# Mikroméretű fröccstermékek gyártásának újdonságai

**A nagyon kis méretű termékek fröccsöntése rohamosan fejlődik, az új technológiák révén már 0,00001 g-nál is kisebb darabokat is gyártottak, illetve olyanokat, amelyeknek legalább egy mérete kisebb, mint 1 µm. Egyre több cég kínál nagyon kis ömledékmennyiségek pontos adagolására alkalmas berendezést. Egyes esetekben a fröccssajtolás miniatürizált változatát alkalmazzák. A kis méretekhez szükséges speciális szerszámkészítési technológiák is erőteljesen fejlődnek.**

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; fröccsöntés; mikrofröccsöntés; fröccssajtolás; PP; EVA; műszaki műanyagok; PLA.*

A nagyon kis termékek fröccsöntése rohamosan terjed, a darabok mérete egyre kisebb lesz, miközben a részletgazdagságuk növekszik. Sokáig az amerikai MTD Micromolding cég 0,00012 g tömegű PET alkatrésze tartotta e téren a rekordot, de erre a címre ma már a szintén az MTD által gyártott 0,00000313 g tömegű EVA (etilén-vinilacetát kopolimer) glaukomás implantátum tart igényt. A méretek csökkenése mellett a darabok részletgazdagsága és felületük funkcionális texturáltsága is jelentősen fejlődött.

## A mikrotermékek fröccsöntő gépei

Egyre több cég gyárt olyan mini fröccsöntő berendezéseket, amelyek képesek nagyon kis mennyiségű műanyagömledéket nagy pontossággal és reprodukálhatósággal adagolni. E gépek hideg és forrócsatornás elosztórendszereket egyaránt alkalmaznak.

Az új mikrofröccsöntő berendezések egyre kisebbek. A japán Sodick Inc. vertikális elrendezésű 3 tonna záróerejű *HC03VRE* fröccsgépe 14 mm-es csigával és 8 mm-es fröccsdugattyúval rendelkezik, és rövidebb ciklusidőkkel dolgozik, mint a cég korábbi legkisebb, 5 tonnás berendezése.

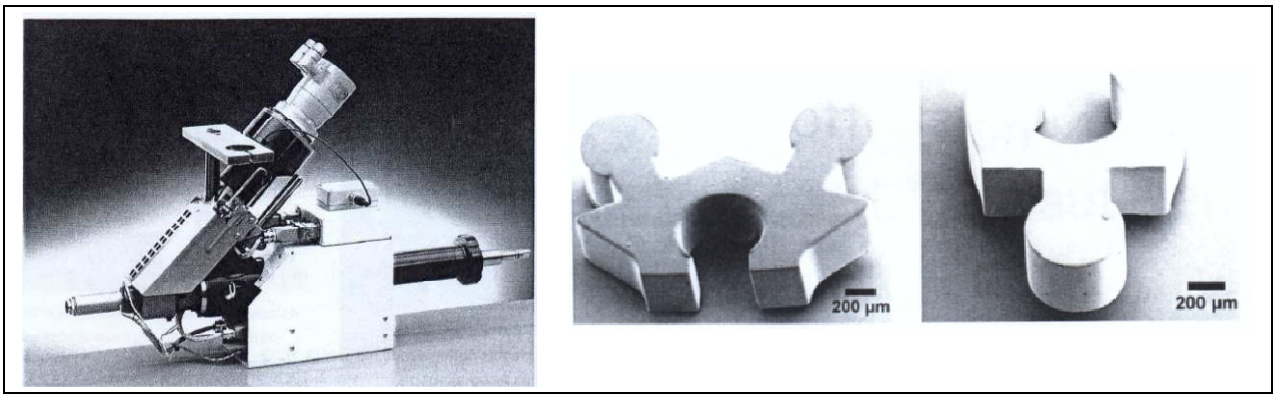
A szintén japán Nissei Plastics Industrial Co. 7,7 tonnás hidraulikus záróegységű *NPX7* hibrid gépe 12 mm-es csigával mikrogranulátumokat dolgoz fel, 14 mm-es csigával pedig normál granulátumokat.

