

## Új utak keresése a fröccsöntésben

A műanyag-feldolgozók új utakat keresnek, hogy a világméretű konkurenciaharcban talpon maradhassanak. Egyik próbálkozás a fröccsöntött termékek nyomás alatti megszilárdítása, amelynek révén az eddiginél méretállóbb optikai elemeket lehet gyártani. Egy másik ötlet a pulzáló hűtés, amellyel bizonyos körülmények között energiát lehet megtakarítani és növelni lehet a termelékenységet. Új piaci lehetőségeket remélnek attól is, hogy a műanyag-fröccsöntő üzemekben fémötvözetet fröccsöntenek.

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; fröccsöntés; új technológia; szerszámhűtés; pulzáló hűtés; fémfröccsöntés.*

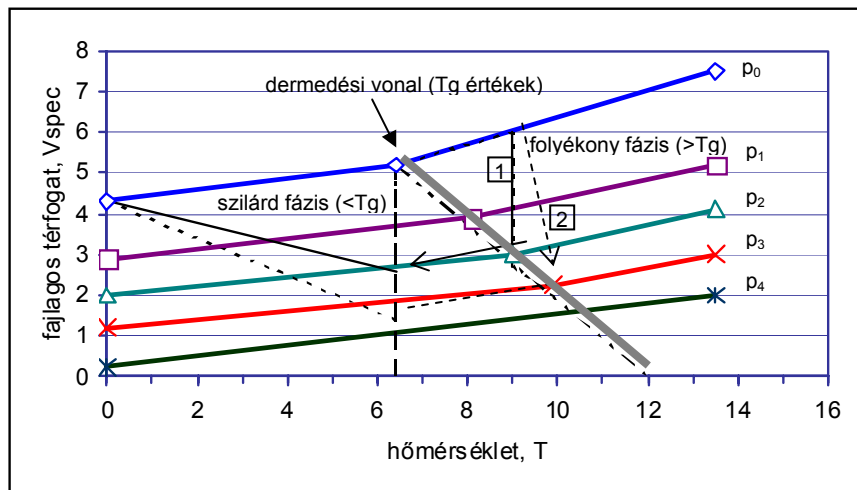
A világméretű verseny, a gazdaságosság növelésére és az energiatakarékosságra való törekvés, továbbá a minőségi követelmények folyamatos szigorodása miatt a műanyag-feldolgozók is új utakat keresnek, és néha meglepő ötleteket próbálnak megvalósítani. Közülük mutatunk be néhányat.

### Nagy nyomás alatt megszilárdított, mérettartóbb formadarabok

Bizonyos formadarabokkal szemben a megrendelők olyan minőségi követelményekkel lépnek fel, amelyek már-már túllépik a fröccsöntés műszaki lehetőségeit. Ilyen formadarabok pl. a mobiltelefonok, a digitális fényképezőgépek, az adathordozók optikai elemei, amelyek mérettartásán múlnak azok optikai tulajdonságai. Az ömledékállapotban végzett fröccsöntés (formaadás) után a megszilárdítást hagyományosan a szerszám gyors lehűtésével érik el, amelynek folyamán a polimer folyós állapotból először gumirugalmas, majd szilárd állapotba kerül. Ezek a fázisátmenetek helyileg és időben nem egyszerre következnek be, ami a darabban inhomogenitást, ebből következően anizotrópiát, utózsugorodást, belső feszültségeket, vetemedést, méretváltozást okozhat.

