT arányának növekedésével a PP mátrixban. Érdemes kiemelni, a magas CNT tömegszázalék arányt, ami ez esetben is jelentősen megnövelte a költségeket. [31]

Zhang és mtsai. publikációjukban megállapították, hogy töltetlen alapanyag MFI értéke 33 g/10 perc értékről 5 m/m% CNT hozzáadásával drasztikusan 0,84 g/10 perc értékre csökkent, majd ezt követően tovább emelve az erősítő fázis tömegszázalékát stagnált. Érdemes megjegyezni, hogy a szabvány szerint felvett görbe alapján 1 m/m% CNT tartalom alatt az MFI változása még elhanyagolható volt. A reciklálás lánctördelődéshez vezetett, az anyag degradálódott, az MFI értéke ezáltal nőtt: 14-szeres reciklálás közel háromszoros, 90 g/10 perc MFI értéket jelentett az originál alapanyag tekintetében. Ezzel szemben a 3 m/m% CNT tartalmú alapanyag 14-szeres újrahasznosítása az originál alapanyag eredeti értékét, körülbelül 33 g/10 perc értéket vett fel.

Az ütőmunka tekintetében megállapították, hogy az originál alapanyag és a 3 m/m% PP/CNT kompozit 10-szeres reciklálásig közel azonos értéket mutatott. 10-nél többszöri újrahasznosítás ugyanakkor már jelentősen degradálta a töltetlen polimert, míg az erősített próbatestek továbbra is a megelőző értékeket hozták. A jelenség alapján a szén nanocső a polimer mátrixban nemcsak növeli a mechanikai tulajdonságokat, hanem javítja az újrahasznosítási ellenállást is. [32], [33]

2.5. A szakirodalom kritikai értékelése

A szakirodalomkutatás alapján összességében elmondható, hogy a fellelhető tudományos eredményeket kiértékelve:

1. **A formaadó felületek mikromegmunkálása** femtoszekundumos lézerekkel más strukturálásra alkalmas eljárásokhoz képest, ipari körülmények között előnyösebb lehet. [14], [34]–[36]
2. Fröccsöntött termékeken **leképződött felületi struktúrák** minőségét a folyamatparaméterek befolyásolják. [5], [25], [26], [37]–[39]
   - Ezek hatásának mértéke az irodalomban nem konzekvens.
   - A területtel kapcsolatos technológiai ajánlásokra szükség van.
3. A felületi struktúrák megváltoztathatják a fröccsöntött termékben kialakuló **orientációs rétegek** számát és azok arányát. [23], [24], [26]
   - Ugyanakkor a mechanika tulajdonságok és a mikrofelületi struktúrák közötti kapcsolat tudományos eredményei hiányosak.
4. **A mikrofelületek jelenléte és helyzetük** befolyásolja az ömledékfront áramlását, ezen keresztül pedig a késztermék minőségét. [40], [41]
   - A kitöltés minősége a TR-tényezővel megadásával jellemezhető.
   - A mikrofelületek ömledékfronthoz mért orientációjának hatása a késztermék leképeződésére megköveteli a kitöltés ismeretét.
   - A struktúramélység- és irányultság hatásának ismerete a mechanikai tulajdonságok alakulására tudományos eredményekben hiányos.
5. Csekély számú tudományos eredmény található **a CNT-vel erősített polipropilén nanokompozitok** tekintetében az újrahasznosítás hatásáról, valamint az erősítő fázis következtében kialakuló folyási mutatószám- és mechanikai tulajdonságok változásáról. [32], [33], [42]
   - Ugyanakkor a formaadó felületeken kialakított mikrostruktúrák és a szén nanocsővel erősített alapanyagok kapcsolata sem a kitöltés-, sem a mechanikai tulajdonságok változása tekintetében nem definiált szakirodalmi forrásokban.

3. Kutatási célkitűzések

Az irodalomkutatás alapján **megfogalmaztam hipotéziseim**, amelyek szerint a polipropilén alapanyagból gyártott, lézeres felületkezelést leképző mikrostruktúrák orientációja és mélysége befolyásolja az ömledék áramlását. A struktúrákkal megnövelt szerszámfelület hatással van a hűtési- hőátadási viszonyokra és módosulhat a polimer termékekben kialakuló orientált rétegek aránya. A műanyag termékek mechanikai tulajdonságainak változását okozhatja a mikrostruktúrák mag-héj szerkezetre gyakorolt hatása.

Ezek következtében feltételezhető, hogy:

- A strukturált felületek leképzése a szignifikáns faktorok optimális beállításával jelentős mértékben növelhető. [5], [25], [26], [37], [38]
- A fröccsöntés folyamatparaméterei és a felületen kialakított mikrostruktúrák korrelációja eltérő mértékben befolyásolják a hajlítószilárdságot és az ütőmunkát.

A reciklált, szén nanocsővel erősített polipropilén alapanyagból gyártott próbatestek az erősítő fázis tömegszázalékának függvényében befolyásolják az ömledék folyási tulajdonságait. A struktúrákkal megnövelt felület hatással van a hűtési- hőátadási viszonyokra és módosulhat az eltérő orientációjú rétegek aránya.

Ezek következtében feltételezhető, hogy:

- A strukturált felületek leképző újrahasznosított, CNT tartalmú PP alapanyagból gyártott termékek kitöltési tényezőjét a szignifikáns faktorok optimális beállításával növelhető. A kitöltést a folyási mutatószám változása és az erősítő fázis tömegszázaléka együttesen befolyásolják. [25], [37], [38]
- Reciklált polipropilén alacsony tömegszázalékú (0,1 – 0,5 m/m %) szén nanocsővel erősítve, fröccsöntés során a formaadó felületek befolyásolják a készterméken mért tárolási modulus értékek alakulását. [32], [33], [42]

3.1. A kutatási terv ismertetése, célok megfogalmazása

A hipotézisekben megfigyelhető módon némileg elkülönülve jelenik meg két szoros kapcsolatban álló irányvonal (1. ábra). Ezek megoldását a kutatási terület összetettsége miatt időben is egymást követően végeztem el. Ennek következtében két kísérletsorozatot végeztem el, amelyek fókuszterületei az alábbiak:

1. **kísérletsorozat:** Mikrostruktúrák orientációjának hatása a leképeződésre és a gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságaira nagy folyóképességű polipropilén random kopolimer alapanyag esetén.
2. **kísérletsorozat:** Mikrostruktúrák mélységének hatása a leképeződésre és a gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságaira polipropilén blokk kopolimer és reciklált PP/CNT nanokompozit alapanyagok esetén.

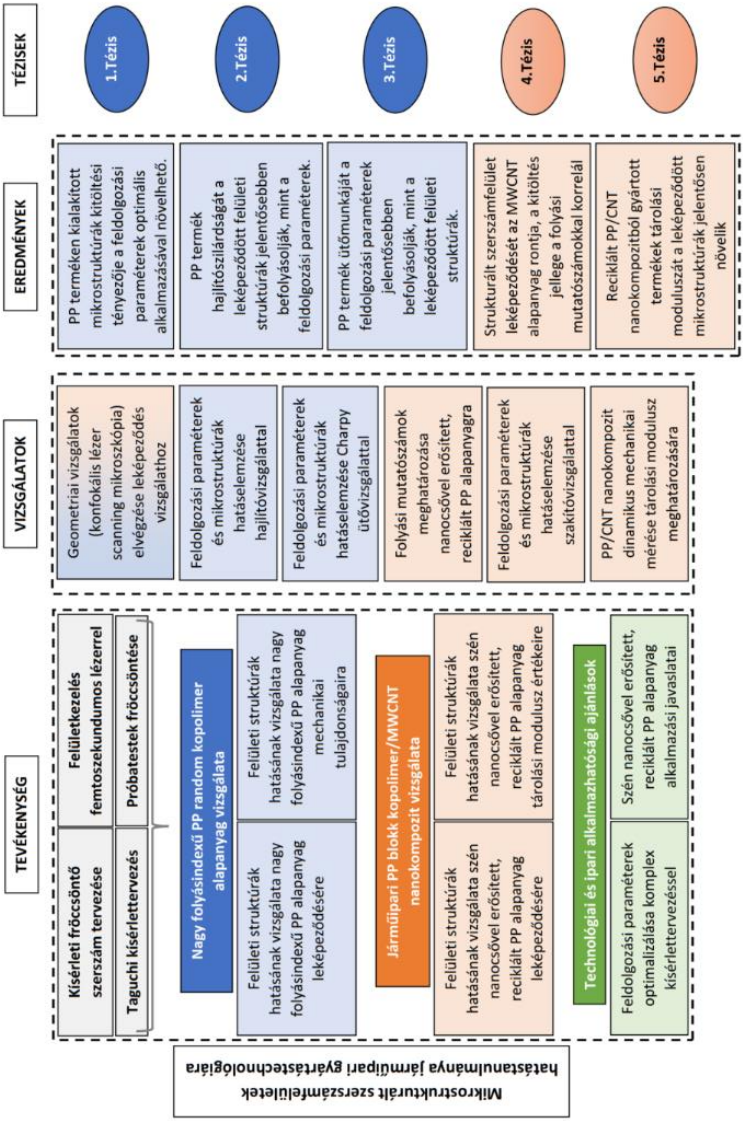
A próbatestek gyártása speciális kísérleti fröccsöntő szerszámok segítségével történik, melyek termékei szabványos alakúak. A szerszám formaadó felületén az ömledékáramlás orientációjára meghatározott irányokban, valamint különböző mélységekben felületi struktúrákat hozok létre. A struktúrákat femtoszekundumos lézer segítségével állítom elő.

A mikrofelületi strukturálást követően a formabetéteket felhasználva, fröccsöntéssel kísérleti próbatesteket gyártok járműipari tendenciáknak megfelelő alapanyagokból. A vizsgálatokat (a bázisértékek meghatározásához) a szerszámbetéteken létrehozott struktúrák elemzésével kezdem. Ezt követi a formaadó betétek segítségével, komplex kísérletterv szerint gyártott próbatestek felületén megjelenő struktúrák leképeződési minőségének kiértékelése, méréseken alapuló konzekvenciák felállítása és ipari ajánlások létrehozása.

A formaadó felület topológiája hatással van, a kitöltésre, a geometriai merevségre és a hőközlés hatékonyságára, ezáltal megváltoznak a fröccstermékek mechanikai tulajdonságai is. [23], [24], [26] A geometriai vizsgálatokat követően a termékek mechanikai tulajdonságainak méréseit kiértékelem, majd az eredményekre alapuló következtetéseket és megállapításokat teszek, valamint ipari felhasználásokat javaslok.

A kutatás lépéseit röviden összefoglalva:

I. Fröccsöntő szerszámbetét lézeres strukturálása → **II.** A felületkezelés minőségének ellenőrzése → **III.** Fröccsöntés → **IV.** Struktúrák leképeződésének vizsgálata, kiértékelése → **V.** Struktúrák okozta mechanikai tulajdonság-változások mérése, kiértékelése.



