

A mikrofröccsöntés jelene és lehetőségei

A mikrotermékek ma már a műanyagtermékek között is megtalálhatók. A 100 mg tömegű alatti termékek fröccsöntése komoly kihívást jelent a fejlesztők számára a szerszámtervezésben és a fröccsöntés kivitelezésében.

Tárgyszavak: mikrofröccsöntés; mikrotermékek; hőátadás; autóipar; orvostechika; számítástechnika; lézerszinterezés; lézerhegesztés.

*Rövidítések: MID = mikrointegrált eszköz;
2K fröccsöntés = kétkomponensű fröccsöntés;
MEMS = mikrokapcsoló;
LSR = folyékony szilikongumi.*

A miniatürizálás, mint napjaink „megatrendje”

Manapság a miniatürizálás az ipari termelés általános tendenciája, amelynek hatása alól szinte egyik iparág sem vonhatja ki magát, kulcskérdéssé vált a hatékonyság, a munkahelyek megtartása és a versenyképesség tekintetében. Az okok egyszerűek: szükség van a különböző funkciók kombinációjára, a hely-, a tömeg- és az energiatakarékosságra. *Többféle értelemben is beszélhetünk mikrotermékekről, pl. mikroszerkezetekről, mikroalkatrészekről, mikrostrukturált felületekről és hibrid mikroeszközökről.*

Az ehhez kapcsolódó iparágak évi 20% körüli növekedési rátát mutatnak. Ide sorolható a finommechanika, a távközlés, az orvostechika és a biotechnológia, és egyre inkább az autógyártás bizonyos részei is. Az értékesebb autókba ma már 150–200 léptető motort és közel százféle szenzort építenek be, amelyek működésében a mikrogyártási eljárások kulcsszerepet játszanak. A nagy darabszám a bonyolult megoldásokat is egyre olcsóbbá teszi, de ehhez folyamatos fejlesztést kell végezni. A hétköznapi alkalmazások közül talán az autóipar van az első helyen (légzsákszenzorok, fogyasztásmérők, abroncsnyomás-szenzorok, klímaszenzorok stb.), de jelentősek az orvostechikai alkalmazások is (távoli felügyeleti rendszerek, mikrosebészeti eszközök stb.).

Ami a nyersanyagokat illeti, ma még a mikroeszközök területén a *félvezetők* (szilícium és félvezető vegyületek) vannak az első helyen, hiszen ezek mikromegmunkálási technológiái a legkidolgozottabbak, de a *fotolitográfiásan feldolgozható üvegek, fémek* is fontos szerepet játszanak. A *polimerek* viszonylag későn csatlakoztak a „csapathoz”. Az anyag kiválasztásnál a technológiák mellett azt is figyelembe kell venni,

hogy milyen közegekkel kerül érintkezésbe az adott termék. Különösen fontos ez az ún. mikroreaktorok esetében, amelyekben szabályos kémiai reakciók játszódnak le. A polimerek nagy előnye, hogy megfelelő szintetikus módszerek vagy felületkezelési eljárások segítségével igen széles tartományban változtatható az alapanyagok szilárdsága, mechanikai, villamos, optikai, mágneses jellemzői, biokompatibilitása, sterilizálhatósága stb. Az orvostechikában, biotechnikában, mikrooptikában alkalmazott polimerek között említhető a PMMA, a POM (poliacetál), a poliamidok, a polikarbonát, az amorf ciklikus polimerek (COC) és a poli(éter-éter-keton) (PEEK). A polimerek előnye, hogy a mikroszerkezetet jól reprodukálhatóan lehet kialakítani, pl. fröccsöntéssel, dombornyomással, hátrányuk viszont a korlátozott mechanikai és termikus terhelhetőség. Az, hogy valami polimerből készül, ezen a területen nem feltétlenül jelent ár-előnyt, hiszen itt nem nagy mennyiségekről van szó, és a kereskedelmi polimertípusokat gyakran optimalizálni kell az adott alkalmazáshoz.