Az **Erlangeni-Müncheni Egyetem Műanyagtechnikai Tanszékén** támadt az az ötlet, hogy *különválasszák a darab megszilárdítását és lehűtését. Ha a formaadás után a fészekben az anyagot konstans hőmérsékleten nagy nyomás alatt tartják, a teljes anyagmennyiség egyszerre éri el az üvegesedési hőmérsékletet, belső szerkezete nagyon homogén, méretállandósága pedig a legmagasabb igényeknek is megfelelő lesz.* Az ömledéket ilyenkor a vele azonos hőmérsékletű, de mindenképpen a polimer olvadáspontja feletti hőmérsékletű szerszámüregbe fröccsentik, és nem alkalmaznak utánnyomást, ami helyi megszilárdulást okozna. Ezzel szemben nagy nyomást fejtenek ki a fészket kitöltő ömledékre, és azt addig tartják fenn, amíg teljes tömege az ún. derme-

dési vonal (az üvegesedési hőmérséklet vagy  $T_g$ -érték) alá hűl, azaz a nyomás csökkentésével nem folyósodik el ismét. A  $T_g$ -érték egyébként a nyomás növekedésével nő, különböző polimereké eltérő mértékben. Magasabb hőmérsékleten vagy nagyobb nyomás alatt hamarabb következik be a megszilárdulás. Ez jól látható az 1. ábra amorf hőre lágyuló polimerekről készített pvT diagramján. 1000 bar nyomás alatt az 1 bar nyomáson mért  $T_g$ -hez képest a PC üvegesedési hőmérséklete 28 °C, a PMMA-é 12 °C, a COC-é (ciklikus poliolefin) 30 °C, a PA 36 °C fokkal magasabb. Az ömledék a megfelelő ( $p_2$ ) nyomáson azonnal megdermed (1. vonal). A szaggatott 2. vonal azt mutatja, hogy a gyors kompresszió adiabatikus hőmérséklet-emelkedést válthat ki. Emiatt olyan nyomást kell választani ( $p_3$ ), amely mellett biztosan megkezdődik a dermedés, azaz a hőmérséklet a dermedési vonal alá esik. A tapasztalatok szerint a legtöbb műanyagnál elegendő az 1000–3000 bar közötti nyomás. A PC, a COC és a mikrokristályos PA  $T_g$  értékének erős nyomásfüggése miatt különösen, a PMMA ezzel szemben kevésbé alkalmas ehhez a technológiához.



1. ábra  
Amorf hőre lágyuló műanyag fajlagos térfogatának változása a nyomással végzett fröccsöntés alatt (pvT diagram)

Ha a műanyag a fészekben megszilárdult, és ilyen állapotában hűl le, az anyagon belül egyenletes feszültség alakul ki, ennek következtében kisebb a zsugorodása és kisebb lesz a kész darab térfogati hőtágulása, azaz növekszik a méretállandósága. Szilárd állapotban nyomás alatt a vezetőképesség is nagyobb: a PC hővezető képessége 1 bar nyomás alatt 20–135 °C között  $0,17\text{--}0,19 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ , 1000 bar nyomás alatt viszont 120 °C-on  $0,25 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  és 140 °C-ra lehűtve még mindig  $0,225 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ .

A nagy nyomással végzett fröccsöntéskor az ömledék hőmérsékletének feltétlenül az üvegesedési hőmérséklet felett kell lennie. A kísérletekben felhasznált *Makrolon PC* üvegesedési hőmérséklete dinamikus mechanikai analízis (DMA) szerint 153 °C, olvadáspontja 192 °C (a tárolási és a veszteségi modulus görbéjének metszéspontjához tartozó hőmérséklet), a szokásos fröccsöntéshez ajánlott ömledék-hőmérséklet 280 °C, ahol a polimer folyóképessége már kielégítő. A 192 °C-os olvadáspont (ahol a gumirugalmas fázis folyékony fázisba megy át) jóval magasabb, mint a  $T_g$  hőmérséklete. A tapasztalatok szerint viszont gumirugalmas állapotból a polimer ugyan-

úgy szilárd állapotúvá válik, mint folyékony állapotból; a nagy nyomáson pedig folyóképessége megnő, sőt a nyomásnövekedés nagyobb mértékben csökkenti a viszkozitást, mint a hőmérséklet emelkedése. 1000 bar nyomásnövelés kb. 50 °C hőmérséklet-csökkentést tesz lehetővé.

