Mikrofröccsöntés és mikrohőformázás

A mikrofröccsöntéssel, ill. mikroméretű termékek gyártásával foglalkozó 2. cikkünkben a fröccsöntött mikrotermékek szerkezeti vizsgálataival foglalkozunk. Bemutatunk egy új feldolgozási eljárást, az ún. termofolyási formázást, amellyel vékony falú mikroméretű termékek állíthatók elő.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; mikrofröccsöntés; szerkezetvizsgálatok; poliamid; hőformázás; fejlesztés; új technológia.

Fröccsöntött mikrotermékek szerkezeti vizsgálata

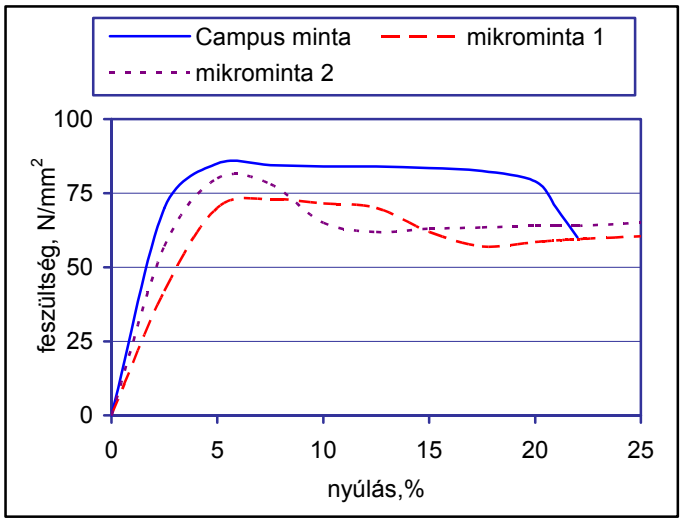
A megfelelő feldolgozóberendezések, szerszámok és a megfelelően megtervezett feldolgozástechnológia birtokában ma már sikeresen gyártanak fröccsöntött mikrotermékeket nagy sorozatban. A termékek vizsgálatára szolgáló módszereket azonban még fejleszteni kell, és hozzá kell igazítani a speciális követelményekhez.

A gazdasági előrejelzések szerint a mikroméretű alkatrészek iránti igény továbbra is nő, és a mikrofröccsöntés évi 15% körüli növekedése várhatóan még nem hagy alább. *A mikroalkatrészek fő alkalmazói az optika, a gépgyártás, a mikrofluidika, a biotechnológia és az orvostechnika, valamint az elektronika.* Jelenleg a mikroalkatrészek tervezésében és minőség-ellenőrzésében az információhiány jelent korlátokat, ezért az **Erlangeni Egyetem műanyag tanszéke** szisztematikus vizsgálatokba kezdett e hiányok pótlására. Vizsgálták a nagy nyírósebességek és a gyors hűtés hatását a kisméretű fröccsdarabokra, valamint a felhasználás során fellépő viselkedésre. Mindez szoros kapcsolatban áll a megfelelő vizsgálati módszer kialakításával. Részben kristályos polimerek esetében a homogén, kisméretű szferolitokat (nagyjából gömb alakú kristályos képződményeket) tartalmazó, nagy kristályossági fokú szerkezetek a kedvezők. Ezeket a jellemzőket részben pásztázó kalorimetriával (DSC), részben optikai mikroszkópiával lehet vizsgálni.

A hűtés hatása a mikrofröccsöntött termékekre

A fröccsöntött termékek szerkezete elsősorban a hűtési sebességtől függ. A kis méret és a hagyományostól eltérő felület/térfogat arányok miatt *a mikrotermékek sokkal gyorsabban hűlnek a szerszámban,* mint a nagyobb méretűek. Ha például egy **Arburg** *Allrounder* fröccsgépen egy jó hővezető képességű acélszerszámban PA66 alapanyagot (*Ultramid A3K, gyártó:* BASF) dolgoznak fel, a megszokottól eltérő szer-

