

Fröccsöntés fluidinjektálással kombinálva

Bár a gázzal vagy vízzel – összefoglalóan fluidinjektálással – segített fröccsöntés a mai műanyag-feldolgozás része, széles körű terjedését és további fejlesztését az teszi lehetővé, hogy az erre a technológiára kapott szabadalmi jogok érvényességi ideje lejárt. A technológia eredeti kifejlesztője, az IKV ma is törődik ezzel az eljárással, de újabb cégek is látnak benne fantáziát.

Tárgyszavak: fröccsöntés; fluidinjektálás; folyamat-ellenőrzés; ultrahangos online mérés; új eljárási változatok.

Az aacheni Műanyag-feldolgozó Intézet (IKV, Institut für Kunststoffverarbeitung) 1982-ben mutatta be ipari méretekben a fröccsöntés egy speciális módszerét, a gázzal segített fröccsöntést (GIT, Gasinjektionstechnik), amelyet már kb. 15 éve számos feldolgozóüzemben alkalmaznak belül üreges formadarabok, elsősorban különböző közegek vezetésére szolgáló csőszakaszok, üreges fogantyúk, belső bordákkal erősített lemezek gyártására. Később az IKV-ben kifejlesztették a vízzel segített fröccsöntést (WIT, Wasserinjektionstechnik), amelyben az üreget víz injektálásával alakítják ki. Azóta az eljárásnak különböző gázokat és víz mellett alkoholt alkalmazó változatai születtek, ezeket gyűjtőnéven fluidinjektálási technikának (FIT, Fluidinjektionstechnik) nevezik.

Az eljárás lényege, hogy a polimer fészekbe fröccsentése után némi késleltetéssel speciális fűvókával gázt vagy folyadékot injektálnak a formálódó formadarab belsejébe. A „fluid” (vagy közeg) behatol a még nem teljesen kitöltött vagy röviddel az injektálás előtt megnövelt térfogatú fészekben a darab magjába, ott üreget alkotva a felületi rétegeket a szerszámfalhoz nyomja, a feleslegessé vált ömledéket pedig kiszorítja a fészekből, legtöbbször egy ilyenkor megnyíló melléküregbe (amelyet addig mozgó mag zár el a formadó fészektől). A FIT eljárást elsősorban műszaki célú formadarabok gyártására alkalmazzák.

Költségcsökkentő hatása miatt a fluidinjektálás egyre népszerűbb. A formadarabokhoz szükséges anyagmennyiség egy részét a falvastagság csökkentésével vagy geometrikus merevítéssel meg lehet takarítani. Ha ezt nagyobb nyomással vagy magasabb anyaghőmérséklettel érik el, a megnövekedett energiaköltség elviszi az anyagmegtakarítás hasznát. A fluidinjektálásnak viszont a következő előnyei vannak:

- az üreges formadarabhoz kevesebb anyagot kell megömlasztani és kevesebb ömledéket kell lehűteni,

- a szerszámzáráshoz szükséges kisebb erő miatt a gyártást kisebb teljesítményű gépen lehet végezni, ezáltal energiát lehet megtakarítani,
- a kisebb utánnomás következtében csökken a selejt, kevesebb az utólagos megmunkálás, jobb a felület minősége és a darab méretállandósága, mérséklődik a vetemedés veszélye, nem kell félni a beszívódástól.

Az eljárás széles körű elterjedését az elmúlt időszakban a szabadalmi védettség gátolta. Az eljárások egy részének szabadalmi oltalma azonban lejárt, ezért egyre többen vállalkoznak az eljárás alkalmazására és annak továbbfejlesztésére. A fejlesztés éllovasa továbbra is az IKV, de az alkalmazási területek szélesítésében és az eljárás új változatainak bevezetésében jelentős részt vállal a **Stieler Kunststoff Service GmbH** is.

A WIT eljárás gyenge pontjainak vizsgálata

A GIT eljárás meglehetősen kiforrott, kipróbált technika, vannak azonban korlátai. A gáz pl. rosszul vezeti a hőt, fel tudja habosítani a hőre lágyuló ömledéket, nem alkalmas nagyméretű üreges darab gyártására. WIT eljárással a darabok mérete jelentősen növelhető.