A kanadai MHS Mold Hotrunner Solutions Inc. új *M3 Mini* fröccsgépének alapterülete 150x50 cm, magassága 150 cm, azaz a gép jóval kisebb, mint a korábbi modell. Az elektromágneses záróegysége 2,2 tonnás, a berendezés egyaránt alkalmas kisszériás és prototípus gyártásra, illetve 12 fészkes szerszámüreggel tömegtermelésre.

Szabadalmaztatott forrócsatornás technológiát alkalmaz, fröccsegységének extrúziós típusú csigája a fröcccsöntéshez szükséges hőmérséklet alatti hőfokon tölti fel az elosztócsatornák csatlakozóegységét, ahol azt a megfelelő hőmérsékletre hevítik, majd pedig beépített dugattyúk adagolják be az ömledéket a szerszámüregekbe. Az adagsúlyok 1–400 mg között változtathatók.

Az amerikai Boy Machine Inc. cég a Kipe Molds Inc. „micro deck" elnevezésű betétjét használta fel a saját *Boy XS* kis gépének átalakítására LSR feldolgozásához. A géppel a 2015-ös NPE kiállításon 0,009 g tömegű LSR termékeket gyártott, de hidegcsatornás „micro deck" segítségével akár 0,003 g tömegű LSR termékek is készíthetők. A 10 tonna záróerejű, 12 mm-es csigadugattyújú fröccsgéppel egyébként 1-4 g tömegű hőre lágyuló műanyag termékek gyárthatók.

A német Arburg cég *Allrounder 370A* gépét szerelte fel mikrofröccsegységgel, amely két csigával rendelkezik. A 18 mm-es csigájú plasztikáló egység lehetővé teszi a normál méretű granulátumok használatát, míg a 8 mm-es csigájú befröccsöntő egység a kis anyagmennyiségek pontos adagolásáért felelős *(1. ábra).*




1. ábra Az Arburg cég mikrofröccsgépének fröccsegysége a 18 mm-es csigájú plasztikáló és a 8 mm-es csigájú befröccsöntő egységgel, illetve a segítségével 20 s ciklusidővel előállított 0,5–1 mg tömegű POM puzzle-darabok

*Új típusú fröccsegységek*

A mikrofröccstermékek gyártásánál két új működési elvű fröccsegység jelent meg a piacon. Az egyik ilyen módszer esetében elhagyták a csigás fröccshengert, és ehelyett *ultrahanggal olvasztják meg a műanyagot.* Egy fémhengerbe benyúló szonotróda 30 kHz frekvenciával rezegve milliszekundumok alatt olvasztja meg a kívánt mennyiségű műanyagot, amit azután egy kis dugattyú juttat nagy nyomással a szerszámba. Hideg és forrócsatornás megoldások egyaránt alkalmazhatók. Az ultrahangos módszer előnye, hogy az ömledéknek gyakorlatilag nincs tartózkodási ideje a fröccsegységben, ezért hőterhelése is elhanyagolható, ezért a termék mechanikai szilárdsága jobb lesz, mint a hagyományos fröccsdaraboké. Az ultrahangos olvasztás ráadásul az ömledék viszkozitását is csökkenti, így a szerszámba juttatása és a szerszám

kitöltése is könnyebb. Ilyen, szabadalmaztatott rendszert kínál a barcelonai Ultrason S. L. *Sonorus 1G* márkanéven, 0, 05–2 g fröccstömeggel, 8 mm-es fröccsdugattyúval és 3 tonnás záróerővel. A berendezéssel bármilyen hőre lágyuló műanyag feldolgozható, eddig gyógyászati célú PLA (politejsav) és PP, továbbá elektronikai célokra LCP (folyékony kristályos polimer), mechanikai precíziós alkatrészekhez POM termékeket készítettek. Egy új modellt is fejlesztenek, amelynek segítségével szélesebb mérettartományban lehet majd dolgozni (várhatóan 2016-ban készül el).