1. ábra. A tézisekhez vezető komplex kutatási terv

4. Kísérleti anyagok, berendezések és eljárások

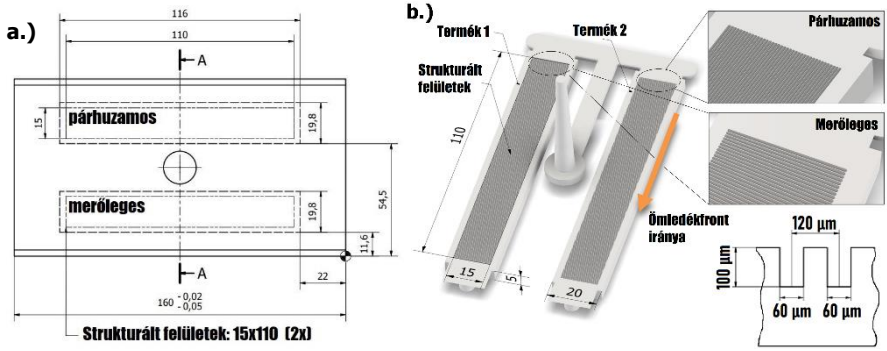
A kutatás során két, egymásra épülő kísérletsorozat elvégzése történt. A fejezetben a kísérletsorozatokban alkalmazott technológiai feltételek és szükséges részletek kerülnek tárgyalásra. A szerszámbetét felületi struktúrájának kialakítása egy Coherent Monaco 1035-80-40 típusú femtoszekundumos lézerrel történt. [43]

4.1. Az első kísérletsorozathoz használt strukturált betét

Az első kísérletsorozatban saját tervezésű és gyártású fröccsöntő szerszám formaadó felületének hatáselemzését végeztem. A kísérletsorozat a fellelhető szakirodalmak alapján az alábbi területre fókuszál:

„*Mikrostruktúrák orientációjának hatása* a leképeződésre és a gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságaira nagy folyóképességű polipropilén random kopolimer esetén.”

Folyásirányra párhuzamos és merőleges horony geometriák (mikrohornyok) kerültek kialakításra. A geometriákat szemléltető modellek a 2. ábrán láthatók.



2. ábra. Az első kísérletsorozathoz tervezett formaadó betét a.) és terméke b.)

Referenciaként az álló oldali formabetétből egy lézeres felületkezelés nélküli, köszörült felületű is készült. Ennek felületi érdesség értéke R_a=0,4 µm. A köszörülés TOS BM102 szerszámköszörűn készült, a felület mérését Mitutoyo SV-C3000 kontúrmérő gépen végeztem. A strukturáláshoz használt femtoszekundumos lézer paramétereit az 1. táblázat tartalmazza

1. táblázat. A femtoszekundumos lézeres felületkezelés paraméterei

Átlagteljesítmény	15 W (25%)
Energia	20 µJ
Frekvencia	188 kHz
Hullámhossz	1035 ± 5 nm
Impulzushossz	277 fs
Módus	TEM_{00}, ($M^2 < 1,2$)
Pásztázási sebesség	5 m/s
Pásztázási ismétlések	30 x
Alkalmazott felületkezelési stratégia	pontszerű (10 impulzus/pont)

4.2. A második kísérletsorozathoz használt strukturált betét

A második kísérletsorozatban járműipari alkalmazású polipropilén alapanyag mellett, annak reciklált és szén nanocsővel erősített változatával is vizsgáltam a formafelületek kitöltését és a próbatestek mechanikai tulajdonságának változását. A második kísérletsorozat fókusza tehát:

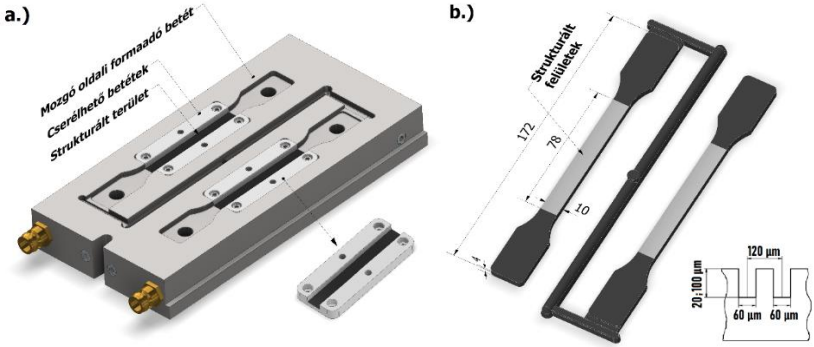
„*Mikrostruktúrák mélységének hatása* a leképeződésre és a gyártott próbatestek mechanikai tulajdonságaira polipropilén blokk kopolimer és reciklált PP/CNT nanokompozit alapanyagok esetén.”

A mintadarabok gyártását a kutatásnak megfelelően módosított, szabványos szakító próbatest-fröccsöntő szerszám segítségével végeztem el. A módosítás során a szerszámhoz a mozgó oldali formaadó betétbe további cserélhető betéteket terveztem (7. ábra).

A betétekből három típus készült:

- Lézeres felületkezelés nélküli, köszörült betét (2 db),
- 20 µm mély, folyásiránnyal párhuzamos mikrohornyokkal rendelkező betét (2 db),
- 100 µm mély, folyásiránnyal párhuzamos mikrohornyokkal rendelkező betét (2 db).

A fröccsöntő szerszám (3. ábra) az álló félben két hőmérséklet- és nyomásszenzort tartalmazott, a termékek formaüregének belépési szakaszán. [44]



3. ábra. Az második kísérletsorozathoz tervezett formaadó betét (a.) és fröccsterméke (b.)

Az első kísérletsorozatban a lézeres felületkezelés vártnál több időbe telt, így annak érdekében, hogy a mintázat létrehozása az ipari gyakorlatban jobban alkalmazható legyen a második kísérletsorozatnál változtattam a technológiai paramétereken, amelyeket a 2. táblázat tartalmaz.

2. táblázat. A második kísérletsorozatban alkalmazott femtoszekundumos lézeres felületkezelésének paraméterei

Átlagteljesítmény	24 W (40%)
Energia	32 µJ (750 kHz-en)
Frekvencia	750 kHz
Hullámhossz	1035 ± 5 nm
Impulzushossz	277 fs
Módus	TEM_{00}, (M^2 <1,2)
Pásztázási sebesség	5 m/s
Pásztázási ismétlések (20 µm)	100 x
Pásztázási ismétlések (100 µm)	500 x
Alkalmazott felületkezelési stratégia	vonal

4.3. Az első kísérletsorozathoz felhasznált alapanyag

Az első kísérletsorozatban a próbatestek alapanyaga a MOL Petrolkémia és a SLOVNAFT fejlesztése, amely a TATREN RM 85 82 CLEAR terméknevet kapta. Polipropilén random kopolimer alapanyag, alkalmas mikrostrukturált felületű termékek kitöltésére, hiszen nagy folyási mutatószám (MFI) és kiváló feldolgozási stabilitás jellemzi. [45]

4.4. A második kísérletsorozathoz felhasznált alapanyagok

A második kísérletsorozatban az eredmények járműipari alkalmazhatóságának érdekében alapanyagként egy erre a célra kifejlesztett Tipplen K 499 blokk kopolimer polipropilén [46] mellett annak szén nanocsővel (PLASTICYLTM PP2001 MWCNT) [47] erősített, reciklált változatát is felhasználtam különböző tömegszázalékú erősítő fázissal. Az újrafeldolgozáson még át nem esett, CNT erősítőfázis nélküli bázis polipropilénre a következőkben originál alapanyagként hivatkozom. A keverék ötszörös termomechanikai igénybevételnek kitett 0,1 m/m% és 0,5 m/m% CNT tartalmú reciklált nanokompozit.

4.5. Próbatestek gyártása komplex kísérlettervek alapján

A próbatestek fröccsöntéséhez Wittmann Battenfeld Ecopower 55 típusú gépet használtam mindkét kísérletsorozatban. [48]

Az első kísérletsorozathoz legyártott speciális fröccsöntő szerszám két szimmetrikusan elhelyezett formaüreget tartalmaz. A Taguchi kísérlettervben három változót (ún. faktort) használtam, amelyek a szakirodalom alapján jelentős hatással vannak mind a kitöltésre, mind pedig a késztermék szerkezetére.

A vizsgált faktorok a fröccssebesség (56, 80, 104 cm^3/s) az utónyomás értéke (245, 350, 455 bar) és a hűtési idő (20, 30, 40 s) A kísérlettervet Minitab szoftver segítségével hoztam létre. Összesen 3 faktor hatásait vizsgáltam 3 szinten. Kísérletenként 6 próbatestet gyártása történt. Először a mikroszkópi vizsgálatokra (roncsolás mentes), majd a roncsolásos anyagvizsgálatokra használtam fel őket.

A második kísérletsorozatban alkalmazott szerszám speciális szenzortechnikával rendelkezett, amelynek köszönhetően a fröccssebesség stabil tartománya (90 cm^3/s) meghatározhatóvá vált. További állandók voltak az originál alapanyag (Tipplen K 499 PP) adatlapja [46] szerinti ajánlásnak megfelelően a szerszámhőmérséklet 40°C, hűtési idő 40 s.

Mivel az ömledékhőmérséklet meghatározását az adatlap is tartományban rögzítette (190 – 230°C), ezért az ömledékhőmérsékletet három szintes változóként (190, 210, 230 °C) definiáltam. Az utónyomás értékét pedig szakirodalmi ajánlás szerint ugyancsak változóként, három szinten (200, 500, 800 bar) adtam meg, így megalkotva kétfaktoros három szintes kísérlettervet a második kísérletsorozathoz.

4.6. Vizsgálati eljárások ismertetése

Gyártását követően a próbatesteken geometriai- és mechanikai-szilárdsági jellemzők meghatározása a Neumann János Egyetem laboratóriumaiban történt.

4.6.1. Mikroszkópi vizsgálatok

A geometriai vizsgálatok során a szerszámbetét, valamint a fröccsöntött próbatestek felületének mérését hagyományos és konfokális mikroszkóppal végeztem. A hagyományos fénymikroszkópként Olympus GX41 berendezését használtam a lézeres felületkezelés technológiájának beállításához. Az Olympus LEXT5100 konfokális mikroszkóppal [49] célom a fröccsöntő szerszám formaadó felületén alkalmazott lézeres felületkezelés eredményének- és a szerszámmal gyártott polimer próbatestek TR-tényezőjének (leképezési hányados) vizsgálata. [41] Az alkalmazott konfokális mikroszkóppal a vizsgálatokhoz szükséges pontosság megvalósítható volt. A mikroszkóp által mért 3D pontfelhőket Autodesk Inventor szoftver segítségével hasonlítottam össze a tervezett geometriával. A 3D topológia ábrázolásához az ingyenesen elérhető Gwyddion szoftvert használtam.

4.6.2. A folyási mutatószám (MFI) meghatározása

A folyási mutatószám (MFI) meghatározását az MSZ ISO1133 szabvány szerint végeztem Instron CEAST MF20 Moduláris folyásindex-mérő berendezés segítségével. Az alkalmazott terhelést szabvány szerint 2,16 kg.

4.6.3. Hárompontos hajlítóvizsgálat

A hárompontos hajlítás egy Instron 3366 típusú univerzális mechanikai anyagvizsgáló berendezésen történt. A próbatest mérete a szabványtól eltérő volt. Az alátámasztások távolságát 64 mm-re állítottam be. A keresztfej sebessége 5 mm/perc volt. A nagyobb keresztmetszet miatt a maximális hajlítóerőre az arányos határhajlító feszültséghez tartozó lehajlást még nem érték el a darabok.

4.6.4. Charpy-féle ütve hajlító vizsgálat

Az ütővizsgálatot az első kísérletsorozatban végeztem a próbatesteken. A használt Charpy-féle ütőmű egy Instron Ceast Impactor II típusú anyagvizsgáló berendezés, amelyre a mérésekhez egy 5 J ütőenergiájú vizsgálókalapács került. A próbatesteken egy Instron Ceast motoros bemetszőgép segítségével 1 mm mélységű, V alakú bemunkálások készültek.

4.6.5. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatot már a második kísérletsorozathoz készített, strukturált felületű próbatestekkel végeztem el MSZ EN ISO 527 szabvány szerint. A szakítóvizsgálatot a hajlításnál is használt Instron 3366 típusú anyagvizsgáló berendezésen végeztem, csúszóékes befogókkal. A keresztfej sebessége 50 mm/perc.