A műanyag-feldolgozó üzemekben már vannak WIT eljárással sorozatgyártást végző gépsorok. Ezek felállítása és beindítása azonban nagy munkaráfordítással és sok költséggel jár. A vállalkozónak az okozza a legtöbb nehézséget, hogy megfelelő tapasztalatok hiányában nem lehet előre megmondani, hogy a tervezett alkalmazáshoz melyik műanyaggal lehet majd megvalósítani a vizes injektálást, és mekkora maradó falvastagsága lesz az üreges testnek. Hiányosak az ismeretek abban is, hogy egy adott szerszámokban az anyag mely tulajdonságai befolyásolják majd a WIT sikerét.

Az IKV ezért WIT szerszámokban vizsgálta az áramlási jelenségeket és elemezte az anyagtulajdonságok ezekre gyakorolt hatását. A vizsgálatok céljára a kutatók modulrendszerű szerszámot építettek, amelynek alaplökhelyjébe különböző fészekbetéteket lehet illeszteni. Az egyik betétben médiaszállító csövet, a másikban bordákkal erősített üreges testet fröccsöntöttek. A betétekkel különböző injektorkapcsolatok alakíthatók ki. A kísérleti szerszám legfőbb jellegzetessége a mozgó oldalon egy átlátszó ablak, amelyre nagy sebességű képrögzítő rendszert erősítettek, ez a fröccsöntés teljes folyamata alatt nagyon rövid időközökkel közvetíti az áramlási jelenségeket. Hogy a kamera elférjen, a kidobókat a fúvóka oldalára helyezték. A fészkek mellett azzal kapcsolatban álló, de hidraulikusan elzárható melléküreget képeztek ki.

Hogy a jelenségeket jól meg lehessen figyelni, dermedés után is átlátszó, ún. mikrokristályos hőre lágyuló műanyagot kellett választani a kísérletekhez. Amorf átlátszó polimer erre a célra nem volt alkalmas, mert ilyet a gyakorlatban WIT eljárás-hoz nem használnak. A kísérletekhez poliamidot, az **Evonik Industries AG** (Essen, Németország) *Trogamid T5000* típusú átlátszó poliamidját és a **Borealis AG** (Bécs, Ausztria) *HC600TF* polipropilénjét választották; az utóbbi ömledékállapotban átlátszó, megdermedés után áttetsző.

A kettős csatorna képződésének megfigyelése

A WIT eljárással fröccsöntött médiavezeték egyik gyakori hibája a kettős csatorna képződése, amikor a darabon belül az egyetlen homogén üreg helyett két vagy több, egymástól polimerfallal elválasztott üreg alakul ki. A másodlagos üregek legtöbbször átszakadnak, ami erősen befolyásolja a médiavezető csatorna keresztmetszetét. Általános az a feltételezés, hogy a kettős csatornát a fluidbuborék osztódása okozza az üreg kialakítása alatt.

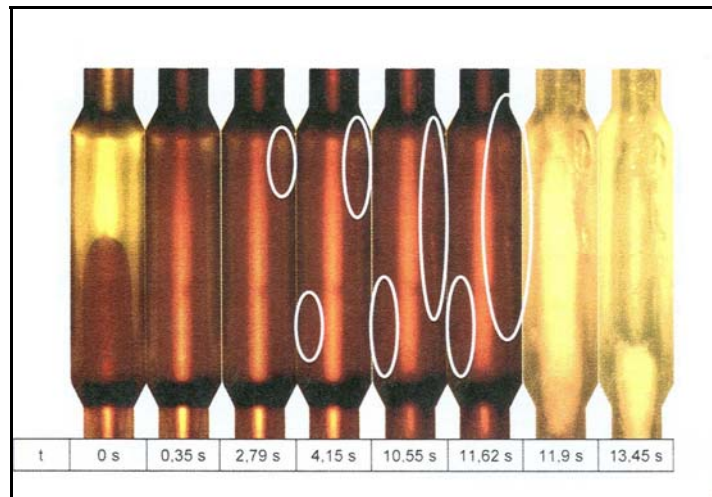
A poliamiddal végzett kísérletek ezt a feltételezést megcáfolták. $t = 0$ s-nál érte el a vízbuborék a képfelvétel alsó pontját, $t = 0,3$ s-nál a fluidfront már annyira előreszaladt, hogy elhagyta a képfelvétel tartományát. Először $t = 3,67$ s-nál jelent meg egy kis buborék a cső jobb oldalán. Ez a cső hátsó, nem látható részén hatolt be a formadarab maradék falába, majd előre vándorolt. $t = 11,9$ s-nál a buborék kiterjedt, amivel a lehűlő műanyag zsugorodását kompenzálta. A valódi üreg eddig homogén és megfelelő formájú volt. $t = 12$ s-nál levették a víznyomást és kieresztették a vizet a szerszámból. Az ellennyomás megszűnésének következményeként a buborék erőteljesen felfúvódott a falon belül, és a másodperc tört része alatt kialakította a második csatornát. Ehhez valószínűleg hozzájárult az is, hogy a víz elgőzölgött.