A másik műszaki megoldásban a hagyományos csigadugattyú helyett a fröccshengeren alakították ki a csavarmenetet („inverz csiga" néven is emlegetik), a dugatytyún pedig hornyokat képeztek ki. Ilyen berendezést készített a német Arburg cég az aacheni IKV műanyagkutatóval közösen. A 8 mm átmérőjű dugattyúval ellátott fröccsegység jóval kevesebb műanyagömledéket tartalmaz, mint a megfelelő méretű (ø14 mm) csigadugattyús megoldás, vagyis 0,4–1,2 $cm^3$ ömledéket 2,2–6,5 $cm^3$ helyett. Így tehát az ömledék tartózkodási ideje és ezáltal hőterhelése is jóval kisebb. A berendezés új változatánál a prototípushoz képest a betáplálási részt meghosszabbították, a henger meneteinek számát megnövelték és mélyítették a dugattyú hornyait is, továbbá a fúvóka előtt egy kis kamrát alakítottak ki. E változtatások következtében sikeresen tudtak PP és POM alapanyagot 50, 200 és 350 fordulatszámmal feldolgozni 0,3–2,2 g mérettartományban. A berendezés reprodukálhatósága 1,4 g-os POM terméknél mindhárom fordulatszámon 0,5%, PP esetében pedig 0,6% volt.

*Újdonságok a szerszámgyártásban*

A szerszámgyártásnál sokszor használják a mikroelektronikától, az űrhajózástól vagy éppen az óragyártástól átvett módszereket, mint amilyen pl. a röntgen-, elektronsugaras és UV-litográfia, a lézeres maratás és a mikro-szikraforgácsolás, hogy 1 µm-nél kisebb méretű szerkezeti elemeket, illetve felületi struktúrákat alakítsanak ki. Az egy µm-nél kisebb elemek mérettartományát „nano-közeli"-nek nevezik, ha a kérdéses termék legalább egyik mérete kisebb, mint 1 µm (mikrotartomány, ha a méretek 1 µm és 1 mm között vannak).

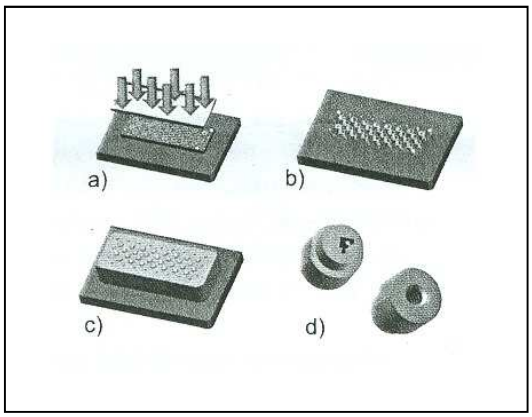
A *Variotherm* (dinamikus hőfokszabályozás) szerszámtemperálást is alkalmazzák a mikrofröccsöntésnél. Ennek során a szerszámüreg falát a polimer $T_g$-je fölötti hőmérsékletre melegítik fel a befröccsentés előtt, hogy az anyag minél pontosabban kövesse a felület simaságát vagy strukturáltságot eredményező textúráját. Ezután nagy sebességgel lehűtve a szerszámüreg falát, a műanyag megszilárdul. A mikrofröccsöntésnél e módszert először a vérvizsgálatokhoz használt piciny lapos eszközökhöz alkalmazták, amelyekben a vér 0,06–0,1 µm mély, 0,3–1 µm széles csatornákon át áramlik az integrált áramkörön (chip-en) elhelyezett piciny laboratóriummal elvégzett vizsgálatok (angolul: lab-on-a-chip) során.

A Linde cég vezetésével alakult együttműködés során kifejlesztett eljárásban a szerszám falát 0,5 mm átmérőjű, tehát a szerszámüreg falához egészen közel elhelyezhető csatornákon át áramló 300–500 °C-os szén-dioxid gázzal hevítik fel 30 °C/s sebességgel, illetve hűtik vissza –79 °C hőmérsékletű folyékony szén-dioxiddal. A

forróvizes módszerrel ellentétben itt nem kell a csatornák eldugulásától tartani. Miután ugyanazokat a csatornákat használják a fűtésre és a hűtésre, a szerszám kialakításánál több hely marad a többi funkciós elem számára.

Újabban a francia RocTools cégnél a Volvo *XC90* egyik alkatrészének gyártásához alkalmazták az indukciós fűtést is a mikrofröccsöntés szerszámainak *Variotherm* temperálásához, hogy a megfelelő felületi textúrát kialakíthassák.