4.6.6. Dinamikus Mechanikai Analízis - DMA vizsgálat

A TA Instruments Q800 berendezéssel végzett dinamikus mechanikai analízis vizsgálati módja: hárompontos hajlítás, beállított frekvencia 1 Hz, hajlító amplitúdó 15 µm, vizsgálati hőmérséklet -10 – 100°C.

5. Eredmények és kiértékelésük

A két kísérletsorozat eredményeit külön-külön részelemenként vizsgáltam. Az eredmények ismertetése mindkét kísérletsorozatban azonos: először a formaadó betét geometriai mérése, majd a leképződés minősége, végül a felületi struktúrák mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatása került kiértékelésre.

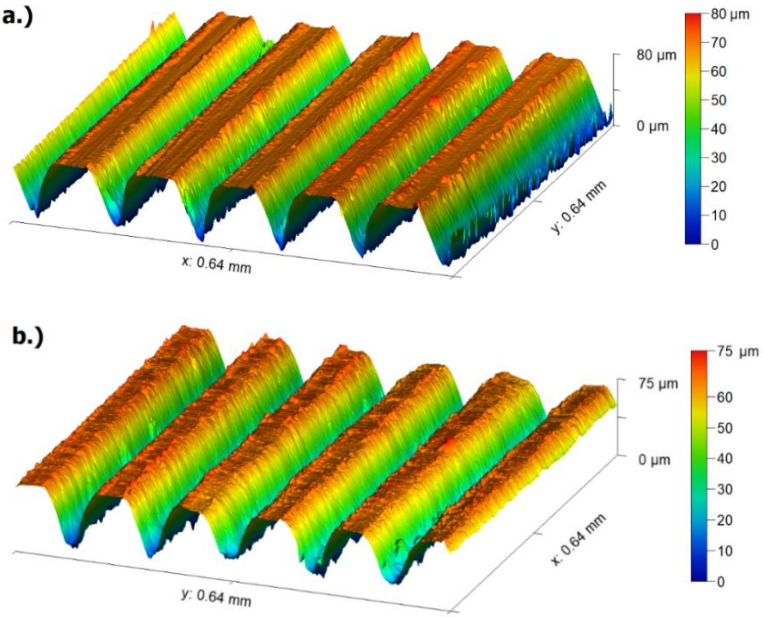
5.1. Az első kísérletsorozat eredményeinek kiértékelése

Az első kísérletsorozatban a mintázatok ömledékfronthoz viszonyított irányára és azok hatását vizsgáltam. A vizsgálatok során a strukturált polimer termékek mért értékeihez referenciaként szolgáltak a köszörült szerszámbetét felületét leképező próbatestek. Az első lépésben kiértékeltem a leképezni kívánt felület pontos geometriáját, amelyhez képest a fröccsöntött termékek kitöltésének jósága mérhető volt. Ezt követően a leképeződés minőségét, majd a felületi struktúrák hajlítószilárdságra és ütőmunkára gyakorolt hatását értékeltem ki.

5.1.1. A szerszámbetétek lézeres felületkezelésének eredménye

A polimer ömledék áramlásával párhuzamosan, illetve arra merőlegesen kialakított mikrohornyok gyártása során a lézeres megmunkálás paraméterei megegyeztek. A tervezett struktúrák mélysége 100 µm volt, ugyanakkor a leképeződés szempontjából a valós, mért geometria mélysége a mérvadó.

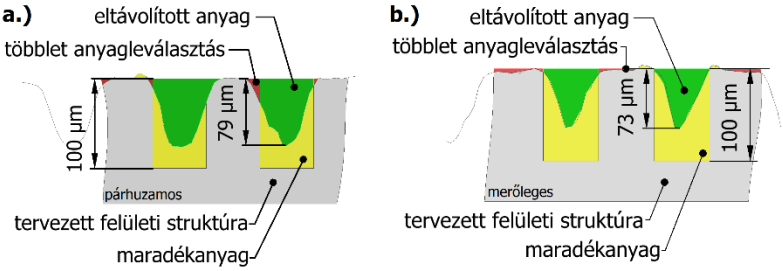
A mikroszkópi képen rögzített adathalmazból, Gwyddyon-ban generált 3D topológiák a 4. ábrán láthatók. A szoftver segítségével meghatározható volt a szerszámbetéten elkészült hornyok tényleges (átlagos) mélysége. A tervezett 100 µm mélységű hornyokkal szemben a valóságban az átlagos mélység párhuzamos struktúra esetén 79 µm-re, a merőleges struktúra esetén 73 µm-re adódott. Ez szolgáltatta a későbbiekben az első kísérletsorozatban vizsgált kitöltés alapját. A kialakult makro- és mikrogeometriai jellemzőket (a struktúra profilt) a lézer sugárforrása befolyásolta. A lézersugár TEM_{00} módusú, emiatt a nyaláb intenzitáseloszlása Gauss-eloszlást követ. Ez látható a kialakult geometriákon is.



4. ábra. A párhuzamos (a.) és a merőleges (b.) hornyokkal strukturált szerszámbetét Gwyddion szoftverben létrehozott 3D topológiája

A két felületkezelésnél megfigyelhető méret- (átlagosan 5 µm) és minőségbeli különbséget a hőfelhalmozódás okozta, azaz a merőlegesen strukturált felületek gyártásakor a lézersugár a rövid pályák miatt több időt töltött el a betét egy kis területén, ezért a hőleadás nem tudott olyan gyorsan megvalósulni. Ezzel szemben, a párhuzamos (hosszanti) pályáknál a hőleadás egyenletesebb volt.

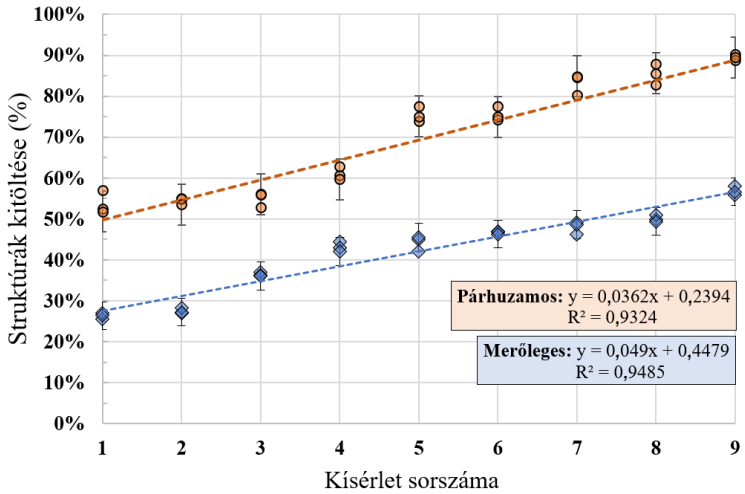
A szakirodalomban bemutatott módon [41] a leképződés jóságát vizsgáló TR-tényező lényegében a szerszám hornyának mélységét hasonlítja össze a leképzett felület maximális magasságával. Ennek érdekében a modellről keresztmetszeti vázlat segítségével hoztam létre a betétek felületi profilját. Mivel a merőleges és a párhuzamos struktúrák eltérő mélységet mutattak, a maradékanyag mennyiségéből adódóan az előállított struktúrák a betét és rajta keresztül a gyártott termék felületét is eltérően növelték (5. ábra). **A merőlegesen strukturált betét a vele gyártott alkatrész felületét 33%-kal, a párhuzamos 36%-kal növelte.**



5. ábra. A tervezett és a megmunkált felületek közötti különbségek: a párhuzamosan (a.) és a merőlegesen (b.) strukturált felületegység esetén

5.1.2. A fröccsöntött próbatestek leképeződésének eredménye

A formaadó betétek leképezési vizsgálatai során a szakirodalmi ismereteknek megfelelően, a leképezés minőségét a TR-tényezővel vizsgáltam. A TR-tényező annál jobb, minél jobban közelíti a polimer terméken kialakuló borda magassága a betéten lévő struktúra mélységét. A TR-tényezőt a szemléletesebb megjelenítés érdekében százalékban adtam meg. A ponthalmazra trendvonalat illesztve, majd annak egyenletét ábrázolva a kitöltést közelítő matematikai modell felírható. A mérési pontok lineáris trendvonalakkal jól közelíthetők (R^2>90%), amelyeket a 6. ábra szemléltet.



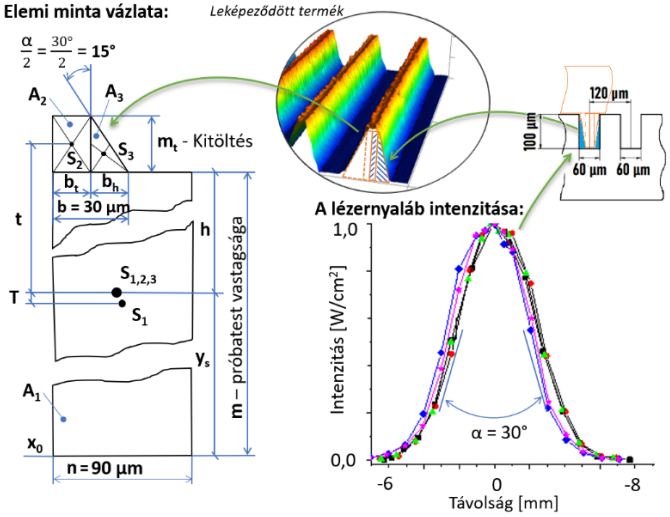
6. ábra. Az első kísérletsorozat strukturált termékeinek kitöltési minősége

A kísérletterv eredményeképp megállapítható, hogy a járműiparban nagy mennyiségben felhasznált PP alapanyag alkalmazása esetén emelve a fröccsöntési sebesség értékét a leképződés a vizsgált struktúrák esetén jelentősen növelhető.

A kialakított mikrohornyok ömledékfronthoz mért orientációja eltérő hatással volt a kitöltésre: a vizsgált kísérletek mindegyikénél elmondható, hogy összehasonlítva a párhuzamos és a merőleges struktúrákat leképző próbatestek TR-tényezőit minden esetben az előbbi mutatta a magasabb értékeket. Összehasonlítva az 56 cm^3/s fröccssebességnél és 245 bar utónyomásnál gyártott a párhuzamos- és merőleges struktúrák kitöltési tényezőjét megállapítható, hogy a párhuzamos struktúrák 25%-kal jobb kitöltést mutatnak. 104 cm^3/s fröccsöntési sebesség és 455 bar utónyomás mellett ez az érték már 28%.

5.1.3. Mikrostruktúrákból adódó geometriai merevség meghatározása

A polimer termékeken leképeződött mikrostrukturált felület növeli a termék keresztmetszetét, tehát a "mechanikai szerkezetet" is módosítja. Egy elemi minta (7. ábra) segítségével kiszámolva a strukturált termékek anyagtöbblet okozta inerciaváltozását, a mechanikai tulajdonságok változása felbontható egy geometriai merevségből- és egy anyagszerkezeti változásból álló (számszerűsíthető) tagra.