Az ömledék nagy nyomás alá helyezése térfogatcsökkenést, az pedig felmelegedést okoz. Mivel a nyomásnövekedés az ömledéken belül egyenletes, feltehetően a felmelegedés is az. A nyomás növekedésének sebessége befolyásolja a felmelegedés mértékét. Viszonylag lassú, 16 bar/s nyomásnövekedéskor (1000 bar nyomásnövekedést így kb. 60 s alatt lehet elérni) az állandó hőmérsékleten tartott szerszámfal elvezeti az összenyomódáskor keletkező hőmennyiséget. Ezt pvT vizsgálóberendezésben ellenőrizték, amelyben 16 bar/s nyomásnövekedéssel és 5 K/min hűtéssel vizsgálták a polikarbonátokat. A polimert 260 °C-ra felmelegítve megömlesztették, majd 200 bar nyomáson 190 °C-ra visszahűtötték és a termikus egyensúly beállásáig ezen tartották. Ezután 800, 1100, 1400, 1700, 2000, ill. 2300 barra emelték a nyomást. 70 perc után a nyomás fenntartása után a hőmérsékletet 190 °C-ról 50 °C-ra csökkentették, majd mérték a próbatestek térfogatváltozását. *Az összenyomódás sebessége az üvegesedési hőmérséklet felett kb. kétszer akkor volt, mint alatta.* A mérésekben alkalmazott 190 °C-os ömledék-hőmérséklet 1330 bar nyomás alatt került a  $T_g$ -érték alá. Amikor nyomás alatt 50 °C-ra hűtötték a próbatesteket, termikus térfogatcsökkenést figyeltek meg, de a nyomás megszűnése és a próbatestek kivétele után azok térfogata ismét nőtt, annál erősebben, minél magasabb nyomás alatt voltak előzőleg. Ez arra utal, hogy a nyomás alatt végzett megszilárdítás utáni nyomás összenyomódást, a nyomás megszűnése tárgulást idéz elő. Ha azonban az alkalmazott nyomás megszilárdulással járt, az ezzel járó térfogatcsökkenés és a szerszámból való kivételkor tapasztalt térfogat-növekedés kiegyenlítette egymást, és a termék méretei azonosak voltak a szerszám méreteivel. *A nyomás mértékével ezek szerint szabályozhatók a termék méretei.*

## **Fröccsöntés pulzáló hűtéssel**

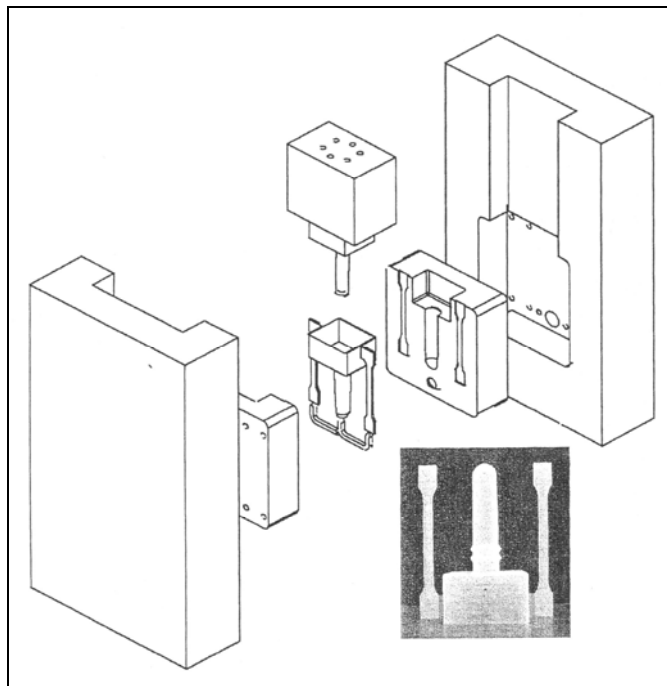
A fröccsöntő gépre szerelt szerszám hűtése alapvetően határozza meg a termék minőségét és erősen befolyásolja a ciklusidőt. A szerszámokat általában a hűtőcsatornáknak folyamatosan áramló hűtőközeg temperálja, a szabályozást a szerszámba épített egyetlen hőérzékelő irányítja.