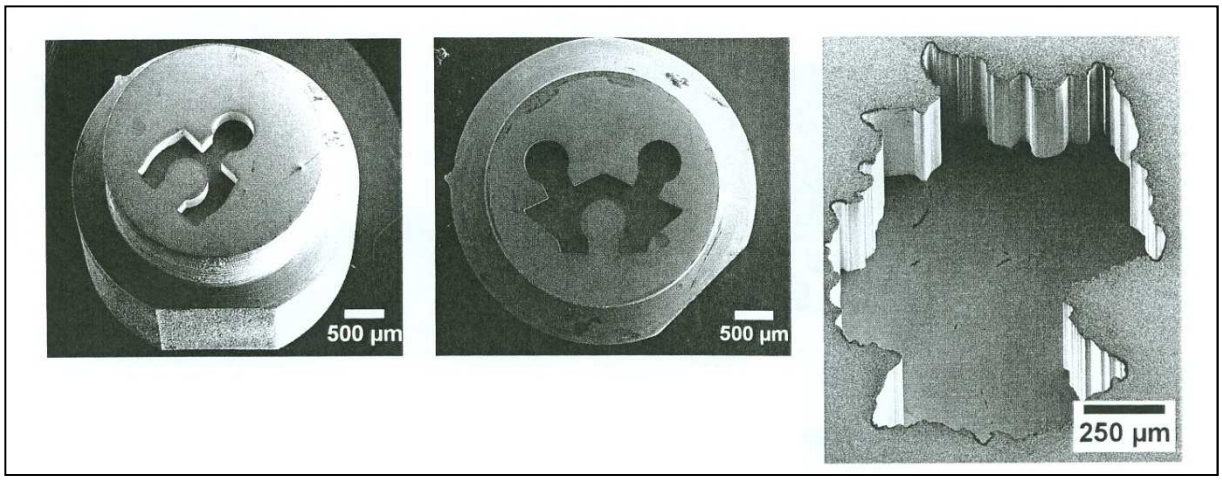
A német RKT Rodinger Kunststoff-Technik GmbH a röntgenlitográfia és a galvántechnika kombinációját (az eljárás német rövidítése: LIGA) használja a miniatűr fröccsszerszámok formaadó betéteinek előállítására. A módszer *(2. ábra)* első lépéseként egy röntgensugárzásra érzékeny anyag (ált. PMMA) lemezét rézlemez hordozóra fektetik, megfelelő geometriájú maszkolással látják el és ezután röntgensugárzással „maratják" a nem védett részeket (a). A kimaratott részeket tartalmazó lemezből (b) eltávolítják az elbomlott részeket, majd galvántechnikai eljárással néhány mm vastag fémbevonatot (általában nikkelréteget) visznek fel rá (c). E fémtermékből forgácsolással állítják elő a megfelelő külső geometriával rendelkező szerszámbetéteket (d).




2. ábra A LIGA eljárás vázlata

Az így gyártott formaadó szerszámbetétek nagy pontosságúak, a függőleges élek a szerszámsíkkal szinte pontosan 90°-ot zárnak be, az élek lekerekítettsége elhanyagolható *(3. ábra).*

A fröccsszerszámok háromlapos kialakítása miatt nincs szükség kidobórendszerre. Az egyik megoldásnál a szerszám fokozatos megnyitása során a beömlőcsonknál húzatják ki a kész darabokat a szerszámüregből, a másiknál a szerszám részleges megnyitása során a már félig kihúzott darabokról a beömlőcsonkot úgy vágják le, hogy a szerszámbetéteket egy kis beépített villanymotor tengelyük körül elforgatja, majd robot emeli ki a darabokat.




3. ábra LIGA eljárással készült formaadó szerszámbetétek
(2 puzzle darab és egy mikroméretű Németország térkép formaürege)

## Mikro fröccssajtoló berendezések

Az ilyen gépeket mikroprégelő berendezéseknek is nevezik. Az osztrák Wittmann Battenfeld 2013–2014-ben kifejlesztett berendezésével nagy optikai tisztaságú, piciny *Fresnel lencséket* állított elő. A fröccssajtolással ugyanis nagyon alacsony szinten lehet tartani a termék belső feszültségeit és ezáltal minimalizálni a hatására létrejövő, az optikai jellemzőket lerontó kettős törést.