kezet alakul ki. A felülethez közeli réteg gyorsan hűl ki, ami nem kedvez a szferolit növekedésének, ezért finom kristályos felületi réteg alakul ki, amelyben a szferolitok gyakran fel sem ismerhetők. Minél nagyobbak a szerszámfeltöltés során a nyíró és nyúlási áramlások, és minél nagyobb a hűtési sebesség, annál kifejezettebb a határréteg kialakulása a befagyott molekulaorientáció miatt. A határrétegtől távolodva nagyobb az esélye a szferolitok kialakulásnak, amelyek azonban az áramlás miatt deformáltak is lehetnek. A szabályos szferolitok csak az öntvény belsejében jelennek meg. Ha az öntvényeket kis hővezető képességű környezetben, pl. PEEK szerszámbetétekben állítják elő, már a határrétegben is nagy, jól fejlett szferolitok jelennek meg. Ilyenkor erősen orientált, néhány mikrométer vastag határréteg alakul ki, amelynek hatását a termék viselkedésére még tanulmányozzák. A hűtési sebesség befolyásolja a merevséget és a szilárdságot. A gyorsan lehűlő, acélszerszámban készült próbatestek lényegesen kisebb értékeket mutatnak, mint a lassan hűlő PEEK betétben készültek. A mikropróbatestek rugalmassági modulusa és szakadási nyúlása azonban alatta marad a hagyományos próbatesteken mérteknek *(1. ábra)*. Felmerül a kérdés, hogy az eltérés oka a kristályosság vagy a szferolitméret eltérése? A próbatestekből készült mikrometszetek infravörös mikroszkópiás vizsgálata azt mutatta, hogy a normál méretű próbatestek kristályossága jóval nagyobb, mint a gyors lehűtéssel készült mikropróbatesteké. Ha a lassú lehűtést kiváltó PEEK betéteket használják a mikropróbatest fröccsöntésekor, jelentősen megnő a kristályosság, de még mindig kisebb, mint a normál méretű próbatesteké.



1. ábra Különböző méretű és különböző körülmények között készített PA66 minták feszültség-nyúlás görbéi (mikrominta1: készült acélszerszámban, mikrominta 2: készült PEEK szerszámbetétben)

Felmerül az a kérdés is, hogy van-e összefüggés az átlagos szferolitátmérő és a kristályosság között? Az átlagos szferolitátmérő meghatározásának egyik módja a mikroszkópos képek analízise, de van egy egyszerűbb, közvetlen módszer is: a *kisszö-*

gű fényszórási (SALS) kép analízise. A szórási képet különböző monokromatikus, polarizált fényforrás (lézer vagy monokromatizált szűrővel ellátott LED vagy izzólámpa) segítségével lehet elkészíteni. A monokromátor utáni fénysugarat polarizátoron bocsátják át, majd a mintán és végül az első polarizátorhoz képest 90º-kal elfordított második polarizátoron. Szferolitos szerkezeteknél egy lóhereszerű kép adódik, amelynek adataiból kiszámítható az átlagos szferolitátmérő. Az így kapott átlagérték megbízhatóbb, mint a mikroszkópos kép analízisével kapott adat.

A normál méretű fröccsöntött próbatestnél durvább szferolitszerkezet jelentkezik (14,3 μm átlagos átmérő), mint a gyorsan hűtött mikropróbatestnél (5,4 μm), a PEEK betét felhasználásával készült mikropróbatest szferolitmérete a két előző közé esik (10,4 μm). A kristályosságra jellemző két infravörös sáv elnyelésének aránya (amely a kristályossági fokkal arányos) hasonló változást mutat *(1. táblázat)*. A kísérletekből azt a következtetést vonták le, hogy *a részben kristályos polimerek és mikrotermékek esetében a lassabban hűlő szerszámkörnyezet nagyobb szferolitokat és kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat eredményez.* Ez első látásra furcsa, mert a durvább szferolitok általában nem kedveznek a mechanikai tulajdonságoknak – itt azonban egyidejűleg a kristályosság mértéke is nő, és jelen esetben ez a döntő befolyásoló tényező. Ugyanakkor a mikropróbatestek még lassú hűtés után sem mutatnak azonos fizikai tulajdonságokat a normál méretűekkel, amit pl. a méretezéskor figyelembe kell venni.