A hűtőrendszerek fejlesztése során többféle megoldás született a hatékonyság növelésére. Így pl. a hőt nagyon jól vezető berillium- és rézbetéteket építettek be a szerszámokba; a szerszámfészkek formáját követő hűtőcsatornákkal próbálták egyenletessé tenni a hőelvezetést; a hűtővezetékekben turbulens áramlást igyekeztek kiváltani.

15 évvel ezelőtt alkalmazták először az ún. *pulzáló hűtést (PCT, pulse cooling technology)*. Ennek lényege, *hogy az ömledékből mindig csak annyi hőt vonjanak el, amennyi felesleges a kívánt hőmérséklet megtartásához. Ezt úgy érik el, hogy a szerszám hűtőcsatorna-rendszerének egyes részein csak akkor áramlik hűtőközeg, ha az szükséges az előírt hőmérséklet beállításához.*

A PCT eljárásban első lépésként (általában külső hőforrással) felfűtik a szerszámot a munkahőmérsékletre. Második lépésként megindítják a pulzáló hűtést. A szerszám belső felületén több érzékelő van, amely vezérli a közelében átáramló hűtőközeg szükséges mennyiségét. A gyártás során a belső szerszámfelületek hőmérsékletének minden egyes ciklus elején azonosnak kell lenniük.

Az eljárást ugyan a gyakorlatban már alkalmazzák, teljes mélységében még nem tanulmányozták. Az **RE Promotion Services Limited** cég munkatársai ezért kísérleti szerszámot készítettek, amelyben szakítópróbatesteket lehetett fröccsönteni hagyományos és pulzáló hűtéssel. Ebbe töltetlen és töltött PP-ket fröccsöntöttek, és vizsgálták a kétféle hűtéssel kapott próbatestek tulajdonságait.



2. ábra A szokásos és a pulzáló hűtéssel készített fröccsdarabok összehasonlításához készített szerszám vázlatos rajza

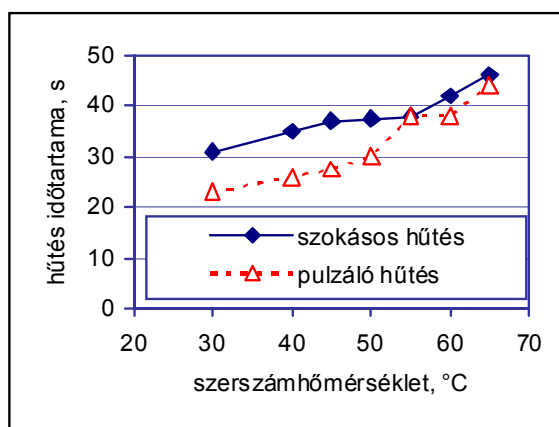
A szerszám vázlatos rajza a 2. ábrán látható. A fröccsöntött darab három elemből: két próbatestből és közöttük egy 2 mm vastag falú dobozból és hüvelyből álló formából tevődött össze. A beömlőnyílást a három elem alsó végén helyezték el. Az ömledécsatornákat úgy alakították ki, hogy a próbatest egyes elemeit formázó fészkeket bármilyen kombinációban külön-külön is ki lehetett tölteni. A szerszámba négy nyomás/hőmérséklet-érzékelőt építettek be, egyet-egyét a próbatestek alsó lapátjánál, egyet a hüvely fél magasságánál, egyet pedig a doboz falánál kétharmad magasságban. Három különálló és szabályozható hőmérsékletzónát alakítottak ki, egyet a fix, egyet a mozgó szerszámfelfogó lapban, a harmadikat a szerszám magjában. Mindhárom zóna

külön csatornarendszert tartalmazott a hűtő/fűtő víz átáramoltatására. Hagyományos hűtőmódban mindhárom zónában áramoltatták a vizet. Pulzáló hűtéses üzemmódban csak a szerszám első felfűtéséhez alkalmazták mind a hármat, a fröccsöntéskor csak a magot temperáló rendszer működött, és csak akkor kapcsolt be automatikusan, ha a szerszám hőmérséklete a kívánt érték fölé emelkedett.