A *HiQ Shaping* eljárásnál a berendezés működése során a műanyagömledék befolyik a kétrészes szerszámba, amelyet egy jól definiált kicsiny (kevesebb, mint 0,65 mm) réssel nyitva hagynak. Ezután a szerszámot lassan, programozott sebességű nyomással zárják össze. Eközben a szerszám falának hőmérsékletét a polimer $T_g$-je feletti hőmérsékleten tartják. A 10–12 másodperces zárást a szerszámban és a záróegységen elhelyezett két nyomásszenzor segítségével vezérlik. A légtelenítés a szerszámrésen át történik. Ezzel a módszerrel tízszer rövidebb ciklusidő érhető el, mint az ún. *Varioterm* módszerrel, amely a fröccsszerszám programozott felhevítésén és lehűtésén alapul. A *HiQ Shaping* eljárást a Battenfeld *MicroPower 15* fröccsöntő gépére dolgozták ki, amely 0,5–4 g fröccsadaggal képes működni. A nemzetközi együttműködés eredményét jelentő gépet 2015-ben az USA NPE kiállításán mutatták be, ahol 0,007 g tömegű LSR (folyékony szilikongumi) könnycsatornadugókat gyártott.

A lipcsei Kunstoff-Zentrum (KuZ) kutatóintézet is kifejlesztett egy új mikrofröccssajtoló berendezést, amely közvetlen beömlésű szerszám segítségével, 0,6 mm-es résnyílással dolgozik. A szerszám feltöltését alacsony, 400 bar körüli nyomáson végzik (a hasonló fröccsgépeknél a fröccsnyomás kb. 4000 bar). Ezután a szerszámrést egy 2,4 tonnás szervoelektromos egységgel zárják. A függőleges elrendezésű berendezést forgóasztallal látták el, ami lehetővé teszi, hogy a robotokkal ráfröccsöntést végezzenek és fémbetéteket is behelyezhessenek. A kis ömledéknyomás következtében a finom alkatrészek nem károsodnak.

A KuZ már 2006 ban piacra dobott egy 1 tonna záróerejű horizontális elrendezésű *Formica Plast* márkanevű mikrofröccsöntő gépet. A mostani, 2,4 tonnás vertikális berendezéshez hasonlóan ez is 7 mm-es plasztikáló egységet és 3 mm-es fröccsdugatytyút használ.

A koreai Yonsei University polimerporból állított elő 36–96 nm átmérőjű, 20–60 nm sugarú görbülettel ellátott apró optikai lencséket.

## A mikrofröccsöntés számítógépes modellezése

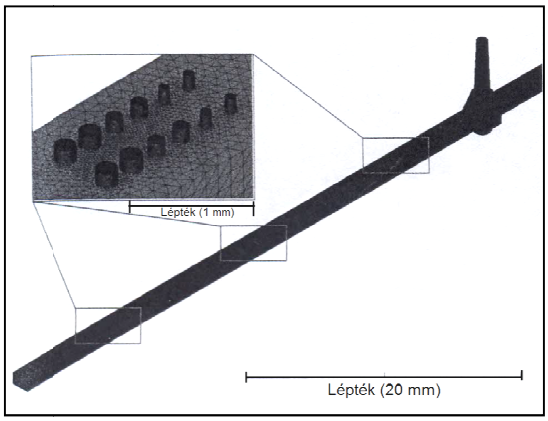
A normál méretű fröccstermékek és az előállításukra szolgáló szerszámok méretezését nagyon megkönnyítik a műanyagömledék áramlási viszonyait, a szerszámkitöltést, illetve a darabok zsugorodását, vetemedését modellező számítógépes szimulációs programok. Azonban a nagyon pici méretű fröccstermékek esetében ezek a programok nem működnek megbízhatóan, az ömledék áramlási viszonyaira már eltérő összefüggések érvényesek. A modellezés előnyeinek biztosítása érdekében német kutatók (KuZ és DesmaTec) ismert szimuláló programok *(Autodesk Moldflow 2012 és Cadmould3D F 6.1 verzió)* használatánál a véges-elemes közelítés hálósűrűségének egy külső hálógeneráló programmal *(CAD-Software NX)* végzett megnövelésével és a számítási eredmények kísérleti ellenőrzésével igyekeztek megoldást találni.