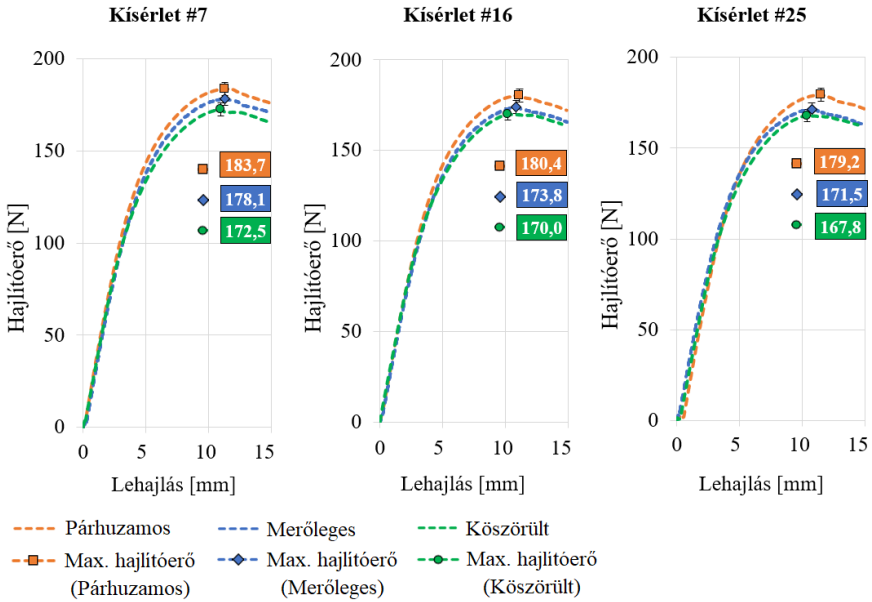
7. ábra. Az inerciaváltozáshoz alkalmazott elemi minta vázlata

A struktúra okozta geometriai merevség-többletet számszerűsítő egyenlet:

$$SIV = \left(\frac{I_{S123}}{I_{x1}} \cdot 100\right) - 100\ [\%] \tag{1}$$

5.1.4. A hajlítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése

A kísérletterv alapján a faktorok közül a fröccssebesség volt a legnagyobb befolyással a hajlítóerők értékére, ezért a 27 kísérlet közül azokat (8. ábra) szemléltettem, ahol ennek értéke változik, míg a másik két faktor értéke állandó.



8. ábra. A hajlítóvizsgálat #7-es, #16-os és #25-ös kísérlete

A fröccsöntési sebesség csökkentette a mért maximális hajlítóerőket, ezen keresztül pedig a hajlítószilárdság értékeket (növekvő orientáció). Ezzel szemben az utónyomás növelte a mért értékeket, ami a termék jobb kitöltésével magyarázható. A különböző szerszámfelületekkel gyártott termékek (köszörült, párhuzamosam és merőlegesen strukturált) azonos gyártási paraméterek mellett eltérő hajlítószilárdság értékeket produkáltak, tehát a struktúrák hatással vannak a termékek ezen mechanikai tulajdonságára.

A strukturált felületből következő hajlítószilárdság növekedés származtatható:

- a geometriai merevségből és
- az anyagszerkezeti módosulásból.

Az előző alfejezet (1) összefüggése alapján, alkalmazva a termékekhez tartozó, kitöltéskor kialakuló struktúra-magasságokat, az inerciaváltozás százalékos formája és a jelenlétükből következő geometriai merevség-többletet kiszámítható. Az értékeket a 3. táblázat tartalmazza:

3. táblázat. Párhuzamosan és merőlegesen strukturált termékek geometriai merevség-többlete

	Párhuzamosan strukturált termék 79 µm mély formaüreget leképezve			**Merőlegesen strukturált termék 73 µm mély formaüreget leképezve**		
	Kísérlet #7	**Kísérlet #16**	**Kísérlet #25**	**Kísérlet #7**	**Kísérlet #16**	**Kísérlet #25**
Leképződött struktúra magassága [µm]	43,3	59,5	70,5	28,7	36,7	44,8
TR-tényező [%]	54,9	75,5	89,5	39,3	50,3	61,3
Inerciaváltozás (Geometriai merevség-többlet)	**1,2%**	**1,5%**	**1,7%**	**0,8%**	**1%**	**1,2%**

**A konfokális mikroszkóp pontossága (±0,79 µm) a mért értékeket befolyásolja, ebből eredő eltérés százalékos formában mindössze ± 0,02%.*

Ezt követően az EN ISO 178 szabványban foglalt egyenlet alapján számított hajlítószilárdság értékeket és a köztük lévő százalékos különbségeket a 4. táblázat összegzi.

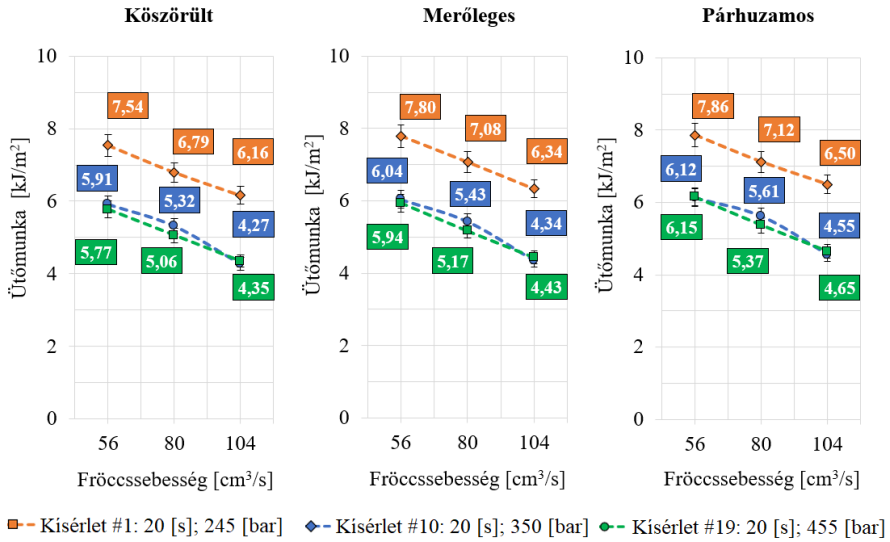
4. táblázat. A hajlítószilárdság értékek változása 3 vizsgált kísérletben a különböző felületű próbatestek esetén.

	Hajlítószilárds. #7 kísérlet [MPa]	Hajlítószilárds. #16 kísérlet [MPa]	Hajlítószilárds. #25 kísérlet [MPa]	**Eltérés technológiai paraméterek miatt**	
Köszörült betéttel gyártott	34,0	33,5	33,1	**2,7%**	**átlag: 3%**
Merőleges struktúrával gyártott	35,1	34,2	33,8	**3,8%**	
Párhuzamos struktúrával gyártott	36,2	35,5	35,3	**2,5%**	
Hajlítószilárdság növekedés Párhuzamos struktúra miatt [%]	**6,5%**	**6,1%**	**6,8%**		
	átlag: 6,5%				
Hajlítószilárdság növekedés merőleges struktúra miatt [%]	**3,2%**	**2,2%**	**2,2%**		
	átlag: 2,5%				

A 3. táblázat alapján megállapítható, hogy az inerciából következő geometriai merevség-többlet a köszörült felületet leképező termékekhez képest a párhuzamos struktúrákkal rendelkező próbatesteknél maximum 1,7%, míg a merőlegeseknél 1,2%. A 4. táblázatban foglalt mérések szerint a párhuzamos mikrostruktúrák mellett a hajlítószilárdság változása a köszörült termékekhez mérve átlagosan 6,5%, míg a merőleges struktúráknál már ez utóbbinak kevesebb mint fele, átlagosan 2,5%. Ezek alapján megállapítható, hogy a megnövekedett hajlítószilárdságot a többletanyagból következő geometriai merevség (inercia) mellett, az ömledék áramlását módosító mikrostruktúrák okozta anyagszerkezeti változások is befolyásolják. A hajlítószilárdságot a megnövelt formaadó felület miatti hatékonyabb hőközlés (struktúrák jelenléte) nagyobb mértékben befolyásolta, mint a fröccsöntési sebesség.

5.1.5. *Az ütve hajlító vizsgálat eredményeinek kiértékelése*

A köszörült, merőleges és párhuzamos felületi struktúrájú próbatesteket külön diagramokban ábrázoltam. A 9. ábrán látható diagramok 3 – 3 görbét tartalmaznak, továbbá minden görbe három különböző kísérlet eredményét mutatja.



9. ábra. Ütővizsgálati eredmények köszörült felületű-, merőlegesen és párhuzamosan strukturált szerszámbetéttel gyártott termékek esetén

Szemrevételezve a diagramokat, mindhárom felületi kialakítás esetében megállapítható, hogy a fröccssebesség növelésével arányosan csökkent az ütőmunka is. Megfigyelhető továbbá, hogy a legmagasabb ütőmunka értékeket a párhuzamos mintázatú próbatesteken adódtak, a legalacsonyabbakat pedig a köszörült felületűeken. A mért értékek közötti százalékos eltéréseket a 5. táblázat mutatja.

5. táblázat. Az ütőmunka értékek változása 3 vizsgált kísérletben és a különböző felületű próbatestek esetén.

	Ütőmunka #1 kísérlet [kJ/m^2]	Ütőmunka #10 kísérlet [kJ/m^2]	Ütőmunka #19 kísérlet [kJ/m^2]	**Eltérés technológiai paraméterek miatt**	
Köszörült betéttel gyártott	7,54	6,79	6,16	**22,4%**	**átlag: 22%**
Merőleges struktúrával gyártott	7,80	7,08	6,34	**23,0%**	
Párhuzamos struktúrával gyártott	7,86	7,12	6,50	**20,9%**	
Ütőmunka növekedés merőleges struktúra miatt [%]	**3,4%**	**4,3%**	**2,9%**		
	átlag: 3,5%				
Ütőmunka növekedés Párhuzamos struktúra miatt [%]	**4,2%**	**4,9%**	**5,5%**		
	átlag: 5%				

A mérési eredmények összehasonlításából megállapítható, hogy a hajlítószilárdsággal ellentétben a fröccsöntés technológiai folyamatparaméterei lényegesen nagyobb hatással voltak az ütőszilárdságra, mint a mikrostruktúrák jelenléte. A párhuzamos struktúrák némileg magasabb ütőmunkája merőlegessel szemben a hajlítószilárdsághoz hasonlóan a kitöltésük minőségére vezethető vissza.

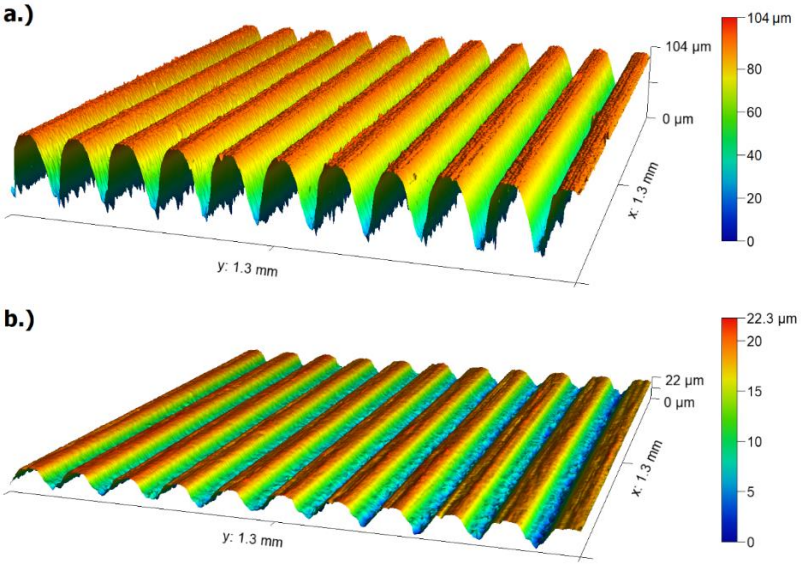
A többletanyag miatti geometriai merevség és a felületi határrétegben a mikrostruktúrák jelenlétéből adódó áramlási viszony megváltozása okozta anyagszerkezeti változások a párhuzamosan leképződött struktúráknál átlagosan 5%-kal növelték az ütőmunka értékét. A fröccssebesség értékének növelésével a próbatestek ridegebb viselkedése tapasztalható, amely az ütőmunka értékeit a vizsgált tartományban átlagosan 22%-kal csökkentette. Az ütőmunkát a felületi struktúrák geometriájából adódó inercia- és anyagszerkezeti változások tehát jelentősen kisebb mértékben növelték, mint a fröccssebesség értékének emelése okozta ridegebb viselkedés.