A kísérletekhez a következő műanyagokat használták:

- polikarbonát, töltetlen (*Lexan 141R*, **GE Plastics**)
- polipropilén, töltetlen (*Moplen SM 6100*, **Basell**)
- polipropilén 10, 20, 30% talkummal töltve (alappolimer az előbbi típus)
- polipropilénalapú vezető kompaund (*Konduit MT-210-14*, **LNP Engineering Plastics**). A kompaund 44% hővezető töltőanyagot, zömében alumíniumport tartalmaz. Vizsgálták önmagában és 33, 23, ill. 11%-ban Moplen SM 6100 típusú PP-hez keverve is

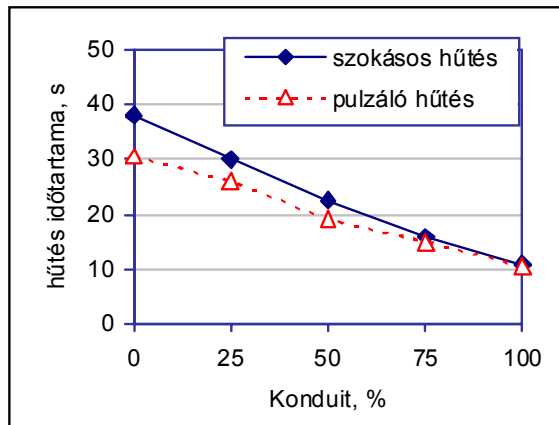
A gyártási paraméterek meghatározása után optimalizálták a fröccsnyomást, majd egyébként teljesen azonos fröccsöntési paraméterekkel, de a kétfajta szerszámhűtéssel, automatikus üzemmódban gyártottak próbatesteket. A szerszámhűtés időtartama a fészek megtöltésétől (utónyomásra kapcsolástól) a szerszámon belüli atmoszferikus nyomás eléréséig tartott. Pulzáló üzemmódban a hűtővíz hőmérséklete 11 °C volt. A PP feldolgozásakor hagyományos hűtéssel a teljes ciklusidő 55,6 s volt, a szerszámfelület hőmérséklete 54–72 °C között ingadozott. Pulzáló hűtéssel 43,1 s ciklusidőt értek el 50–70 °C hőmérséklet-ingadozással. A hűtési szakasz időtartamát a szerszámhőmérséklet függvényében a 3. ábra mutatja. *A pulzáló hűtés rövidebb időtartama elsősorban a hűtőközeg alacsonyabb hőmérsékletének köszönhető; a különbség magasabb szerszámhőmérsékleten csökken.* Hozzájárul ehhez a szerszámból a környezetbe hőszugárzással, hővezetéssel és konvekcióval jutó hőmennyiség is, amely 55 °C körül már olyan mértékű, hogy jelentéktelenné teszi a hűtőközegek hőmérsékletkülönbségéből adódó eltéréseket.



3. ábra A hűtési szakasz időtartama a teljes ciklusidőn belül szokásos és pulzáló hűtéssel készített PP próbatestek gyártásakor

A mechanikai vizsgálatok csekély különbséget mutattak a kétféle módon készített próbatestek között, bár a szokásos hűtéssel fröccsöntöttek húzószilárdsága és húzómodulusa is kicsit nagyobb volt a pulzáló hűtéssel készítettékénél.

Az alumíniumport tartalmazó *Konduit* hővezető koncentrátummal készített PP-keverékek fröccsöntésekor mért hűtési időket a 4. ábra mutatja. A hűtési időkből a tiszta PP-nél mérték a legnagyobb különbséget a kétféle hűtés során. A különbség a hozzákevert *Konduit* részarányának növekedésével csökkent, a tiszta *Konduit*-nál már szinte teljesen eltűnt. A tiszta *Konduit* hűtéséhez 5,5-ször rövidebb időre volt szükség, mint a tiszta PP-éhez. A kétféle hűtés azonban nem befolyásolta lényegesen a hűtés időtartamát. A hővezető polimerkeverék ugyanis a szokásos hűtés alatt is olyan gyorsan leadta a benne tárolt hőmennyiséget, hogy emiatt a pulzáló hűtés előnyei nem érvényesülhettek.



