

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.

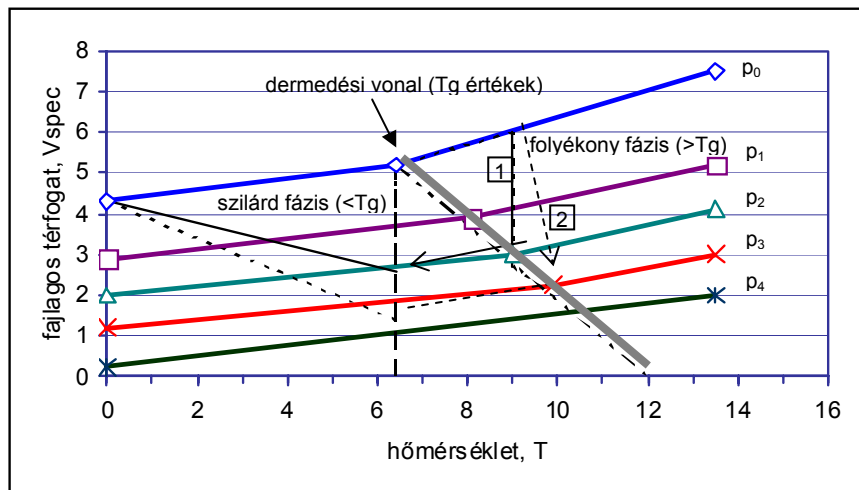
A világméretű verseny, a gazdaságosság növelésére és az energiatakarékosságra való törekvés, továbbá a minőségi követelmények folyamatos szigorodása miatt a műanyag-feldolgozók is új utakat keresnek, és néha meglepő ötleteket próbálnak megvalósítani. Közülük mutatunk be néhányat.

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 folyóképesége 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

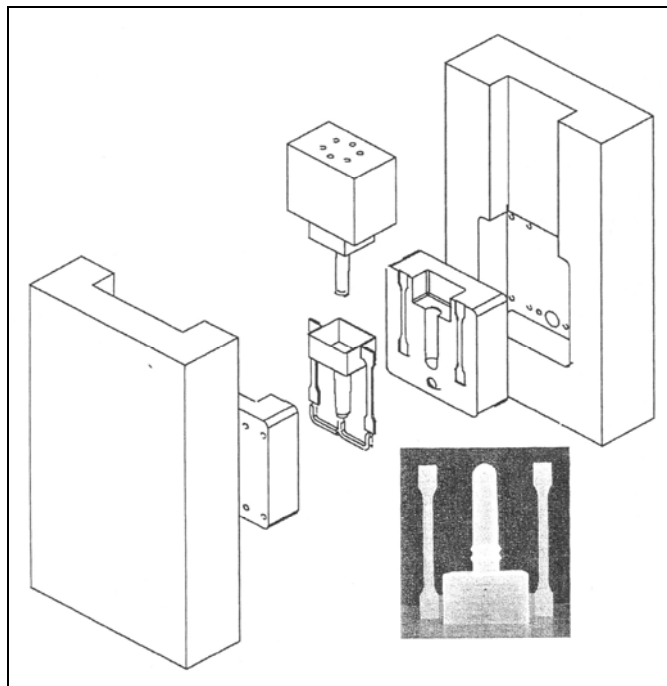
A fröccsöntő gépre szerelt szerszám hűtése alapvetően határozza meg a termék minőségét és erősen befolyásolja a ciklusidőt. A szerszámokat általában a hűtőcsatornáknak folyamatosan áramló hűtőközeg temperálja, a szabályozást a szerszámába épített egyetlen hőérzékelő irányítja.

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

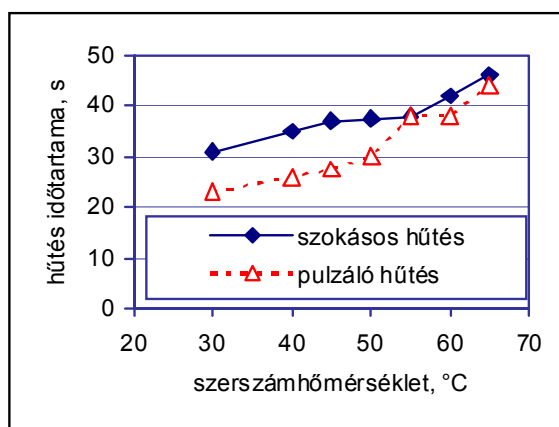
A szerszám vázlatos rajza a 2. ábrán látható. A fröccsöntött darab három elemből: két próbatestből és közöttük egy 2 mm vastag falú dobozból és hüvelyből álló formából tevődött össze. A beömlőnyílást a három elem alsó végén helyezték el. Az ömledécsatornákat úgy alakították ki, hogy a próbatest egyes 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

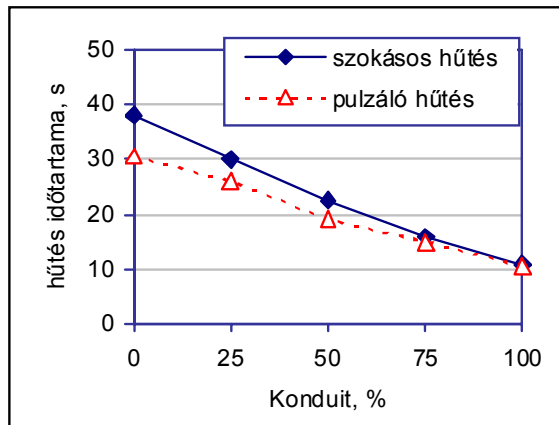
A gyártási paraméterek meghatározása után optimalizálták a fröccsnyomást, majd egyébként teljesen azonos fröccsöntési paraméterekkel, de a kétfajta szerszámhűtéssel, automatikus üzemmódban gyártottak próbatesteket. A szerszámhűtés időtartama a fészek megtöltésétől (utónyomásra kapcsolástól) a szerszámon 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 fröccsöntötték húzószilárdsága és húzómodulusa is kicsit nagyobb volt a pulzáló hűtéssel készítettékénél.

Az alumíniumport tartalmazó *Konduit* hővezető koncentráttal készített PP-keverékek fröccsöntésekor mért hűtési időket a 4. ábra mutatja. A hűtési időben 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 fűtés 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 hőmérséklet-csökkentés 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.