5.2. A második kísérletsorozat eredményeinek kiértékelése

A második kísérletsorozatban a struktúrák mélységének hatását vizsgáltam ezért az elkészített formaadó betétek mikroszkópi kezdtem az eredmények kiértékelését. Ezt követte a felületi struktúrák és a szén nanocső tartalmú PP alapanyag hatáselemzése a kitöltésre és a mechanikai tulajdonságok alakulására.

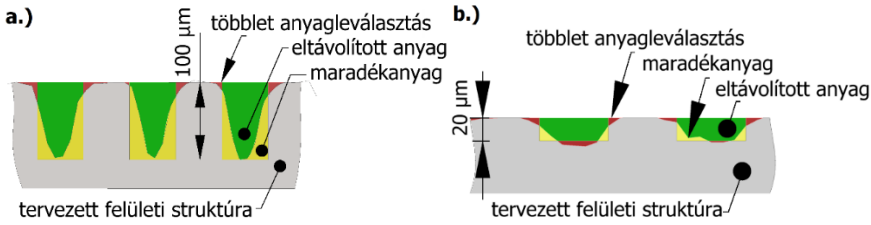
5.2.1. A szerszámbetétek lézeres felületkezelésének eredménye

A 100 µm-re tervezett struktúrák a gyártást követően a mérések átlaga alapján 101 µm mélységre adódtak. A 20 µm-re tervezett struktúrák a gyártást követően átlagosan 22 µm-ra készültek el. (10. ábra)



10. ábra. A 100 µm (a.) és a 20 µm (b.) mély hornyokkal strukturált szerszámbetétek Gwyddion szoftverben létrehozott 3D topológiája

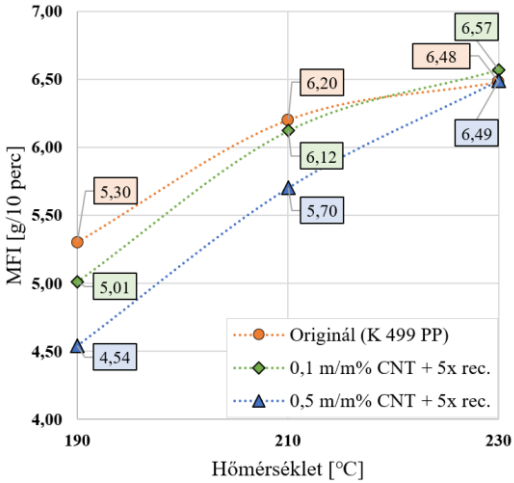
A betéteken kialakított mikrohornyok **100 µm mélység esetén 21 ± 0,5%-kal, míg a 20 µm mélységnél 4,6 ± 0,5%-kal növelik** a formaadó-, ezen keresztül pedig a hőátadó felületet. A terv szerinti- és a gyártott felületmodell összehasonlítását, így a kettő közötti különbséget egy metszeten szemlélteti a 11. ábra.



11. ábra. A tervezett és a megmunkált felületek közötti különbségek a 100 µm (a.) és a 20 µm (b.) mélységű hornyokkal strukturált szerszámbetéteken

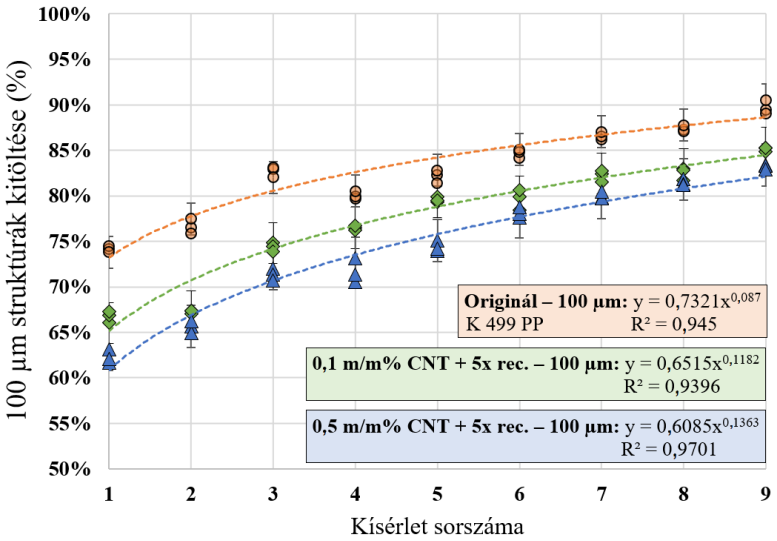
5.2.2. A fröccsöntött próbatestek leképeződésének eredménye

Polipropilén CNT-vel való társítása esetén, az erősítőanyag tömegszázalékának növekedésével csökken az MFI értéke, amely a kitöltés minőségének romlását okozhatja. Ugyanakkor a PP/CNT nanokompozitban a reciklálás lánctördelődéshez vezet, tehát degradálódik, Ennek következtében csökken az alapanyag ömledékviszkozitása: az MFI értéke növekszik. E két egymással ellentétes hatást kiváltó tényező miatt a TR-tényező vizsgálata előtt a felhasznált hőmérsékleteken meghatároztam az alapanyagok MFI értékeit, amelyet a 12. ábra szemléltet.



12. ábra. Az újrafeldolgozás és a CNT tartalom hatása az originál PP alapanyag és kompozitjainak MFI értékeire a vizsgált hőmérsékleteken.

A 100 µm mélységű hornyokkal mikrostrukturált szerszámbetét leképeződésének főhatás-elemzése alapján az ömledékhőmérséklet a kitöltésre szignifikáns. Továbbá a reciklálás és az erősítő fázis negatívan befolyásolja a kitöltést. A hatásvonalak eltolódása a CNT-tartalommal, de nem annak mértékével változik. Ez alapján a 100 µm mélységű struktúrák leképzése esetén a kitöltést a CNT tartalom és az újrahasznosítás eltérő mértékben befolyásolta. (13. ábra)



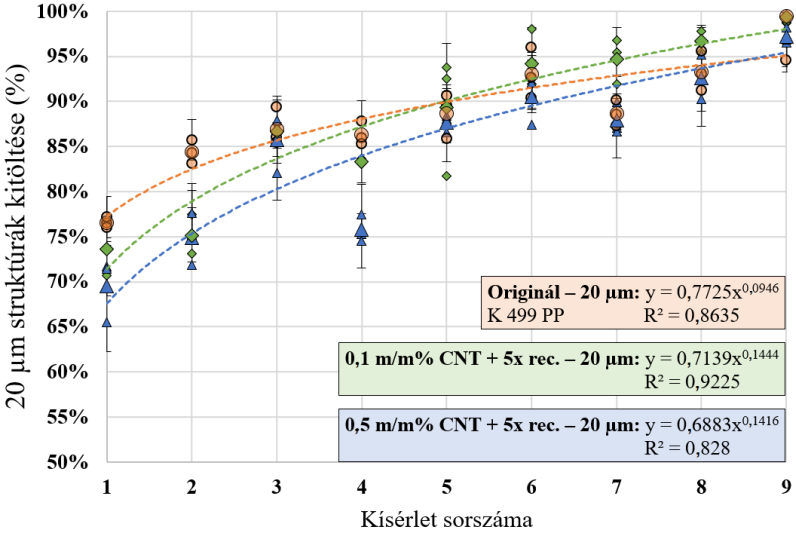
13. ábra. A második kísérletsorozat 100 µm méretű struktúrákkal gyártott termékeinek kitöltési minősége a három vizsgált alapanyag tekintetében

A mérésekből megállapítható, hogy a vizsgált faktorok értékét növelve a kitöltés mértéke a reciklált, CNT-vel erősített alapanyagok esetén közelít az originál alapanyag kitöltéséhez. 0,1 m/m% szén nanocső tartalom mellett átlagosan 5%-kal, 0,5 m/m% szén nanocső tartalom mellett 7%-kal maradnak el a TR-tényező értékei.

A kitöltés mértéke az erősítő fázis tömegszázalékának növelésével tovább csökken. A 13. ábrán látható, kitöltés változását ábrázoló, kísérleti sorok méréseire illesztett görbék jellege összehasonlítva az MFI mérések jellegével a CNT-vel erősített termékek esetén kapcsolatot mutat, a folyási mutatószámok változása az erősítő fázis jelenléte mellett is korrelál struktúrák kitöltéseivel.

A 20 µm mélységű hornyokkal mikrostrukturált szerszámbetét leképeződésének főhatás-elemzése alapján az ömledékhőmérséklet és az utónyomás egyaránt jelentősen befolyásolta a kitöltést. Ennek következménye, hogy a vizsgált faktorok kölcsönhatása (interakciója) a kísérletekben számottevő.

Szemben a 100 µm mélységű struktúrákkal ellátott betét leképeződésével, a 20 µm mélység esetén a reciklált, CNT-vel erősített termékek hatásvonalai az originál alapanyag főhatásához képest nem konzekvens mértékben tolódnak el. Mivel az erősítő fázis mennyiségével nem megegyező az eltolódás (14. ábra), arra következtettem, hogy a kitöltést ezen alapanyagok esetén az újrahasznosítás (az MFI értékek változása) nagyobb mértékben befolyásolja, mint a CNT tartalom.



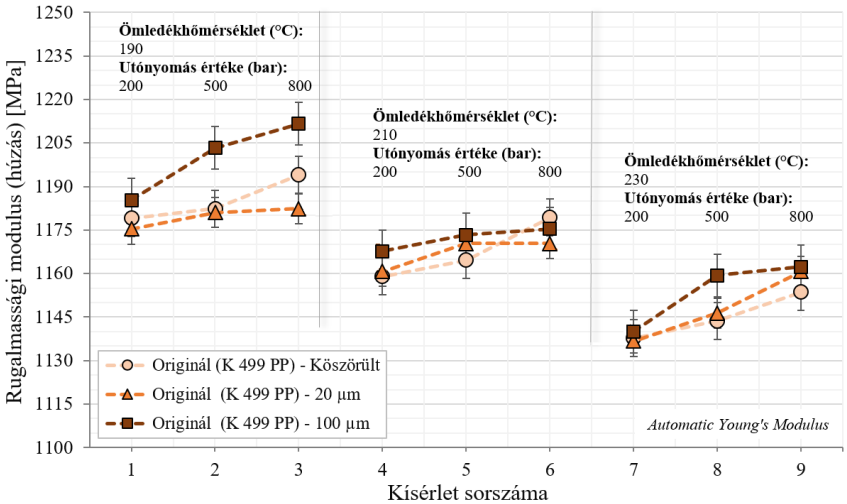
14. ábra. A második kísérletsorozat 20 µm méretű struktúrákkal gyártott termékeinek kitöltési minősége a három vizsgált alapanyag tekintetében

Az újrahasznosított nanokompozit folyási tulajdonságait az erősítő fázis tartalom negatívan befolyásolta. A kitöltés mértéke az erősítő fázis tömegszázalékának növelésével tovább csökkent. A reciklálásból adódó folyási mutatószámok változása az erősítő fázis jelenléte mellett is korrelál a struktúrák kitöltéseivel.

Az ömledékhőmérsékletet és az utónyomást emelve a leképeződés növelhető. A 100 µm mélységű struktúrák esetén a reciklált nanokompozit alapanyag a vizsgált faktorok mellett csak megközelíteni tudta az originál alapanyag TR-tényező értékeit. Ugyanakkor 20 µm mély felületi mintázat kitöltési minősége az újrahasznosított nanokompozit alapanyaggal 230°C ömledékhőmérséklet és 800 bar utónyomás mellett 0,5 m/m% CNT-nél elérte-, míg 0,1 m/m%-nál meghaladta az originál alapanyag kitöltési minőségét.

5.2.3. A szakítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése

A szakítóvizsgálat (15. ábra) segítségével a faktorok és a struktúrák hatásának alakulásából kiválasztottam azokat, amelyeket a DMA vizsgálattal elemeztem.