A kísérletekhez egy formicalPlast mikrofröccsöntő gépet használtak. A fröccsszerszámban egy olyan központi rúdbeömléses, változtatható falvastagságú (0,2–1 mm) téglalap keresztmetszetű tesztpálcát használtak, amelynek felületén, bizonyos helyeken, piciny, henger alakú kitüremkedések csoportjait hozták létre *(4. ábra).* E kis hengerek átmérője 100–200 µm között változott, magasságuk pedig 150 µm volt.

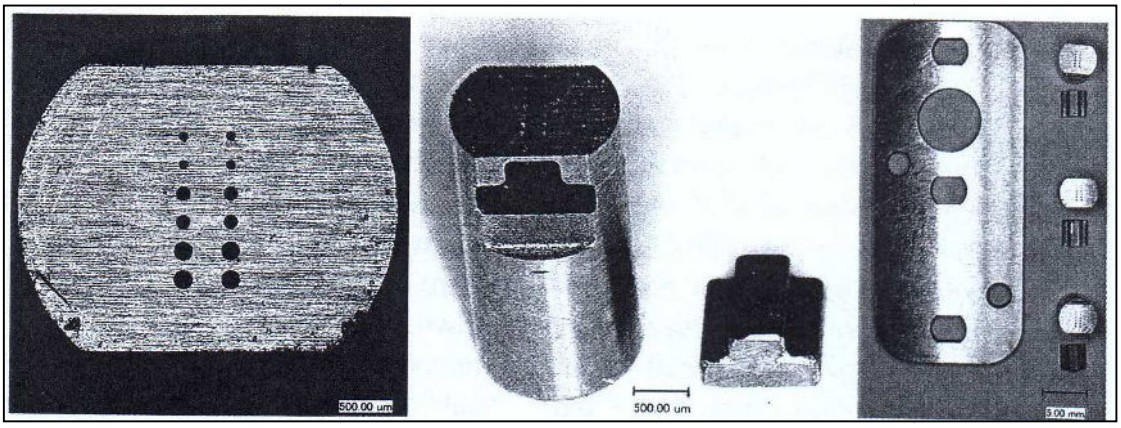
A hengeres mikrostruktúra-csoportokat létrehozó szerszámbetéteket átmenő furatokkal és az azok egyik végét lezáró, pontosan illeszkedő betéttel készítették el, hogy a pici hengerekből a levegő a fröccsöntés során eltávozhasson, és éles peremű mikrostruktúrát állíthassanak elő *(5. ábra).*

A vizsgálatok egy fontos része azt kívánta tisztázni, hogy a különböző fröccsparaméter-beállítások hatására a műanyagömledék milyen mértékben tölti ki a beömléshez képest eltérő távolságban elhelyezkedő piciny hengercsoportok különböző átmérőjű tagjait, azaz milyen az ömledék formakövetése. A szerszámba a hőmérséklet és nyomás regisztrálására szolgáló érzékelőket építettek be, illetve a gépet erőmérő cellával is felszerelték. A hengeres mikrostruktúrák méreteit és alakját konfokális fénymikroszkóppal ellenőrizték. A vizsgálatokat PA6 és PMMA alapanyagokkal végezték.

A műanyagömledék és a szerszám falának érintkezésekor a viszkozitás nagysága fontos szerepet játszik. A mérések alapján megállapították, hogy a hőátadási koefficiens magasabb ömledék- és szerszámhőmérsékletek ($T_{sz}$) hatására növekszik *(6. ábra).* Magasabb feldolgozási hőmérsékleten a viszkozitás lecsökken, és az ömledék pontosabban követi a szerszámüreg alakját, ezáltal pedig javul a hőátadás az ömledék és a szerszámfal között.