Vízzárványok képződése a maradék falban

Az előkísérletek alatt megfigyelték, hogy – elsősorban a polipropilén feldolgozásakor – a hibaképződés csökkenthető, ha az üreget képző vízhez felületaktív anyagot, tenzidet adagolnak. A kísérletekben a **Clariant International Ltd.** (Muttensz. Svájc) *Hostastat HSIFF* márkanevű antisztatikumát alkalmazták. Ez jelentősen megnövelte a víz nedvesítőképességét a PP felületén. Ha PP-re adalék nélküli vizet cseppentettek, a csepp kontaktszöge $74,0^\circ$ volt, ha a víz 1% antisztatikumot tartalmazott, a csepp lelapult, kontaktszöge $35,5^\circ$ -ra csökkent.

Az üreges testek falában képződő vízzárványokról is azt tartják, hogy azok a fluidfronttal párhuzamosan alakulnak ki. Ezt is sikerült megcáfolni. Az *1. ábrán* $t = 0$ s az a pillanat, amikor a buborék a képmezőbe kerül. 0,35 s után a belső üreg képződése befejeződött, a maradék falban eközben vízzárvány nem keletkezett. 2,79 s-nál a darab jobb felső részén volt felismerhető az első kis buborék, 4,15 s-nál a második, a bal oldal alsó részén. Az idő előrehaladásával (és a polimer zsugorodásával) ezek nőttek, 11,9 s-nál, amikor megszüntették a víz nyomását, összezsugorodtak. A jelenség reprodukálható volt. A fröccsöntött darab falába behatoló vízcseppek tulajdonképpen nem zárványok, mert kapcsolatban vannak az üregben lévő vízzel, de ez a kapcsolat szabad szemmel nem látható.

Ha a polimerbe injektált vízhez tenzidet adtak, a jelenség ugyanolyan körülmények között teljesen visszaszorult. Feltételezik, hogy a víz jobb nedvesítőképessége következtében az rövid idő alatt sokkal több hőt tud elvonni az ömledékből, ezért a víz és a polimer közötti határfelületen gyorsabban képződik áthatolhatatlan dermedt réteg.



1. ábra Vízárvány képződése a WIT eljárásban

Az üregképződés szabályozása

Az üregképződés alapvetően a műanyagtól, ill. annak reológiai tulajdonságaitól függ. Ezért a maradék falvastagság és a hibaképződés megfelelő folyamatvezérléssel bizonyos határok között kézben tartható. A víz ömledék befröccsentése utáni késleltetésének időtartama közvetlenül befolyásolja a darab maradék falvastagságát. Minél később injektálják be a vizet, annál vastagabb lesz az üreges test fala. A beinjektált víz térfogatáramával szabályozható az üregből kiszorított polimer sebességprofilja és a fluidbuborék körvonala, ezáltal az üregképződés folyamata. A megfelelő nagyságú vízárammal elkerülhető a víz elgőzölgése a forró polimerfelületen, ezáltal – anyagtól függően – mérséklődik a hibaképződés. A folyamatparaméterek azonban csak egy érvényes feldolgozási ablakon belül változtathatók, mert különben a kiiktatott probléma helyett más problémák lépnek fel.