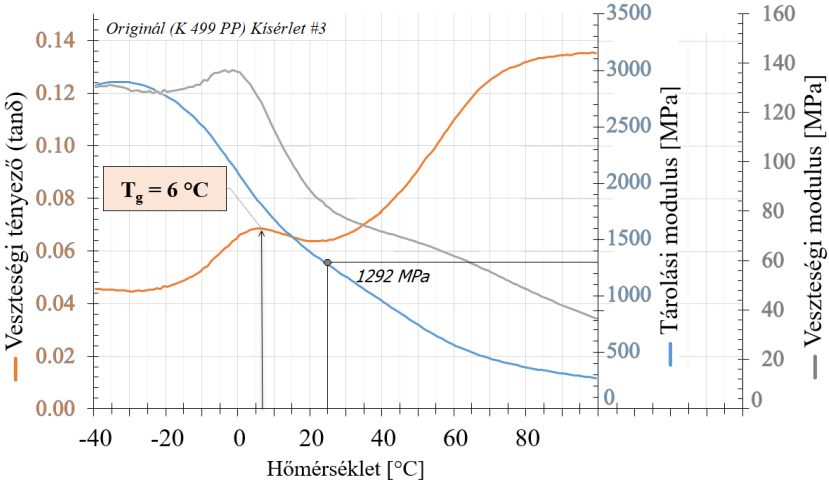


15. ábra. Rugalmassági modulus értékek alakulása a kísérleti beállítások és a felületi struktúrák szerint

Számottevő eltérést a köszörült felülethez képest (főként 190°C ömledékhőmérsékleten) a próbatestek rugalmassági modulus értékei csak a 100 µm struktúrák mellett mutattak. Ezen tények figyelembe vételével a DMA mérésekben csak az ömledékhőmérséklet változásával és a legnagyobb utónyomás állandó értéken tartásával végeztem el, köszörült és 100 µm mély hornyokon leképeződött termékek esetén.

5.2.4. *A DMA vizsgálat eredményeinek kiértékelése*

A DMA mérésekkel meghatároztam a tárolási- (E') és a veszteségi (E") modulus hőmérsékletfüggését. A tárolási modulus (a rugalmassági modulus valós tagja) a dinamikus terhelés hatására deformálódó próbatest rugalmasan tárolt energiával arányos része. A 16. ábrán egy relaxáció jelzi a fázisátalakulások tartományát, (T_g), 0-20°C hőmérsékletek között.



16. ábra. A tárolási és a veszteségi modulusból származtatott veszteségi tényező (tan δ) ábrázolása és a T_g üvegesedési hőmérséklet jelölése

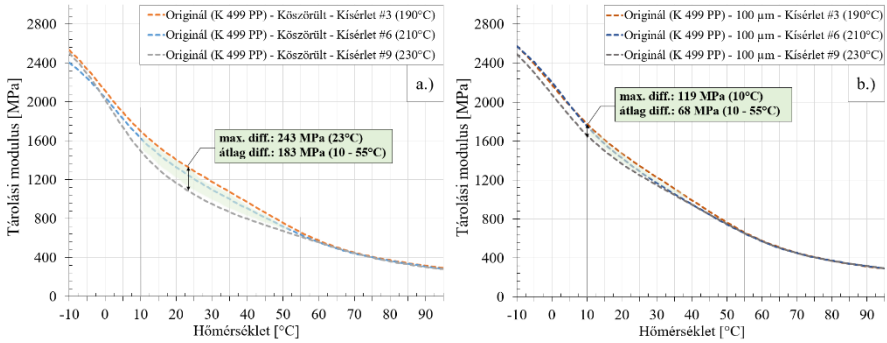
Merev szilárd testek esetében a komplex modulust elsősorban a tárolási modulus határozza meg. Ha a tan δ ≤ 0,1, akkor a tárolási modulus a komplex rugalmassági modulus ≥99%-a. Ebben az esetben a DMA-ból származó tárolási modulus és a statikus vizsgálatból származó rugalmassági modulus korrelálhat. A K 499 PP blokk kopolimer adatlapja szerint az anyagra jellemző húzó rugalmassági modulus értéke 1300 MPa. A 46. ábrán megfigyelhető, hogy a szobahőmérsékletnél mért tárolási modulus érték 1292 MPa, ami mindössze 0,6% eltérést mutat az adatlapban feltüntetett értéktől. [46]

Az előbbi megállapítások ismeretében mikrostruktúrákat leképező próbatestek geometriai merevség-többletét meghatároztam (6. táblázat).

6. táblázat. A strukturált termékek geometriai merevség-többlete

	Originál (K 499 PP) 100 µm mély formaüreget leképezve			0,5 m/m% CNT + 5x rec. 100 µm mély formaüreget leképezve		
	#3	**#6**	**#9**	**#3**	**#6**	**#9**
Leképződött struktúra magassága [µm]	83,71	85,74	90,78	72,25	79,09	84,21
TR-tényező [%]	82,70	84,71	89,68	71,38	78,13	83,19
Inerciaváltozás (Geometriai merevség-többlet)	**2,4%**	**2,5%**	**2,6%**	**2,2%**	**2,3%**	**2,4%**

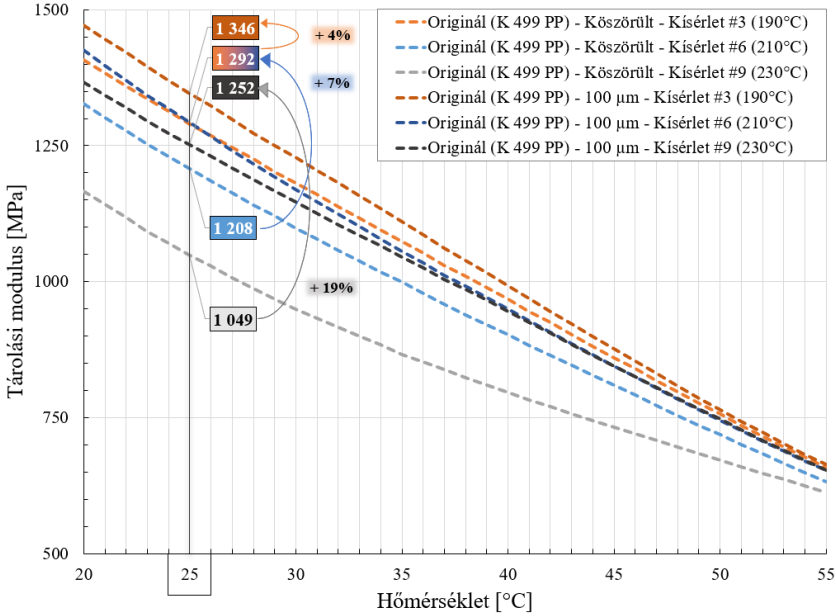
A 17. ábrán összehasonlítóhatók a köszörült- és a 100 µm-es strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulus görbéi (E') a hőmérséklet függvényében. A mérési adatok igazolják a szakítóvizsgálat eredményét, miszerint az ömledékhőmérséklet növelésével a modulus értékek csökkennek. Ez azzal magyarázható, hogy a hőmérséklet növekedésével a molekulák energiatartalma nő, az intermolekuláris erők gyengülnek, majd mindezek eredményeképp a polimerláncok szabadabb mozgása és különböző konformációk felvétele lehetségessé válik. A jelenség csökkenti a késztermék rugalmassági modulusát.



17. ábra. Az originál alapanyagból gyártott, köszörült (a.) és 100 µm-es strukturált (b.) felületet leképzett próbatestek tárolási modulus görbéi (E')

A 17. ábra a.) diagram szerint megállapítható, hogy a tárolási modulus értékek a három különböző ömledékhőmérséklet mellett gyártott és köszörült felületet leképzett próbatestek esetén 10°C és 55°C (17. ábrán zölddel jelölt) között széles tartományban (17. ábra/a.) diagram: 183 MPa átlagtartomány) változtak. Ezzel szemben a 100 µm-es strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulus értéke számottevően kisebb tartományban (17. ábra/b.) diagram: 68 MPa átlagtartomány) változott a vizsgált ömledékhőmérsékletek mellett. Ezt az indokolja, hogy a strukturált felületek a vizsgált tartományban növelik a termék merevségét, így kereszthatással bírnak az ömledékhőmérsékletre. A struktúrák jelenléte tehát növeli próbatestek tárolási modulusát, az átlagtartomány így 63%-kal szűkült.

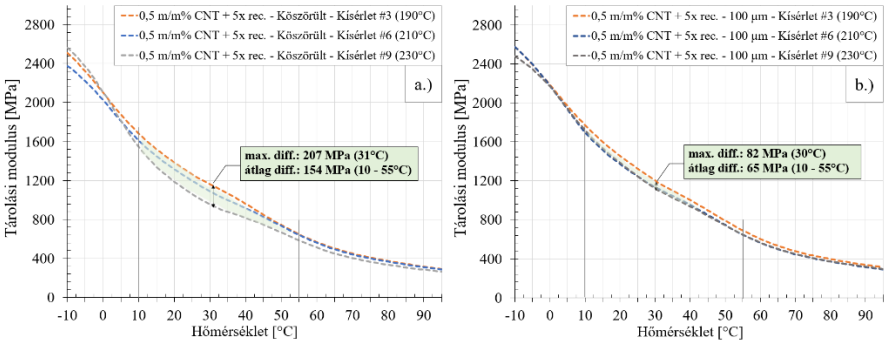
Annak érdekében, hogy a jelenség szemléletesebben ábrázolható legyen, a 100 µm-es felületi struktúrákkal rendelkező- és a strukturálatlan próbatestek DMA méréseit 25°C-on hasonlítottam össze a 18. ábrán.



18. ábra. Originál alapanyagból gyártott, köszörült- és 100 µm-es strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulus értékeinek változása 25°C-on.

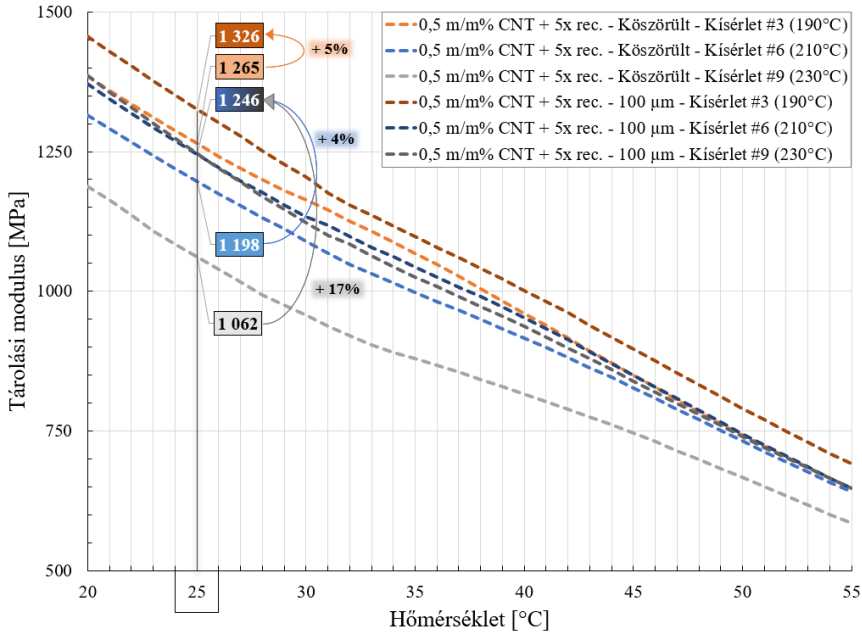
A feltűntetett értékek alapján megállapítható, hogy azonos gyártási paraméterek mellett a struktúrával rendelkező próbatestek minden esetben nagyobb tárolási modulussal rendelkeznek, mint a köszörült felületet leképzett (strukturálatlan) próbatestek. 25°C-on megfigyelhető az is, hogy a strukturált termékek nagyobb tárolási modulust eredményeztek még alacsonyabb hőmérséklet mellett is, mint köszörült társaik. A 100 µm-es struktúrák jelenléte tehát nagyobb befolyással bírt a tárolási modulus változására, mint a kísérletekben alkalmazott ömledékhőmérséklet értékek.