A mikrotechnológiák fő feldolgozási módszerei eddig a különböző félvezetőipari technológiák (látható fény-, UV- és röntgenlitográfia, fizikai és kémiai gőzlecsapási módszerek stb.) voltak, de ma már a mikrofröccsöntés és a mikrodombornyomás is a bevált megoldások között szerepel. *A mikrofröccsöntést olyan hibrid szerkezetek előállítására is sikerrel alkalmazzák, mint a mikrointegrált eszközök (MID), ahol 2K (két komponensű) fröccsöntéssel alakítanak ki galvanizálható és szigetelő jellegű műanyagokból bonyolult integrált áramköri és kapcsolóelemeket.* Vannak olyan szerszám nélküli megmunkálási eljárások is, mint a *lézeres mikrostrukturálás*, de ezt jelenleg csak kisebb darabszámok esetében lehet használni.

A mikroalkatrészek előállítása után az alkatrészekből rendszert kell összeépíteni. A szenzorokat, aktuátorokat, az optikai és fluidikai eszközöket az elektronikával kombinálva egy működő egésszé kell összehozni. Vannak monolitikus megoldások, ahol minden elemet egy szubsztrátumba integrálnak vagy azon hoznak létre, más esetekben azonban ún. hibrid integrációt alkalmaznak.

A piac mérete és a jövő lehetőségei

A mikrotechnológia jelenlegi legfontosabb piacai az információtechnológia, az autóipar, a fogyasztási eszközök, az orvostechika, valamint az ipari feldolgozótechnológiák. *2004-ben a piac becsült mérete 11 milliárd USD volt, 2009-re azonban már 24 milliárd USD a várt forgalom.* Egyedül a MEMS (mikrokapcsoló) piac 2005 és 2008 között 5,6 milliárd USD-ről 8,5 milliárd USD-re nő. Ezeket az eszközöket olyan eltérő helyeken használják, mint a mikronyomásszenzorok vagy a tintasugaras nyomtatófejek. A jelenlegi és a jövőbeni piacok megoszlása regionálisan (Amerikában, Európában és Ázsiában) többé-kevésbé eltérő, de közös jellemzőjük a gyors növekedés. Észak-Amerikában a vezető termékek a mágneses olvasó- és írófejek, a mikrodializátorok és a tintasugaras nyomtatófejek. Európában az autóipar, a telekommunikáció (azon belül is a mobiltelefon-piac) és az ipari folyamatellenőrzés a vezető alkalmazások. Ázsiában a legerősebb a számítástechnikai perifériagyártás (merek, nyomtatók), de egyre fontosabb a mobiltelefonok és a fogyasztói elektronika

gyártása is. Kína autóiipari beszállítóként is egyre fontosabbá válik, és ezen a területen alkalmazza és fejleszti a mikroméretű gyártástechnológiát.