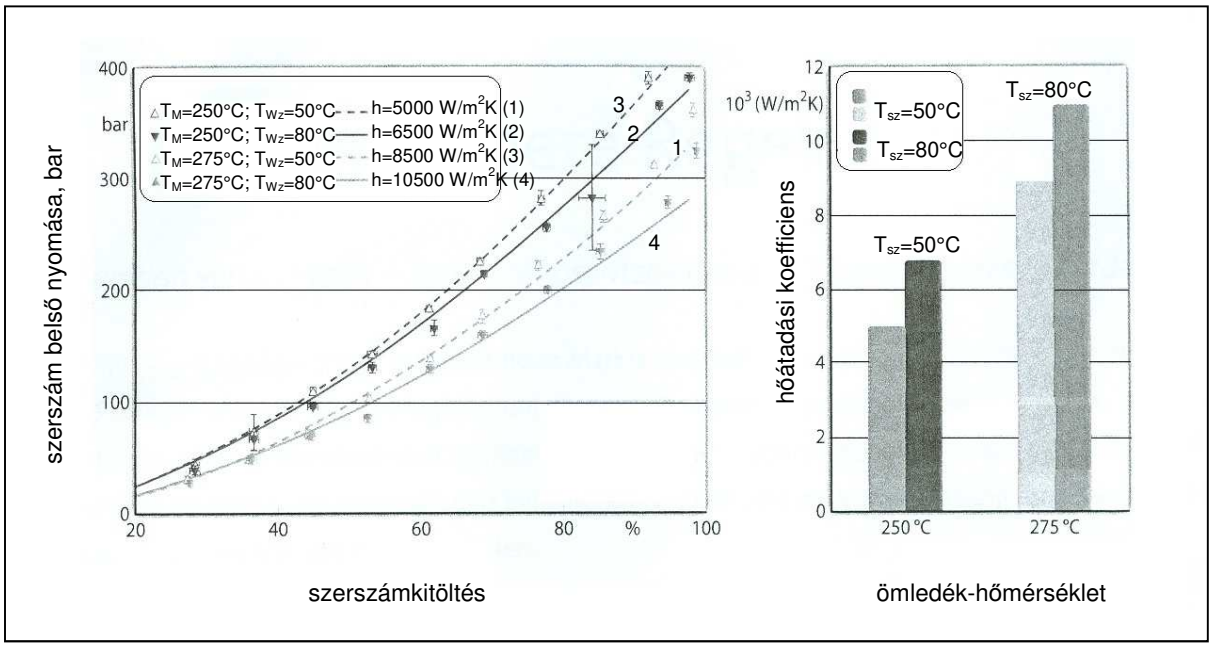



4. ábra A mikrostruktúrát alkotó piciny hengerformák csoportjainak elhelyezkedése a tesztpálca három régiójában