4. ábra A hűtési szakasz időtartama a teljes ciklusidőn belül szokásos és pulzáló hűtéssel készített PP és különböző arányban *Konduit* hővezető töltőanyagot tartalmazó próbatetek gyártásakor

A talkummal töltött PP-k hűtési ideje ugyancsak csökkent a talkummennyiség növekedésével. A 30% talkumot tartalmazó keverékből fröccsöntött próbatetek 40%-kal rövidebb idő alatt hűltek le. A kétféle hűtési mód között itt sem volt érzékelhető különbség.

80 °C feletti hőmérsékletű szerszámban a polikarbonát hűtésében sem jelentett előnyt a pulzáló hűtés.

A kísérletek során nem kaptak ugyan a szokásos hűtéstől alapvetően eltérő eredményeket, *pulzáló hűtéssel mégis 23%-os energiamegtakarítást mértek*, amit a kompresszor szakaszos üzemeltetése tovább növel. Számításba kell venni azt is, hogy a gyakorlatban nem használnak ilyen fészkenként külön szabályozott szerszámokat a folyamatos hűtőközeg alkalmazásakor, vagy ha igen, az nagyon bonyolulttá tenné a szerzámot. A pulzáló hűtés ezzel szemben egyetlen szabályozórendszerrel lát el egyszerre több fűtési zónát. Alkalmazása tehát hasznos lehet.

## Fémötvözetek fröccsöntése a műanyag-feldolgozó üzemben?

*A műanyag-feldolgozó üzemekben az utóbbi években egyre több olyan formadarabot gyártottak, amelyekkel korábban fémből készült elemeket helyettesítettek. Újabban ennek fordítottját is tapasztalják: alacsony olvadáspontú fémötvözetekből fröccsöntenek vékony falú, bonyolult formájú elemeket elsősorban az elektronika számára. Ezek az elemek egyszerre szilárdak, árnyékolják az elektromágneses hullámokat, jó*

hővezető képességük révén egyenletes hőeloszlást teremtenek, amivel megelőzik a helyi túlmelegedéseket. A fémötvözetek fröccsöntését olyan hibrid eljárásnak tartják, amely a műanyagok fröccsöntése és a fémek nyomás alatti öntése között helyezhető el. Ez a technológia nem igényel különleges infrastruktúrát, és lehetséges, hogy *új tevékenységi és piaci lehetőségeket nyit meg a műanyag-fröccsöntő üzemek számára.*

Az alapanyag általában *magnéziumötvözet* (ritkább esetben alumínium- vagy cinkötvözet), amelyet többnyire forgács formájában adagolnak a feldolgozógépbe. Az anyag-előkészítésre két eljárást alkalmaznak. Az egyikben nem ömlesztik meg teljesen a fémeket, a szerszámfészkekbe szilárd/folyékony határfelületeket tartalmazó anyag kerül. A másikban homogén ömledékképződésig melegítik fel az ötvözetet.

A „félíg szilárd” eljárást alkalmazzák gyakrabban, mert ebben alacsonyabb hőmérsékletre kell a fémeket felmelegíteni, azaz kevesebb energiát igényel; nem kell a nehezebben kezelhető fémolvadékkal dolgozni; hosszabb élettartamú a formázószerszám; nagyobb a termelékenység; kevésbé veszi igénybe az alapanyagot (kisebb a hőterhelés, az oxidáció, az elgőzölés). Az olvadási hőmérséklet alatti hőmérsékletcsökkentés megváltoztatja a szilárd és folyékony fázis arányát, és tartósan meghatározza a termék tulajdonságait és mikroszerkezetét.