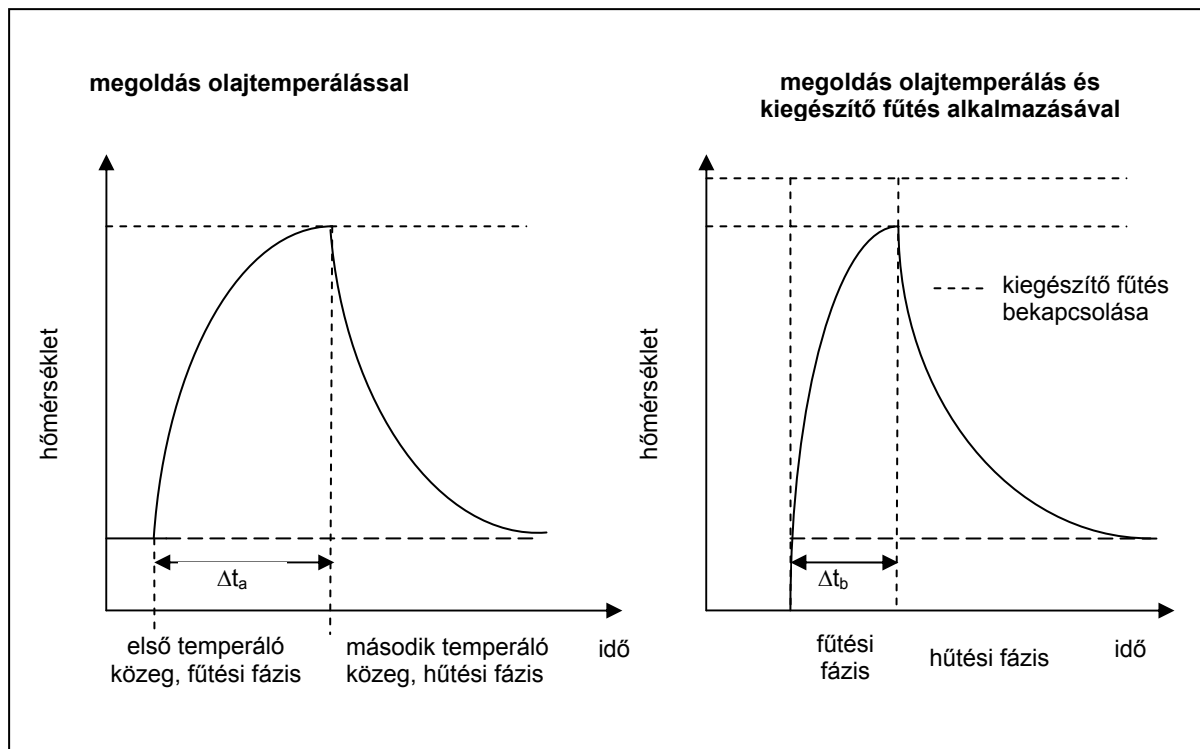
A mikrofröccsöntés jelentősége

Németországban a műanyag-feldolgozás egyik új technológiájának, a mikrofröccsöntésnek olyan jelentőséget tulajdonítanak, hogy a **Német Mérnökegyesület (VDI)** 2006 februárjában rendezett kiállításának és szimpóziumának középpontjába a szerszámkészítés és azon belül is a mikrofröccsöntési technológiák kerültek. *A hagyományos fröccsszerszámok területén olyan erős a verseny, hogy új és új megtakarítási lehetőségeket kell keresni annak érdekében, hogy valaki a piacon maradhasson.* Egyrészt egyre többet várnak el a termékektől (beleértve az egyre változatosabb formákat), másrészt egyre rövidül a termékek életciklusa, tehát egyre gyorsabban, egyre bonyolultabb szerszámokat kell előállítani – ráadásul egyre olcsóbban.

Mikrofröccsöntésről akkor beszélünk, ha a termék tömege kisebb 100 mg-nál, a geometria 0,2 mm alatti részleteket tartalmaz, vagy ha az elvárt méretpontosság <0,127 mm (0,005 inch). A mikrotermékek előállítása a folyamatszervezés szempontjából is különleges követelményeket támaszt. Alaposan végig kell gondolni a fejlesztés, a gyártás és alkalmazás minden részletét, hogy a gyenge pontokat előre felmérjék és kiküszöböljék. Különösen kritikus a mikrofröccsöntő szerszám kialakítása (szerszámkitöltés, beégések, darab eltávolítása), de fontos a minőségbiztosítás és a késztermék csomagolásának megtervezése is. A fröccsgép kialakítása is különleges megoldásokat igényel (nagy töltési sebesség, gyors vezérelhetőség, gyors kapcsolások, speciális robotok stb.).

A szerszám hőmérsékletprogramjának beállítása

A termék gyártásához szükséges technológiát mindig a termékkel szembeni elvárások ismeretében kell megválasztani, amelyet részben az alkalmazás körülményei, részben az ezekből fakadó specifikáció határoz meg. A mikrofröccsöntés során a szerszámot az ömledék-hőmérsékletre hevítik fel, majd befröccsöntés után arra a hőmérsékletre hűtik, amelyen a termék a szerszámból kivehető (ún. *Variotherm eljárás*, ld. az 1. ábrát). Már a hetvenes években kísérleteztek azzal, hogy egymással szembekapcsolt hűtő- és fűtőkörökkel szabályozzák a szerszámok hőmérsékletét – ezzel állítva be az ömledék megszilárdulásának körülményeit. A kilencvenes években más megoldásokkal próbálkoztak, a fűtőközegek és az ellenállásfűtés mellett pl. a hősugárzást, lángot vagy indukciós hőt használták a szerszámok fűtésére. *A Variotherm eljárás ciklusidejét azonban csak az elmúlt években sikerült 20 percről 1 perc alá csökkenteni.* A megoldás titka az, hogy nem az egész szerszámot, hanem csak annak felületét kell felmelegíteni. A hűtés során is arra kell törekedni, hogy az lehetőleg csak a fröccsöntött termékből távolítsa el a hőt.