Bebizonyosodott, hogy a beinjektált víz felületi feszültségének csökkentésével javul a polimer nedvesíthetősége és növekszik a határfelületen a hőelvonás, a megdermedő határfelületen a víz nem tud áthatolni. A hőelvezetés másik módja lehet az üreg kialakítása utáni öblítés hideg vízzel egy második injektoron keresztül. A hideg vizet megfelelő nyomással kell az üregbe nyomni, nehogy az elgőzölő öblítővíz hozzon létre hibákat.

Online minőség-ellenőrzés a FIT-eljárásban

A FIT eljárás kényes volta miatt különösen fontos, hogy a darabok minőségét már a gyártás folyamán, online ellenőrizzék, hogy ha valamilyen hibát észlelnek, azonnal be lehessen avatkozni. Az első ilyen eljárást az IKV dolgozta ki. Abból indultak ki, hogy a formálódó darabon belül határfelületek képződnek, amelyek ultrahanggal „letapogathatók”.

Itt is közös alaplukkba illeszthető szerszámbetétekkel (csőgyártó, ill. bordás formadarabot gyártó betéttel) dolgoztak; a csőgyártó betét gázzal vagy vízzel segített fröccsöntéshez is alkalmas volt, a bordás formadarabot gyártó változatot csak GIT-eljárással használták. Az ultrahangos érzékelőt a szerszám több pontján lehetett beépíteni, ezért a fröccsöntés folyamata alatt a minőséget meghatározó különféle jellemzőket (maradék falvastagság, hibaképződés, a közeg kiterjedési sebessége) tudtak ellenőrizni.

Ultrahangos méréseket kétféle ún. impulzuseljárással lehet végezni. Az *impulzus-echo eljárásban* egyetlen ultrahang-átalakítóra van szükség, amely adóként kibocsátja az ultrahanghullámokat (jelet), és vevőként felfogja a határfelületről visszavert hullámokat (visszhangot). Az *impulzus-transzmissziós eljárásban* két átalakítót használnak, amelyet egymással szemben helyeznek el, az egyik az adó, a másik a rendszeren keresztülhaladó hullámokat felfogó vevő.

A kísérleteket a **Wittmann Battenfeld GmbH** (Kottingbrunn, Ausztria) *HM 1600/100 Unilog B4* típusú fröccsgépén végezték, amelyhez a *Power Module 15/210-2* típusú WIT-berendezést a **PME fluidtec GmbH** (Kappel-Grafenhausen, Németország) szállította. Az *Airmould GIT* berendezés a Wittmann Battenfeld gyártmánya volt. A mérőrendszert az IKV fejlesztette ki. A feldolgozáshoz a **Sabic Deutschland GmbH & Co. KG**. (Düsseldorf, Németország) *505P* típusú polipropilénjét alkalmazták.

Az UH-jel és a szerszám belső nyomásának változása a GIT eljárás alatt

Az első kísérletekben bordás lemezt fröccsöntöttek GIT-eljárással, az ultrahangos méréseket *impulzus-echo*-eljárással végezték. A feldolgozás paramétereit az *1. táblázat* tartalmazza.