1. táblázat

Különböző módon készült próbatestek kristályossággal arányos IR sávjainak elnyelési aránya

Próbatest		**Kristályosság** $E_{1200\ 1/cm}/E_{1180\ 1/cm}$
Normál méretű próbatest		4,16 ± 0,06
Mikropróbatest	acélszerszámban	1,53 ± 0,06
	PEEK betétben	3,07 ± 0,14

Vékony falú mikrofröccstermékek

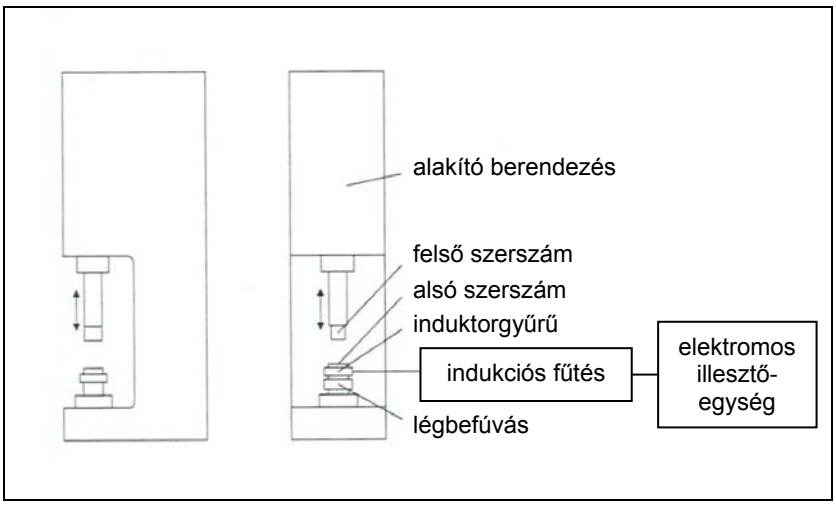
A mikrofröccsöntött termékek vékony fala miatt eddig főként jól folyó műanyagokra korlátozódott a technológia, mert azok könnyen feltöltötték a finom részleteket is. A kutatás-fejlesztési munkák is nagyrészt ilyen anyagokra irányultak. Ugyanakkor a legjobb mechanikai jellemzőket a nagy molekulatömegű anyagok biztosítják, amelyek rendszerint nehezen folynak. A PE-UHMW vagy a PTFE hagyományos fröccsöntéssel nem is dolgozható fel – ezért ezek eddig szóba sem kerültek a mikrofröccsöntéssel kapcsolatban. Ezeket az anyagokat eddig rendszerint forgácsolásos eljárással dolgozták fel késztermékké félkész termékekből (tömb, rúd, profil, fólia) kiindulva. Nagy sorozatok esetében azonban ez a módszer sem gazdaságosnak, sem környezetkímélőnek nem nevezhető. Az **Aalen-i Főiskolán** Németországban egy olyan új

feldolgozási módszert fejlesztettek ki, amely *mikrohőformázási eljárással lehetővé teszi vékony falú háromdimenziós termékek előállítását tetszőleges hőre lágyuló műanyagból, akár még a fröccsöntéssel fel nem dolgozható PTFE-ből is.*

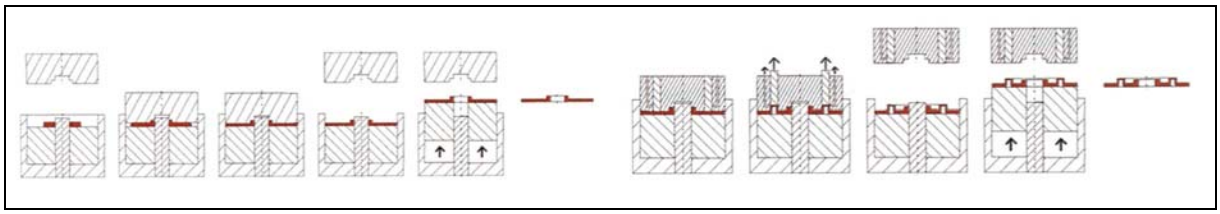
A módszer alakítási mechanizmusa arra épül, hogy az anyag *termoleasztikus állapotban* folyik. A termoelasztikus állapotú anyag leképezi a forma felszínét, és így alakul ki a kívánt háromdimenziós geometria. Termoelasztikus állapotban az anyag kevésbé folyik, mint megömlesztett állapotban, ezért az előformát vagy a port úgy alakítják ki, hogy a szükséges folyási út rövid legyen és a viszkózus anyag is képes legyen kitölteni a formát. *Az új eljárást termofolyási formázásnak nevezték el.*