1. ábra A Variotherm eljárás vázlata

Az indukciós fűtés nem jelent mindenre megoldást

Az indukciós fűtés alkalmazása (amely ideálisan használható a felület felfűtésére) szigorú követelményeket támaszt a szerszámmal és a folyamatok összehangolásával szemben. Az indukciós egység csak ritkán integrálható magába a szerszámba. A gyakorlatban leginkább az a megoldás terjedt el, hogy az induktort befordítják a nyitott szerszámba, és csak a kérdéses szerszámrészt melegítik fel. Ez csak bizonyos szerszámkonstrukciók esetében használható, hiszen az indukciós tér három dimenzióban alakul ki.

1. táblázat

A különböző hőátadási módszerek hatékonyságának összehasonlítása

| Melegítés módja | Példa | Lehetséges hőátvitel (W/cm ²) |
|-----------------|---------------------|---|
| Konvekció | forró levegő | 0,5 |
| Sugárzás | infravörös sugárzás | 8 |
| Hővezetés | villamos fűtés | 20 |
| Láng | égő | 1 000 |
| Indukció | induktor | 30 000 |

Jóval gyakrabban alkalmaznak *lokális fűtőelemeket* a forrócsatornák vagy a mikroszerkezetek közelében. Az ellenállásfűtéseknel sikerült olyan megoldásokat kifejleszteni, amelyek segítségével a szerszám felülete akár 5 másodpercen belül 500 °C-ra felhevíthető. A különböző hűtadási módszerek hatékonyságát az *1. táblázat* hasonlítja össze.

Szerszámgyártás lézeres szinterezéssel

A gyors prototípusgyártásra kidolgozott lézerszinterezéssel is lehet speciális szerszámokat előállítani. A fémporokból kiinduló lokális fűtés alkalmazásával rétegenként felépített szerszámok alakja szinte tetszőleges lehet, olyan 3D geometriák is kialakíthatók, amelyek a hagyományos forgácsolási technikákkal csak nehezen vagy egyáltalán nem. Az eddig főleg prototípusok gyártására használt technológiát ma már egyre inkább felhasználják a szerszámgyártásban is. A felbontás és a felületminőség javításával a technológia bevezethető a mikrofröccsöntő szerszámok területére is. A problémák sorának (közegekkel szembeni átjárhatóság vagy záróképesség, a helyi hővezető képesség és hőtágulás tervezett változtatása, felületminőség, anyagszilárdság) megoldása interdiszciplináris megközelítést igényel, hogy az ötletből megvalósítás legyen. Mindez azt is lehetővé teszi, hogy az eddigi makroszkópos technológiát a mikrométeres tartományra is kiterjesszék.

A tapasztalatok hasznosítása más területeken

A tapasztalatok más területekre is átvihetők, (vagy onnan átvehetők), pl. a biotechnológiában felhasznált DNS-szaporító láncreakciók (PCR) megvalósítására, ahol ugyancsak 4 és 98 °C között kell gyakran változtatni a hőmérsékletet. Ezen a területen rutinszerűen sikerült 6 K/s fűtési és 4,5 K/s hűtési sebességet elérni. Itt az ún. *Peltier-modulokat* használják, amelyek a termoelektromosságban ismert *Seebeck-effektus* fordítottjával, a Peltier-effektussal dolgoznak. A Seebeck-effektus lényege az, hogy két különböző fém (vagy félvezető) érintkezésekor a hőmérséklet-különbség hatására termofeszültség lép fel (amelyet hőelemekben vagy termoelektromos átalakítóknak használnak fel, pl. a Naprendszer távoli bolygói felé indított űrszondák villamos energia ellátására). A Peltier-effektus pedig ennek fordítottja: feszültség hatására ugyanazon pontok között hőmérséklet-különbség alakítható ki. *A Peltier-effektus szerszámok impulzusszerű hűtésére is felhasználható.*