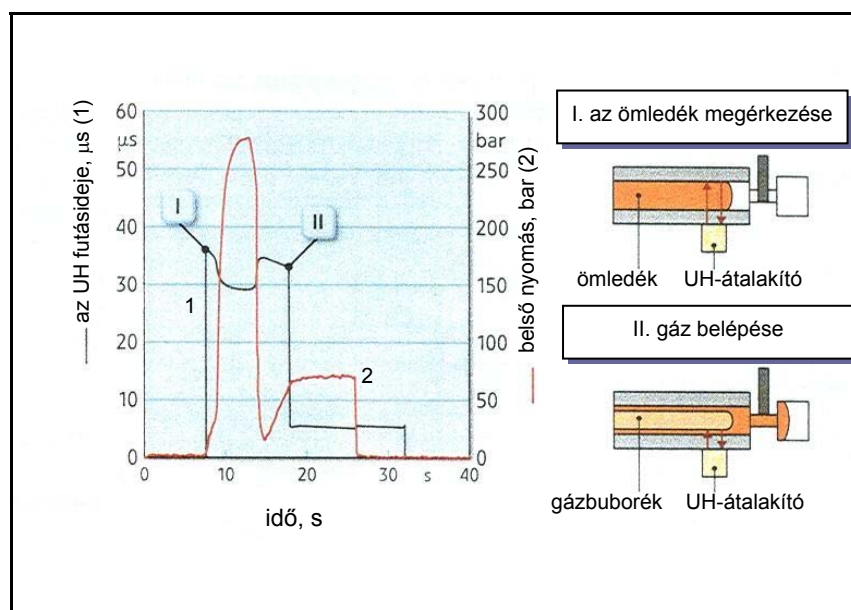
1. táblázat

A GIT eljárásban impulzus-echo mérési módszer mellett alkalmazott gyártási paraméterek

Gyártási paraméterek	Értékek
Ömledék-hőmérséklet	210 °C
A gáz késleltetési ideje (a befroccséntéstől számítva)	9 s
Utánnnyomás	550 bar
Utánnnyomás időtartama	5 s
Gáznnyomás	80 bar
Utánnnyomás időtartama	5 s

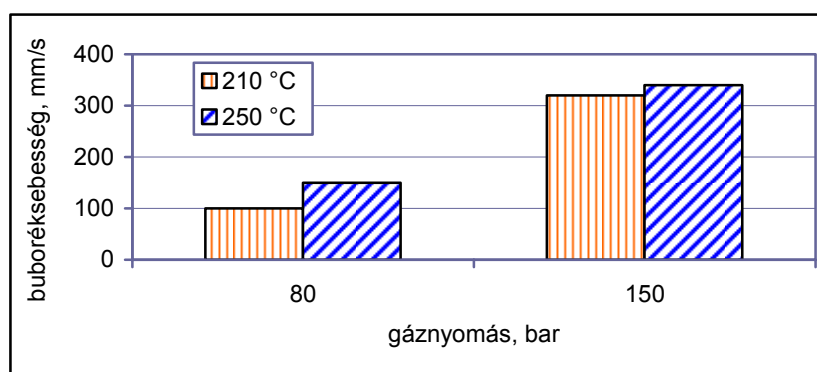
A mérési adatokat jelző görbe felrajzolása a szerszámzárás kezdetekor indul (*2. ábra*). $t = 8$ s-nál jut el az ömledékfront az UH-átalakítóval egy síkba (I. pozíció). Az UH-hullámok áthatolnak az ömledéken majd egy részük visszaverődik a fészek túlsó falán és meghatározott idő után visszajut az UH-átalakítóba. A szerszám kitöltődése-

kor meredeken növekszik a belső nyomás, és mivel ennek következtében nő az ömledék sűrűsége, ami növeli a hang sebességét, rövidebb idő alatt ér vissza az UH-jel a mérőberendezésbe. A fészek teljes kitöltése ($t = 9$ s) után, az utánnomás alatt ez a jelenség erősödik. Az utánnomás fázisának végén ($t = 13$ s) a nyomás megszűnésének hatására a visszhang visszaérkezése valamivel hosszabb ideig tart. $t = 14$ s-nál nyitják meg a melléküreget és indítják meg a gáz injektálását. A még ömledékállapotú műanyag kiterjedése miatt a belső nyomás lezuhan, a hangsebesség csökken, megnövekszik a visszhang visszaérkezéséhez szükséges idő. $t = 18$ s-nál éri el a gázbuborék a hangjel mozgásának síkját. Ennek következtében a szerszámban új határfelület képződik, az UH-hullámok innen verődnek vissza (II. pozíció). A visszhang visszaérkezéséhez szükséges idő drasztikusan csökken. A gáznyomást $t = 25$ s-nál szünetetik meg. A hőre lágyuló műanyag zsugorodása miatt a megdermedő polimer $t = 32$ s-nál elválik a faltól, emiatt az UH-jel már nem tud áthatolni a szerszámon.