A 0,5 m/m% CNT tartalommal erősített, regranulátumból gyártott köszörült- és a 100 µm-es strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulus görbéit (E') a hőmérséklet függvényében mutatja be a 19. ábra. A 19. ábra a.) diagramon a köszörült felületet leképzett CNT-vel erősített próbatestek 10°C és 55°C közötti hőtartományban (nagyrugalmas állapotba tartozó hőmérsékleti szakasz), a töltetlen alapanyaghoz hasonlóan szélesebb átlagtartományban (19. ábra/a.) diagram: 154 MPa átlagtartomány) változtatták a tárolási modulus értékeiket. Ezzel szemben a 100 µm-es strukturált felületet leképzett, 0,5 m/m% CNT-vel erősített próbatestek tárolási modulus értéke számottevően kisebb átlagtartományban (19. ábra/b.) diagram: 65 MPa átlagtartomány) változott a vizsgált ömledék-hőmérsékletek mellett. Az átlagtartomány összességében 58%-kal szűkült.



19. ábra. A PP/CNT kompozitból gyártott, köszörült (a.) és 100 µm-es strukturált (b.) felületet leképzett próbatestek tárolási modulus görbéi (E')

Az originál alapanyaghoz hasonlóan a nanokompozitból gyártott próbatesteknél is kiemeltem a 20 – 55°C hőtartományt és ábrázoltam struktúrákkal rendelkező- és a strukturálatlan próbatestek DMA méréseit (20. ábra).



20. ábra. PP/CNT kompozitból gyártott, köszörült- és 100 µm-es strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulus értékeinek változása 25°C-on.

A modulus értékek növekedése a strukturált próbatestek esetén azzal magyarázható, hogy a formabetéten kialakított mikrostruktúrák leképezése inerciatöbbletet jelent a késztermék tekintetében. Továbbá a szerszámfelület struktúrái hatással vannak a polimer ömledék áramlására, valamint a megnövelt felületből következően a hőátadási viszonyra. Míg az előbbi hatás az orientált rétegek arányát, addig utóbbi befolyásolhatja a szerszámfalhoz közeli héjszerkezet arányát, továbbá hatással lehet a kristályos részhányadra is. A mikrostruktúrák pontos anyagszerkezeti hatása a felsorolt jelenségek miatt rendkívül összetett, ugyanakkor a mérési eredményekből tapasztalt moduluskülönbségekből következően, ismerve az inerciatöbblet értékeket jelenlétük megállapítható.

A mikrostruktúra hatását a 7. táblázat foglalja össze, melyben az originál és a kompozit esetében is a strukturált felületű próbatestek köszörült felületű próbatestekhez képesti változását láthatjuk százalékos formában.

7. táblázat. A mikrostruktúra hatása a mechanikai tulajdonságokra

	Originál (K 499 PP)				**0,5 m/m% CNT + 5x rec.**			
	9. kísérlet	6. kísérlet	3. kísérlet	9 → 3 [%]	9. kísérlet	6. kísérlet	3. kísérlet	9 → 3 [%]
Köszörült felületet leképzett próbatestek tárolási modulusa 25 °C-on [MPa]	1049	1208	1292	23	1062	1198	1265	19
100 µm mély strukturált felületet leképzett próbatestek tárolási modulusa 25 °C-on [MPa]	1252	1292	1346	7,5	1246	1246	1326	6
Tárolási modulus változás [%]	**19%**	**7%**	**4%**		**17%**	**4%**	**5%**	

A táblázat segítségével jól szemléltethető az ömledékfront áramlási irányával párhuzamos, mikrostruktúrák tárolási modulusra gyakorolt hatása:

- 230°C ömledékhőmérséklet mellett, mind az erősítetlen-, mind pedig az erősített, reciklált próbatestek tárolási modulusát jelentősen növelte (előbbin 19%-ot, míg utóbbin 17%-ot)
- A struktúrával rendelkező, 230°C ömledékhőmérséklet mellett gyártott próbatestek tárolási modulus értéke mindössze 1,5-3%-kal marad el a 190°C-on gyártottaktól.
- A struktúrák leképezése 190°C ömledékhőmérsékleten, erősítetlen és erősített-reciklált alapanyagból gyártott próbatestek esetén is növelte a tárolási modulus értékeket 4 – 5% mértékben.

6. Tézisek – Új tudományos eredmények

1. Tézis: „Megállapítottam, hogy a kísérletek során alkalmazott próbatest fröccsöntő szerszámmal, polipropilén random kopolimer termékek felületén kialakított mikrostruktúrák kitöltési tényezője (TR-tényező) jelentősen növelhető a fröccsöntési sebesség emelésével. Ugyanakkor a kitöltési tényező értéke azonos folyamatparaméterek mellett függ a mikrostruktúrák ömledékfront áramlási irányához viszonyított orientációjától. Kimutattam, hogy 56 cm^3/s fröccsöntési sebességnél és 245 bar utónyomásnál az ömledék áramlási irányával párhuzamosan strukturált felületek kitöltési tényezője 24%-kal jobb, mint a merőlegesen strukturáltaké. Ugyanezt 104 cm^3/s fröccsöntési sebesség és 455 bar utónyomás mellett vizsgálva 28% különbség tapasztalható. A jelenség a kedvezőbb áramlási viszonyokkal magyarázható.” [S1-S3, S6, S9, S10, S13, S14]

2. Tézis: „Megállapítottam, hogy polipropilén random kopolimer próbatest fröccsöntése során, a késztermék felületére az ömledékfront áramlási irányával párhuzamos mikrostruktúrákat leképezve a hajlítószilárdság értéke növelhető. Mérésekkel és számítással igazoltam, hogy a növekmény a többletanyagból adódó geometriai merevségre (inercia) és az ömledék áramlását befolyásoló mikrostruktúrák okozta anyagszerkezeti változásokra vezethető vissza.”
[S1, S3, S6, S13]

3. Tézis: „Megállapítottam, hogy fröccsöntött polipropilén random kopolimer próbatestek fajlagos ütőmunkáját a fröccsöntő szerszám formaadó felületén kialakított mikrostruktúrák jelenléte kisebb mértékben befolyásolta, mint a fröccsöntési sebesség értékének növelésével tapasztalható ridegebb viselkedés. Kimutattam, hogy az alkalmazott folyamatparaméterek mellett (fröccsöntési sebesség: 104 cm^3/s, utónyomás: 455 bar) az ömledékfront áramlási irányával párhuzamosan leképeződött mikrostruktúrák átlagosan 5%-kal növelik a vizsgált próbatest fajlagos ütőmunka értékét, a struktúrával nem rendelkezőhöz képest. Ezzel szemben a fröccsöntési sebesség emelése (56 cm^3/s-ról 104 cm^3/s-ra) átlagosan 22%-kal csökkenti a fajlagos ütőmunka értékét.” [S1, S3, S6, S13]

4. Tézis: „Megállapítottam, hogy reciklált, szén nanocső tartalmú polipropilén nanokompozit fröccsöntésekor az ömledékfront áramlási irányával párhuzamosan kialakított mikrostruktúrák leképeződését az erősítő fázis tömegszázaléka és a struktúrák mélysége eltérő mértékben befolyásolja. Kimutattam, hogy reciklált, 0,1 m/m% és 0,5 m/m% szén nanocső tartalmú polipropilén nanokompozitok folyási mutatószámának változása korrelál a vizsgált ömledékhőmérsékletek (190°C, 210°C, 230°C) mellett gyártott termékek felületén leképződő mikrostruktúrák kitöltési tényezőjével (TR-tényező).” [S1-S3, S5-S6, S9-10, S13-S14]

5. Tézis: „Megállapítottam, hogy fröccsöntött polipropilén blokk kopolimer és reciklált nanokompozit próbatestek felületén az ömledékfront áramlási irányával párhuzamosan leképzett mikrostruktúrák növelik a késztermék tárolási modulus értékeit. Kimutattam, hogy 230°C ömledékhőmérsékleten gyártott, 100 µm mélyen strukturált felületet leképező próbatestek 25°C-on mért tárolási modulus értéke polipropilén blokk kopolimer esetén 19%-kal, míg reciklált, 0,5 m/m% szén nanocső tartalomú polipropilén esetén 17%-kal nagyobb, mint a struktúrákkal nem rendelkező próbatesteké. A jelenség a mikrostruktúrák okozta geometriai merevség- és anyagszerkezeti változások együttesével magyarázható.” [S1, S3, S6, S8, S12]

7. A kutatáshoz tartozó saját publikációk jegyzéke

S1 K. Kun, Z. Weltsch, Effect of femtosecond laser structured injection moulding tool on mechanical properties of the manufactured product, Polymers 2021, 13, 2187. IF=4,967 Q1 https://doi.org/10.3390/polym13132187

S2 K. Kun, J. Líska, Z. Weltsch, Replication of microstructures formed by femtosecond laser during injection moulding, Advances in Manufacturing Engineering and Materials II ; Springer International Publishing (2021) pp. 290-300. Paper: Chapter 24 , 11 p

S3 K. Kun, Z. Weltsch, Research of the effect of macrogeometric structures on the melt front using simulation, Advances in Manufacturing Engineering and Materials II ; Springer International Publishing (2021) pp. 282-289. Paper: Chapter 23 , 8 p

S4 J. Líska, K. Kun. Zs. Kovács, Attendants at MMC composite milling, Advances in Manufacturing Engineering and Materials II ; Springer International Publishing (2021) pp. 332-342. Paper: Chapter 27 , 11 p.

S5 K. Kun, Design of an Experimental Injection Moulding Tool for Testing Microstructured Cavity Surfaces. Acta Materialia Transylvanica, (2021). 4(2), 97-102.

S6 K. Kun, P. Boza, Investigation of inserts surface structures on injection moulded parts. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. p. 012052.

S7 J. Líska, K. Kun, K. Líska, MMC materials ultrasonic machining and its economic aspects. Procedia Engineering, 2016, 149: 245-256

S8 K. Kun, A. Bata, Újrahasznosított, CNT-vel erősített PP kompozitok mikroszerkezeti vizsgálata konfokális mikroszkóppal GRADUS Vol 10, No 1 (2023.) ISSN: 2064-8014 (megjelenés alatt)

S9 K. Kun, Z. Weltsch, J. Líska, Femtoszekundumos lézerrel felületkezelt fröccsöntő szerszámbetét termékének vizsgálata GRADUS 9 : 2 Paper: 2022.2.ENG.002 , 7 p. (2022)

S10 K. Kun, P. Boza, Z. Weltsch, Polimer ömledék leképeződésének vizsgálata formaüreg felületi struktúráin GRADUS 6 : 1 pp. 142-147. Paper: 18 , 6 p. (2019)

S11 K. Kun, Technológiai paraméterek hatása Digital Lighting Process eljárásnál GRADUS, 7 (2). (2020) pp. 374-379.

S12 L. Ihász, K. Kun, Újrahasznosított, CNT-vel erősített PP kompozitok mikroszerkezeti vizsgálata Neumann János Egyetem TDK, Polimer szekció (2023)

S13 A. Bognár, K. Kun, Femtoszekundumos lézerrel létrehozott mikrostruktúrák hatása polimer termékek mechanikai tulajdonságaira 35 OTDK, Műszaki Tudományi Szekció, Polimer anyagtudomány és vizsgálat Tagozat. 2021.