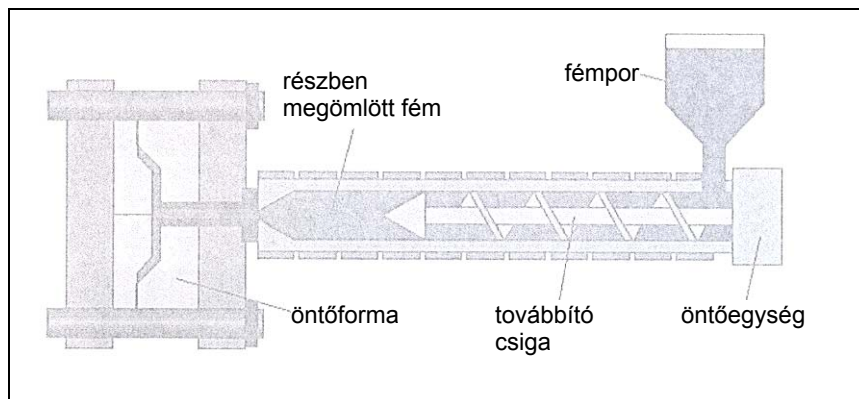
Új alkalmazási lehetőségek

A gyártók folyamatos fejlesztéseinek köszönhetően az alkalmazóknak már egy egész sor kis fröccstömegű (mg-os nagyságrendű terméket előállító) egység áll rendelkezésre. Ezeknél még nem beszélhetünk ipari bevezetésről – egyelőre az ilyen berendezések iránti igény jóval kisebb, mint a hagyományos fröccsegységek iránt. Elképzelhető azonban, hogy pl. az új polimerek kifejlesztése során egyre nagyobb igény lesz

kis fröccstömegű egységek iránt – hiszen egy-egy újonnan kifejlesztett polimerből gyakran mindössze néhányszor 10 g áll rendelkezésre, mégis jó lenne kipróbálni fröccsöntési jellemzőiket. Ez komplex feladat, hiszen a reológiai jellemzők mellett a mechanikai, morfológiai stb. tulajdonságokat is vizsgálni kell.

Ahhoz azonban, hogy ezek a berendezések túllépjenek a fejlesztőintézetek szűk körén, a prototípusokból ipari berendezéseket kell építeni. A hagyományos fröccsgépgyártók érdeklődése a terület iránt egyelőre csekély. A gépészeti technológia nem túl bonyolult, azonban a rendelkezésre álló gyártóberendezések nem alkalmazhatók, az új vevők köre viszonylag szűk – így a lelkesedés érthetően nem túl nagy. Ezzel viszont megnyílik a lehetőség olyan új cég vagy cégek számára, amelyek új gyártási és marketingkoncepcióval lépnek fel.

A gépgyártásban olyan új elvek jelentek meg, mint pl. az ún. *Thixomolding* (ld. a 2. ábrát). Bizonyos magnéziumötvözeteket 600 °C-on nagy sebességgel (akár 6 m/s befroccsöntési sebességgel) lehet fröccsönteni. A problémát az jelenti, hogy a magnéziumötvözetek folyása nagyon érzékenyen függ a nyomásingadozásoktól, pl. attól is, amikor a fröccsnyomásról átváltanak az utónyomásra. Ennek a problémának a megoldására az amerikai **Thixomat** cég a **Husky** és a **Japan Steel Work** cégekkel együttműködve olyan szabadalmaztatott módszert fejlesztett ki, amelyet a mikrofröccsöntésben is hasznosítani lehet.



2. ábra Az ún. Thixomolding módszer vázlata

Újszerű megoldások a plasztifikálásban

Az Aachenben működő **Műanyag-feldolgozó Kutatóintézet** (Institut für Kunststoffverarbeitung, IKV) az ultrahangos hegesztésben szerzett tapasztalatokat hasznosítva *ultrahangos plasztifikálás* fejlesztésével próbálkozik. A fő különbség a hegesztéssel szemben, hogy míg ott elég egy vékony felületi réteg megömlesztése, a fröccsöntéshez az anyag egész tömegét ömledékállapotba kell hozni. A mikrofröccsöntésben, ahol igen kis anyagmennyiséget kell feldolgozni, nagy követelmények lépnek fel a gépészeti megoldásokkal szemben. Komoly problémát jelent az is, hogy a

mg-os darabsúly esetén a feldolgozott mennyiség gyakran mindössze egyetlen granulátum vagy még kevesebb, hiszen egyetlen granulátum tömege 20–25 mg. A termék tulajdonságait tehát egyetlen granulátum jellemzői (ennek eloszlása, reprodukálhatósága) határozzák meg. A hagyományos fröccsdaraboknál a termék jellemzőit számos granulátum jellemzőinek átlaga határozza meg.