A módszer részletes ismertetése

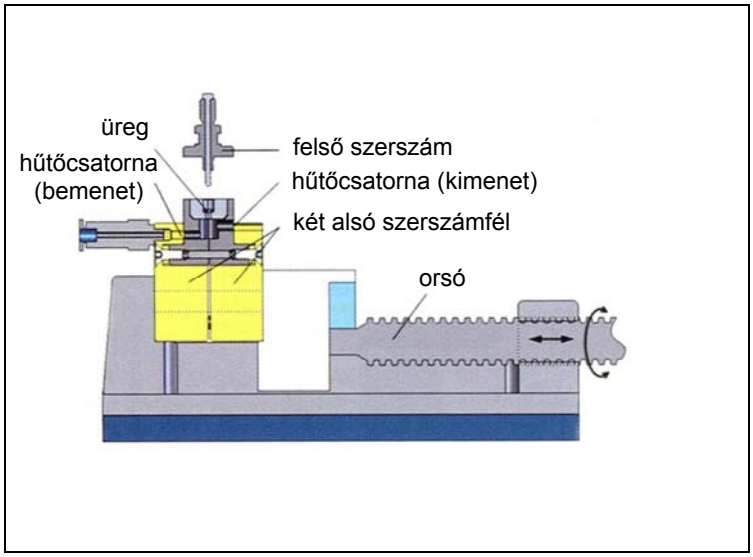
A térfogat szerint adagolt kiindulási anyagot bejuttatják az előmelegített szerszámba, majd felmelegítik a termoelasztikus állapotba. A mozgatható betét vagy a szerszám felső fele által kifejtett nyomás hatására az anyag befolyik az üregbe és kialakul a termékgeometria. A hűtés során az anyag megmerevedik és a terméket el lehet távolítani a szerszámból. Az eljárásnak vannak különböző változatai. Lehet teljesen ömledékből is dolgozni, ilyenkor a mozgó szerszámbélyeg hatására ömledékkel töltődik fel a szerszámüreg, de utána arra is lehetőség van, hogy az így kialakított geometriát tovább módosítsák hőformázással. Ennek feltétele az, hogy a második lépésben az anyag termoelasztikus állapotban legyen. Itt a felső szerszámbélyeget mozgatható betéttel és vákuumcsatornával látják el. A szerszámüreg megtelése és a primer geometria kialakítása után a mozgatható betét egy jól meghatározott, második állásba kerül, amelynek két funkciója van. Egyrészt újabb kontúrt képez a termoformázáshoz és megnyitja az utat a vákuumcsatornához, amivel a kombinált hőformázási lépést segíti. A kontúr teljes kialakulása után következik a hűtés és a termék eltávolítása. A kombinált termofolyási formázás nagyon nagy igényeket támaszt a szerszámkészítőkkel szemben.



2. ábra A termofolyási formázáshoz használt kísérleti berendezés felépítése



3. ábra Az osztható alakítószerszámot a szerszámtartó lemezekre szerelik fel



4. ábra A termofolyási formázáshoz használt termelő berendezés elvi felépítése

A kísérleti feldolgozó berendezés

A kísérleti berendezés alkotóelemei a következők: egy szervoelektromos alakítóegység, egy alakítószerszám, amely mozgatható felső részből és szilárdan álló alsó részből áll, valamint egy fűtőegység a szerszámhoz *(2. ábra)*. A megvalósíthatósági tanulmányhoz egy egyszerű szerszám készült, mind alul, mind felül egy-egy betéttel. Ezek képezik zárt állapotban a formaadó felületet. Az alsó szerszám hosszirányban osztható (két szerszámfélből áll), ami segíti az elkészült termék kivételét. Az első szerszámtartó lemezt tartópofák rögzítik *(3. ábra),* és van rajta egy nyílás a hűtőlevegő bevezetésére. A második tartólemez a szerszámtartó mozgatható tartópofájára van rögzítve, amelyet egy orsó segítségével lehet mozgatni. A mozgatható tartópofa teszi lehetővé, hogy a hosszában szétnyitható szerszámot kinyissák és bezárják *(4. ábra)*. A második lemezen van egy nyílás a hűtőlevegő eltávolítására. A két nyílás egymáshoz képest eltolva helyezkedik el, hogy javuljon az átáramlás és a hűtés hatásfoka. *A cél*