S14 K. Kun, P. Boza, Z. Weltsch, Felületi struktúrák vizsgálata fröccsöntő szerszám betéteken AGTEDU 2018, Kecskemét: 2018. november 15., Előadás

S15 K. Kun, Z. Weltsch, Felületi struktúrák vizsgálata szimuláció segítségével AGTEDU 2018, Kecskemét: 2018. november 15., Előadás

8. Irodalomjegyzék

[1] Bánhegyi György, “A mikrofröccsöntés jelene és lehetőségei,” *Műanyagipari szemle - Műanyagok feldolgozása*, vol. 5, pp. 1–9, 2006.

[2] K. , B. P. , & P. M. Belina, “Investigation of the effect of surface finishing on injection moulding parts,” in *11th International conference on tools*, Miskolc, Hungary, 2004, pp. 311–316.

[3] Bulk Chemicals, “Automotive Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report,” 2021.

[4] ASTM D883-19, “Standard Terminology Relating to Plastics,” 2019

[5] B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths, and M. S. Packianather, “Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality,” *J Mater Process Technol*, vol. 183, no. 2–3, pp. 284–296, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019.

[6] D. Masato, L. Piccolo, G. Lucchetta, and M. Sorgato, “Texturing Technologies for Plastics Injection Molding: A Review,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1211, Jul. 2022, doi: 10.3390/mi13081211.

[7] A. Zoubir, L. Shah, K. Richardson, and M. Richardson, “Practical uses of femtosecond laser micro-materials processing,” *Applied Physics A*, vol. 77, no. 2, pp. 311–315, Jul. 2003, doi: 10.1007/s00339-003-2121-9.

[8] M. Dantus, *Dantus, Marcos. Femtosecond Laser Shaping: From Laboratory to Industry*. CRC Press, 2017.

[9] Z. Lin and M. Hong, “Femtosecond Laser Precision Engineering: From Micron, Submicron, to Nanoscale,” *Ultrafast Science*, vol. 2021, Jan. 2021, doi: 10.34133/2021/9783514.

[10] X.-Q. Liu, B.-F. Bai, Q.-D. Chen, and H.-B. Sun, “Etching-assisted femtosecond laser modification of hard materials,” *Opto-Electronic Advances*, vol. 2, no. 9, pp. 19002101–19002114, 2019, doi: 10.29026/oea.2019.190021.

[11] L. Calabrese *et al.*, “Micro-Milling Process of Metals: A Comparison between Femtosecond Laser and EDM Techniques,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 4, p. 125, Nov. 2021, doi: 10.3390/jmmp5040125.

[12] L. Yang, W. Ma, F. Gao, and S. Xi, “Effect of EDM and Femtosecond-Laser Groove-Texture Collision Frequency on Tribological Properties of 0Cr17Ni7Al Stainless Steel,” *Coatings*, vol. 12, no. 5, p. 611, Apr. 2022, doi: 10.3390/coatings12050611.

[13] S. S. Wangikar, P. K. Patowari, and R. D. Misra, “Parametric Optimization for Photochemical Machining of Copper Using Grey Relational Method,” in *Techno-Societal 2016*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 933–943. doi: 10.1007/978-3-319-53556-2_94.

[14] M. N. W. Groenendijk and J. Meijer, “Surface Microstructures obtained by Femtosecond Laser Pulses,” *CIRP Annals*, vol. 55, no. 1, pp. 183–186, 2006, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60394-1.

[15] A. Gruner, J. Schille, and U. Loeschner, “Experimental Study on Micro Hole Drilling Using Ultrashort Pulse Laser Radiation,” *Phys Procedia*, vol. 83, pp. 157–166, 2016, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.030.

[16] T. Hanemann, W. Pfleging, J. Haußelt, and K.-H. Zum, “Laser micromaching and light induced reaction injection molding as suitable process sequence for the rapid fabrication of microcomponents,” *Microsystem Technologies*, vol. 7, no. 5–6, pp. 209–214, Jan. 2002, doi: 10.1007/s005420100116.

[17] U. A. Theilade and H. N. Hansen, “Surface microstructure replication in injection molding,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, no. 1–2, pp. 157–166, May 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0732-y.

[18] Yao Donggang, “Injection molding high aspect ratio microfeatures,” *Journal of injection molding technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2002.

[19] U. M. Attia and J. R. Alcock, “An evaluation of process-parameter and part-geometry effects on the quality of filling in micro-injection moulding,” *Microsystem Technologies*, vol. 15, no. 12, pp. 1861–1872, Dec. 2009, doi: 10.1007/s00542-009-0923-1.

[20] U. M. Attia, S. Marson, and J. R. Alcock, “Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices,” *Microfluid Nanofluidics*, vol. 7, no. 1, pp. 1–28, Jul. 2009, doi: 10.1007/s10404-009-0421-x.

[21] H.-C. Chang and W.-B. Young, “Experimental Study on the Filling of a Micro Injection Molding with Cylindrical Dot Patterns,” *International Polymer Processing*, vol. 20, no. 3, pp. 245–249, Sep. 2005, doi: 10.3139/217.1884.

[22] R. Pantani, A. Sorrentino, V. Speranza, and G. Titomanlio, “Molecular orientation in injection molding: experiments and analysis,” *Rheol Acta*, vol. 43, no. 2, pp. 109–118, Mar. 2004, doi: 10.1007/s00397-003-0325-8.

[23] J. Ying, X. Xie, S. Peng, H. Zhou, and D. Li, “Morphology and rheology of PP/POE blends in high shear stress field,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 31, no. 9, pp. 1263–1280, Sep. 2018, doi: 10.1177/0892705717734908.

[24] V. V. Zuev, B. Steinhoff, S. Bronnikov, H. Kothe, and I. Alig, “Flow-induced size distribution and anisotropy of the minor phase droplets in a polypropylene/poly (ethylene-octene) copolymer blend: Interplay between break-up and coalescence,” *Polymer (Guildf)*, vol. 53, no. 3, pp. 755–760, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.polymer.2011.12.046.

[25] C. Gornik, “Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications,” *Macromol Symp*, vol. 217, no. 1, pp. 365–374, Oct. 2004, doi: 10.1002/masy.200451332.

[26] K. Porfyrakis, H. E. Assender, and I. M. Robinson, “The interrelationship between processing conditions, microstructure and mechanical properties for injection moulded rubber-toughened poly(methyl methacrylate)

(RTPMMA) samples," *Polymer (Guildf)*, vol. 43, no. 17, pp. 4769–4781, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0032-3861(02)00286-0.

[27] N. Solomon, I. Solomon, and E. Sanduleac, "Material flow influence on the quality of molded parts," *Polymer Bulletin*, vol. 76, no. 11, pp. 5981–6000, Nov. 2019, doi: 10.1007/s00289-019-02832-w.

[28] Ferenc Ronkay, "Effect of Recycling on the Rheological, Mechanical and Optical Properties of Polycarbonate," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 10, no. 1, pp. 209–220, 2013.

[29] L. Lendvai *et al.*, "Development and characterization of composites produced from recycled polyethylene terephthalate and waste marble dust," *Polym Compos*, vol. 43, no. 6, pp. 3951–3959, Jun. 2022, doi: 10.1002/pc.26669.

[30] C. S. Grimmer and C. K. H. Dharan, "High-cycle fatigue of hybrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites," *J Mater Sci*, vol. 43, no. 13, pp. 4487–4492, Jul. 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2651-9.

[31] R. Ashok Gandhi, V. Jayaseelan, K. Palani Kumar, B. K. Raghunath, and S. Krishnaraj, "Effect of Carbon Nano Tubes (CNT) on Hardness of Polypropylene Matrix," 2019, pp. 261–270. doi: 10.1007/978-981-13-1780-4_26.

[32] J. Zhang *et al.*, "The effects of recycling on the properties of carbon nanotube-filled polypropylene composites and worker exposures," *Environ. Sci.: Nano*, vol. 3, no. 2, pp. 409–417, 2016, doi: 10.1039/C5EN00253B.

[33] K. Zdiri, A. Elamri, M. Hamdaoui, O. Harzallah, N. Khenoussi, and J. Brendlé, "Reinforcement of recycled PP polymers by nanoparticles incorporation," *Green Chem Lett Rev*, vol. 11, no. 3, pp. 296–311, Jul. 2018, doi: 10.1080/17518253.2018.1491645.

[34] R. Samad, L. Courrol, S. Baldochi, and N. Vieir, "Ultrashort Laser Pulses Applications," in *Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission*, InTech, 2010. doi: 10.5772/13095.

[35] J. Preußner, S. Oeser, W. Pfeiffer, A. Temmler, and E. Willenborg, "Microstructure and Residual Stresses of Laser Structured Surfaces," *Adv Mat Res*, vol. 996, pp. 568–573, Aug. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568.

[36] A. K. Dubey and V. Yadava, "Laser beam machining—A review," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 48, no. 6, pp. 609–628, May 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017.

[37] K. Maghsoudi, R. Jafari, G. Momen, and M. Farzaneh, "Micro-nanostructured polymer surfaces using injection molding: A review," *Mater Today Commun*, vol. 13, pp. 126–143, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.mtcomm.2017.09.013.

[38] F. Modica, V. Basile, R. Surace, and I. Fassi, "Replication Study of Molded Micro-Textured Samples Made of Ultra-High Molecular Weight

Polyethylene for Medical Applications," *Micromachines (Basel)*, vol. 14, no. 3, p. 523, Feb. 2023, doi: 10.3390/mi14030523.

[39] A.-K. Holthusen, O. Riemer, J. Schmütz, and A. Meier, "Mold machining and injection molding of diffractive microstructures," *J Manuf Process*, vol. 26, pp. 290–294, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.014.

[40] D. Masato, M. Sorgato, and G. Lucchetta, "Analysis of the influence of part thickness on the replication of micro-structured surfaces by injection molding," *Mater Des*, vol. 95, pp. 219–224, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.115.

[41] H. Yokoi, X. Han, T. Takahashi, and W. K. Kim, "Effects of molding conditions on transcription molding of microscale prism patterns using ultra-high-speed injection molding," *Polym Eng Sci*, vol. 46, no. 9, pp. 1140–1146, Sep. 2006, doi: 10.1002/pen.20519.

[42] D. Tabuani, W. Granelli, G. Camino, and M. Claes, "Polypropylene based carbon nanotubes composites: structure and properties," *e-Polymers*, vol. 8, no. 1, Dec. 2008, doi: 10.1515/epoly.2008.8.1.1178.

[43] Industrial-Grade Femtosecond Lasers: Monaco 1035 | Coherent gépkönyv
https://content.coherent.com/legacy-assets/pdf/COHR_Monaco1035_DS_0120_1.pdf
Megtekintve: 2023.04.01.

[44] Cavity Eye – Pressure Monitoring
https://cavityeye.com/
Megtekintve: 2023.04.01.

[45] Tatren RM 85 82 Clear PP random kopolimer – Technikai adatlap
https://www.molgroupchemicals.com/userfiles/products/80/80_tds_hu.pdf
Megtekintve: 2023.04.01.

[46] Tippelen K 499 PP blokk kopolimer
https://mol.hu/images/mol_hu/pdf/vallalati_ugyfelek/polimer-termekek/termekek/pp-polipropilenek/tipplen/tipplen_k_499_hu_2018.pdf
Megtekintve: 2023.04.01.

[47] Nanocyl NC7000 MWCNT – Technikai adatlap
https://www.nanocyl.com/wp-content/uploads/2016/07/DM-TI-02-TDS-NC7000-V08.pdf
Megtekintve: 2023.04.01

[48] Wittmann Battenfeld Ecopower 55 – Gépkönyv
https://www.wittmann-group.com/sites/default/files/2022-09/ecopower_en_2022-08_web.pdf
Megtekintve: 2023.04.01

[49] Olympus OLS500 – SAF konfokális mikroszkóp katalógus szerint adatai
https://unicam.hu/files/olympus-lext-ols5100/LEXT-OLS5100_prospektus.pdf
Megtekintve: 2023.04.01