A mikrofröccsöntéshez használt anyagokkal szemben komplex követelményeket támasztanak: kis viszkozításra, minimális szilárd szennyezettségre, nagy szilárdságra, merevségre, szívósságra, gyors megszilárdulásra, szűk feldolgozási hőmérsékleti intervallumra, kis vetemedésre, erős szerkezeti viszkozításra, nagy homogenitásra, kis méretű granulátumra (inkább por formára) és a szerszámból való jó eltávolíthatóságra van szükség. A mikrofröccsöntési alapanyagok jellemzőit a végfelhasználás körülményeihez, ugyanakkor a feldolgozási módszer jellegzetességeihez is hozzá kell igazítani. *Tekintettel azonban a minimális anyagigényre, az alapanyaggyártók nem mutatnak nagy érdeklődést az ilyen irányú fejlesztések iránt.* A feldolgozott anyagmennyiségek és az alapanyagárak közti összefüggés alapján az 1 tonna alatt gyártott mennyiségek-nél >500 EUR/t árral, de a 10 vagy 1 kg-os tételeknél 5–10 000 EUR/kg, vagy ezt még meghaladó árral kell számolni. Bizonyos területeken azonban, pl. az ún. biocsipek gyártásában, ahol tömeges felhasználásra lehet számítani már a közeljövőben, elképzelhető, hogy egy cég ennek a speciális igénynek a kielégítésére rendezkedik be.

Összehasonlítás a szilikon fröccsöntésével

Mivel teljesen új anyagok kifejlesztésére is sor kerülhet, nem haszontalan a mikrofröccsöntés összevetése a folyékony szilikongumi (LSR) fröccsöntésével, amely ugyancsak teljesen eltérő tulajdonságokat mutat a hagyományos fröccsanyagoktól. Az LSR anyagok egyik jellegzetessége a hűtés során a nagy hőtágulási tényezéből származó erős zsugorodás, amelyet különben célzottan kihasználnak a szerszám feltöltésekor. Ugyanezt az elvet ki lehet használni a mikrofröccsöntésben is arra, hogy „kímélő” nyomási viszonyok között töltsék fel a szerszámot. Erre különösen a mikrofor-gácsolással készült szerszámok esetében van szükség, amelyeket sárgaréz-ből készítenek, adott esetben nikkellel ötvözve. Egyik fémötvözet sem elég kemény ahhoz, hogy hagyományos fröccsszerszámokat lehessen belőlük készíteni, ezért a szerszámot kisebb nyomással kell feltölteni.

A folyamat részleteinek összehangolása

Ahhoz, hogy egy mikrofröccsöntéssel készült terméket sikeresen bevezessenek a piacra, gondosan össze kell hangolni a folyamat lépéseit a termék megtervezésétől a feldolgozásig. *Folyadékot adagoló tubusok* (cartridge, cartouche = kartus) fröccsöntésekor a végterméket gyakran két félből hegesztik össze lézer segítségével. Maguk a hegesztett alkatrészek hidrofób (nem nedvesítő) jellegűek a beléjük töltött folyadékkal szemben. A hegesztés során képződő gőzök azonban lecsapódhatnak a kartus belső felületén, és azt nem kívánatos módon nedvesítővé tehetik a folyadékkal szemben. En-

nek a problémának a megoldásához a feldolgozó mérnököknek szorosan együtt kellett működniük a fizikusokkal, hogy végül egy utólagos felületkezeléssel helyreállítsák az eredetileg kívánatos felületi jellemzőket. Egy 150 mg-os fogaskerék fröccsöntésekor ugyancsak igen szoros együttműködésre volt szükség a gépgyártó és a feldolgozó között ahhoz, hogy egy ilyen finom mozgó alkatrész előállítását zavarmentesen meg lehessen oldani.

Az intenzív kutatást az is szükségessé teszi, hogy a különböző folyadék, oldat vagy ömledékfázisokból történő szilárd termék előállításakor a határfelületi (kapilláris) jelenségek a fluid és a szilárd fázisok között különleges szerepet játszanak.