Az alapanyagként felhasznált magnéziumötvözetnek oxidmentesnek kell lennie és egyenletes – 1–2 mm – méretű részecskékből kell állnia, félszilárd állapotban pedig tixotróp tulajdonságokat kell a mikroszkópos tartományban mutatnia. Jelenleg a részecskéket mechanikai forgácsolással állítják elő, de a jövőben közvetlenül ömledékből fogják őket gyártani.

A fröccsöntéshez ugyanazokat az ötvözeteket használják, mint a nyomás alatti öntéshez. Leggyakoribb az *AZ91D* jelű ötvözet, nagyobb hajlítószilárdsági követelmények esetén az *AM60B* jelűt alkalmazzák. Ha a formadarabnak magas hőmérsékletet kell majd elviselnie vagy jó kúszóáram-szilárdságúnak kell lennie, ritka föld- vagy földalkálifémek ötvözeteiből készítik el.

Fémötvözetek fröccsöntéséhez ajánlja a kanadai **Husky Injection Systems Ltd.** (Bolton) *HyMe-Systemt* márkanevű gyártósort. Ezekbe műanyagok fröccsöntéséhez általában használt standard fröccsgépet építenek be. Szükség van egy gép felett elhelyezett nagy sebességű robotra, amely kiveszi a kész darabot és formaleválasztót szór a nyitott szerszámba. További kiegészítő berendezések: az alapanyagot odaszállító; a kész darabot hűtéshez elszállító berendezés; páraszűrő; a formaleválasztót összekeverő egység. A korróziómentes henger hőmérsékletprofilját fűtőspirál szabályozza. A henger belsejében a fém oxidációját argongázzal akadályozzák meg. A csiga sebességét akár 6 m/s-ra is fel kell gyorsítani, hogy az ömledéket be tudja nyomni a szerszámba. A részlegesen megolvadt fém befröccsöntésének sebessége a beömlőnyílás méretétől függ.

*A fröccsöntő szerszám felépítése nagyon hasonlít a nyomás alatti fémöntés szerkezeteiéhez.* A szerszámnak magas hőmérsékletet és nagy hőmérséklet-különbségeket ugyanúgy el kell viselnie, mint a befröccsöntéskor fellépő nagy nyomást, és természetesen kopásállóknak kell lennie. A fröccsöntés lényegesen alacsonyabb hőmérséklete erősen megnöveli a szerszám élettartamát. El kell kerülni a fészken belüli sorja-

képződést, mert az megzavarhatja a szerszám működését. A fröccsöntött fémötvözet ugyanolyan pontosan leképezi a szerszámfészek formáját, mint a műanyag. Fémek fröccsöntéséhez speciális, a szokásosnál rövidebb fűtött ömledécsatornát („hot sprue”) építenek a szerszámba, amely állandó hőmérsékleten tartja az ömledéket a ciklusok között. Ez különösen fontos a kényes szilárd/folyékony fázis egyensúlya miatt.

A fémötvözetből fröccsöntött darabok kevesebb utómegmunkálást igényelnek, mint a nyomás alatt öntöttek. A hőre lágyuló műanyagból fröccsöntötteknél szilárdabban, kevésbé porózusak és kisebb mértékben zsugorodnak vagy vetemednek, meggátolják az elektromágneses sugárzás áthatolását. Legismertebb alkalmazási területeik: laptopok háza, mobiltelefonok kezelőfelülete, digitális fényképezőgépek. A technológia iránt az autógyártás is érdeklődik, és az első elemeket már a sorozatgyártásban alkalmazzák.

Összeállította: Pál Károlyné

Ehrenstein, G. W.; Rudolph, N.; Schmachtenberg, E.: Mit Hochdruck zu höheren Maßhaltigkeiten. = Kunststoffe, 98. k. 1. sz. 2008. p. 74–78.

McCalla, B. A.; Allan, P. S.; Hornsby, P. R.: Evaluation of heat management in injection mould tools. = Plastics, Rubber and Composites, 36. k. 1.k. 2007. p. 26–33.

Czerwinski, F.: Ein Feld für Spritzgießpioniere. = Kunststoffe, 98. k. 12. sz. 2008. p. 52–54.