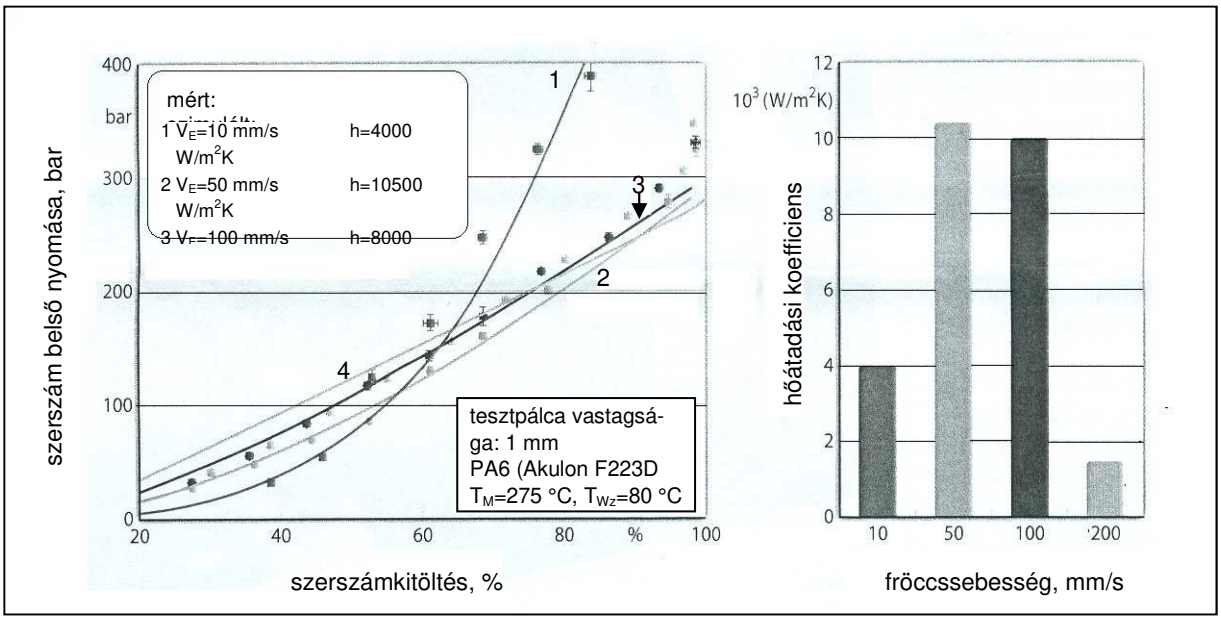



5. ábra A henger formájú struktúrák kialakítására szolgáló, átmenő furatos szerszámbetét részlete felülnézetből (balra); a szerszámbetét oldalsó nézete (középen) a hengerek végét lezáró, pontosan illeszkedő, kivehető maggal; a fröccsszerszám tartólapja a 3 hengercsoport szerszámbetétjeivel (jobbra)

Ha a fröccssebességet 50 mm/s-ra, illetve ennél magasabb értékre állították, azt tapasztalták, hogy növekvő fröccssebességnél a hőátadási koefficiens progresszíven csökken, és 200 mm/s-nál már csak 1500 W/m$^2$K *(7. ábra).* Még abban az esetben is, amikor a nyomáskülönbségek az egyes feldolgozási beállítások esetében kicsik, jelentősen eltérő hőátadási együtthatókat tapasztaltak. Gyorsabb befröccsöntésnél a szerszámkitöltés folyamata, vagyis az ömledék és a szerszámfal érintkezése is felgyorsult, tehát ezáltal kevésbé valósulhat meg az ömledék és a fal szoros érintkezésén alapuló hőátadás. Ugyanakkor a nagyon lassú befröccsöntési sebesség (ld. 10 mm/s érténél a 7. ábrán) esetében a trend megfordul, mert a szerszámüregben nincs elég nagy nyomás, amely egy hőszigetelő határréteg kialakulását kompenzálni tudná.




6. ábra A hőátadási koefficiens értéke növekszik a nagyobb ömledék ($T_M$)- és szerszámhőmérséklet ($T_{SZ}$) hatására (50 mm/s fröccssebességnél mérve)




7. ábra A szerszám belső nyomásának alakulása a kitöltés előrehaladásának függvényében, különböző fröccssebességeknél (1 mm falvastagságú tesztpálcával), illetve a hőátadási koefficiens fröccssebesség függése

A tesztpálca falvastagságának hatása az egyébként azonos szerszámkialakításnál jelentős szerepet játszik a mikrostruktúra formakövetésére. A kisebb falvastagságokhoz tartozó nagyobb fröccsnyomás a szerszámüregben a többi paramétertől többé-

kevésbé függetlenül hat az éles kontúrokkal rendelkező kis hengerekre. A formakövetés javul a növekvő falvastagsággal. A többi fröccsparaméter a 1,0 mm falvastagság esetében befolyásolja a legnagyobb mértékben az alakkövetés pontosságát.

A várakozásokkal ellentétben az ömledék-hőmérséklet emelése nem javítja a formakövetés minőségét, viszont a szerszámhőmérsékleté igen: magas szerszámhőmérsékletnél jó formakövetés volt tapasztalható mindegyik mikrostruktúra-csoportnál.

A részleges szerszámkitöltés is követhető volt a szimulációval. Elsősorban a legkisebb hengerátmérőnél (100 µm), de esetenként a következőnél (150 µm) is, a hengercsoportnak a beömlőtől mért távolságától függetlenül, részleges hengerkitöltést lehetett kimutatni.

Összeállította: Dr. Füzes László

Schut J. H.: Small, Smaller, Smallest = Plastics Engineering, 71. k. 7. sz. 2015. p.12–18.
Heneka J. et. al.: Spritzgießen von Mikropräzisionbauteilen = Kunststoffe, 105. k. 5. sz. 2015. p. 46–49.
Löser C. et. al.: Hier gelten andere Regeln = Kunststoffe, 105. k. 5. sz. 2015. 42–45.