Ipari mikrofröccsöntés összefogással

Svájcban három cég (egy szerszámgyártó, egy mikrofröccsöntő és egy precíziós fröccsöntő) **BCR Plastic AG** néven új céget alapított, amely a precíziós és mikrofröccsöntéshez tartozó problémák széles körére tud kulcsrakész megoldást kínálni. A szolgáltatások megrendelhetők együtt vagy külön-külön is, legyen szó szerszámtervezésről, szerszámgyártásról, termékfejlesztésről vagy sorozatgyártásról. A kis, önállóan az autóiipari beszállító rangját kivívni nem képes cégek összefogása olyan sikeresnek bizonyult, hogy ma már heti hét napban, három műszakban dolgoznak az igények kielégítésére.

A milligrammos alkatrészekből akár évi 100 millió is készülhet, a minőségellenőrzéshez speciális mikroszkópokat kellett üzembe helyezni, hiszen a megkívánt méretpontosság 10 µm alatti. Egy léptető vagy beállító motor rotortengelyének átmérője 1,8 mm, hossza 2,5 mm, tömege mindössze 1,2 mg, POM-ból gyártják évi 100 milliós darabszámmal, 16 fészkes szerszámban, egy hagyományos, 300 kN záróerejű fröccsgépen, 2,2 másodperc ciklusidővel. A két, egyenként 8 fészkes szerszámfél forró csatornás rendszerű. A termékkivételnél használt eszközöket maga a cég fejlesztette, akárcsak a cserélhető szerszámbetéteket, amelyek segítségével számos termék ugyanabban a szerszámban állítható elő. Ilyen termékeket egyre többet használnak fel a kamerákban és órákban is. Az eljárás megvalósításához egy teljesen villamos, *Roboshot* márkájú fröccsgépet választottak, mert csak ez felelt meg a komplex követelményeknek. Ezekből a gépekből 300 és 500 kN záróerejűek álltak rendelkezésre 16, 22 és 28 mm-s standard csigákkal. *Csak teljesen villamos vezérlésű gépekkel képzelhető el az, hogy a szerszámnyitás során már folyik a következő fröccsadag plasztifikálása. Az ilyen berendezések számos részfolyamat egyidejű indítására és végrehajtására képesek – így a ciklusidő egy hidraulikus berendezéshez képest akár harmadára is csökkenthető.*

A precizitás, a speciális darabeltávolítás és a rendkívül gondos folyamatirányítás lehetővé teszi, hogy még egy millió darab legyártása után se lépjen fel szerszámkopás – amire a nagy méretpontosság miatt szükség is van. A vezérlés és annak dokumentációja a minőségbiztosítási rendszer lényeges részét képezi, és erre a felhasználók igényt is tartanak. *A teljesen villamos vezérlésű gépek egy nagyságrenddel pontosabban, mint hidraulikus társaik. A zárás sebessége és finomsága is sokkal jobban szabá-*

lyozható, ami ilyen apró termékeknél nagyon fontos, és jelentősen megnöveli a szer-
számok élettartamát.

A bemutatott példák azt sugallják, hogy noha a műanyagok mikrofröccsöntése még nem tekinthető érett technológiának, sok a megválaszolatlan kérdés és a megoldandó probléma, a technológia és annak termékei iránti igény folyamatosan nő és biztosan állítható, hogy fényes jövő áll előtte.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György

Mikroteilchen im Mittelpunkt. = K-Zeitung, 2006. febr. 3–9. p. 13.

Neuy, C.: Megatrend Miniaturisierung. = K-Zeitung, 2006. febr. 3-9. p. 14–15.

Spezielle Anforderungen an das Projektmanagement. = K-Zeitung, 2006. febr. 3-9. p. 16.

Rogalla, A.: Mikrospritzguss bietet viel Entwicklungspotenzial. = Kunststoff Berater, 51. k. 3. sz. 2006. p. 39–43.

Rogalla, A.: Nur Kooperation im Prozess führt zum positiven Ergebnis. = K-Zeitung, 2006. febr. 3–9. p. 17.

Behne, T.: Kompetenz im Dreiklang. = Kunststoff Berater, 51. k. 6. sz. 2006. p. 22–24.