az, hogy a termofolyási formázás ciklusideje olyan rövid legyen, mint a fröccsöntésé. Ennek érdekében a szerszámban induktív fűtési módszert alkalmaznak. A szerszámba helyezett kiindulási anyag (por vagy előforma) indirekt módon, a szerszámmal érintkezve melegszik fel. Az indukciós tekercset úgy pozicionálják, hogy az a szerszám felületét fűtse, és így a hő könnyen és gyorsan átkerüljön a műanyagba. Arra figyelni kell, hogy a melegítendő felület lehetőleg egyenletes legyen. Ha az induktívan felmelegítendő anyag és annak az induktortekercstől való távolsága egyforma, akkor a szerszámüreget alulról és felülről egyenletesen át lehet melegíteni. Az előkísérletekben a teljes 10 kW-os fűtési teljesítmény 45%-ával dolgoztak, és vizsgálták, hogy különböző időtartamok alatt mekkora szerszámhőmérsékletet lehet elérni a felső és az alsó szerszámfélben. Az így nyert adatokat a későbbi fűtésszabályozásnál használták fel. Egy PTFE termék feldolgozásánál pl. 317 ºC-ot állítottak be, amelyet kb. 10 s alatt értek el. A termék alakját kb. 0,1 mm/s sebességgel hozták létre, a lehűtési idő pedig 20 másodperc volt. Ilyen paraméterekkel háromféle mikrotömítést gyártottak le *(2. táblázat),* különböző gyűrű alakú PTFE előformák segítségével *(3. táblázat).* Az eljárás sikerét a kívánt és elért dimenziók összehasonlításával lehet jellemezni. A várt geometriák jól létrejönnek és látható a szerszámzáróvonal is. *Ez a módszer lehetővé teszi egyébként nem fröccsönthető hőre lágyuló műanyagokból mikroalkatrészek kialakítását.* Bizonyos mértékű vetemedés megfigyelhető volt a prototípusokon, de ezt nem annyira a módszer, mint inkább a szerszám kialakításának a következménye. A felhasznált szerszámok előállításakor nem kellett mikromegmunkálási technológiákat használni. Ha kimérik a termékhez szükséges pormennyiséget vagy ha előformából indulnak ki, az eljárás gyakorlatilag hulladékmentes. Előnye a mikrofröccsöntéssel szemben, hogy nincs beömlés és nincsenek összecsapási vonalakból származó gyenge helyek a termékben. A módszer bevezetése a termelésbe már a közeljövőben lehetséges, és segítségével újfajta termékek előállítása válik lehetővé.

2. táblázat

Az előállított mikrotömítések célgeometriája

Méret	**I mikrotömítés**	**II mikrotömítés**	**III mikrotömítés**
Külső átmérő Da, mm	7,5	4	2,5
Belső átmérő Di, mm	3	2	1
Kiemelkedés magassága hA, mm	1,4	1	0,8
Kiemelkedés vastagsága dA, µm	250	200	150
Falvastagság, µm	400	250	150
Belső kiemelkedés= ½ hA			

3. táblázat

A termofolyási formázással előállított mikrotömítések gyártásánál felhasznált előformák méretei

	Az előformák méretei		
Mikrotömítés	**Da, mm**	**Di, mm**	**D mm**
I	6	4	1
II	4	2	0,5
III	2,5	1	0,5

Összeállította: Dr. Bánhegyi György
www.polygon-consulting.ini.hu

Jungmeier, A.; Hülder, G.; Schmachtenberg, E.: Durchschaut = Plastverarbeiter, 60. k. 7. sz. 2009. p. 36–38.
Frick, A.; Rochman, A.; Schlipf, M.; Stern C.: Kleiner, dünner, leistungsfähiger = Plastverarbeiter, 61. k. 2. sz. 2010. p. 18–20.