2. ábra Az impulzus-echo eljárással felvett ultrahangjel (UH) és a szerszám belső nyomásának változása a bordázott lemez GIT eljárásal végzett fröccsöntése alatt

A felrajzolt görbe jól jellemzi a gázinjektálással segített fröccsöntés folyamatát annak „ujjlenyomataként” is tekinthető, és mint ilyen alkalmazható a folyamat online ellenőrzéséhez. Hasonló ujjlenyomatot a belső nyomás változása is adhat, de az UH-berendezéssel végzett ellenőrzés ennél jóval többet szolgáltat: mérheti a maradék falvastagságot, jelezheti a falban keletkező hibákat (üregeket, zárványokat), ha pedig a folyási út mentén két ultrahangos berendezést építenek be, a gázbuborék haladási sebességét is meg tudják határozni. Amint várható, a gáznyomás vagy az ömledék hőmérsékletének növelése növeli a gázbuborék előrehaladási sebességét (3. ábra), ami befolyásolja a kész darab maradék falvastagságát.



3. ábra A gázbuborék sebessége 210, ill. 250 °C-os ömledék-hőmérséklet és 80, ill. 150 bar gáznyomás mellett. A gázinjektálás késleltetése 15 s

A maradék falvastagság online mérése

Az üreges testek gázinjektálással kombinált fröccsöntésekor és különösen közegek vezetésére szánt csövek gyártásakor azok megfelelő falvastagságát szavatolni kell. Az IKV második kísérletsorozatában ilyen csöveket fröccsöntöttek.

Az *impulzus-echo* eljárás alkalmazásakor a maradék falvastagságot (s) elméletileg a következő egyenlettel lehet kiszámítani:

$$s = 0,5 \cdot c \cdot \Delta t$$

ahol c a hangsebesség a műanyagban, Δt az az időtartam, amely alatt a hanghullám kétszer áthalad a maradék falon. Mivel a hangsebesség függ az ömledék hőmérsékletétől, gondot jelent, hogy a formázás alatt a maradék falban jelentős hőmérsékletgradiens alakul ki, amelyet a szokásos hőmérő eszközökkel nem lehet követni, így a hangsebességet sem lehet pontosan meghatározni. Ezért az ultrahangos mérések mellett (amelyeket a reprodukálhatóság érdekében közvetlenül a gáz- vagy víznyomás levétele előtt végeztek) a kész csövek falvastagságát laboratóriumban mágneses indukzív vastagságmérővel is lemérték, és meghatározták a két adatsor közötti korrelációt, amely lineárisnak bizonyult, azaz a hanghullámok áthatolási ideje arányos volt a falvastagsággal. A korrelációs egyenlet függ a mérési ponttól és a folyamat jellemzőitől. Mivel a feldolgozók általában ugyanazt a mérési pontot, és az adott feldolgozási jellemzőket használják, ultrahangos berendezéssel a folyamat alatt minden egyes darabon online tudják ellenőrizni a maradék falvastagságot, és ezáltal ki tudják elégíteni a legmagasabb minőségi elvárásokat is.

A feldolgozóberendezések és az eljárások fejlesztése

Mivel a fluidinjektálással kapcsolatos legtöbb szabadalmi oltalom ideje lejárt, új résztvevők is bekapcsolódtak az eljárás(ok) fejlesztésébe. A készülékgyártók is na-

gyobb érdeklődéssel fordulnak e felé a technika felé, és ma már az is lehetséges, hogy egy gyártó ne az egész fröccsgépre, hanem csak a fluidinjektálásra koncentráljon.

Ilyen a **Stieler Kunststoff Service GmbH** (Goslar, Németország). Ennek köszönhető, hogy a cégnek a piacon lévő gyártmányainak többségével legalább három különböző fluidinjektálási eljárást lehet megvalósítani, ami ezeket a berendezéseket jól kihasználhatóvá teszi, de természetesen feltételezi a megfelelő hozzáértést is.

A cég által ajánlott „*Short shot*” technológia szerint a szerszámfészket csak részlegesen töltik meg ömledékkel, mielőtt elindítják a fluid injektálását. A behatoló közeg nyomja a szerszám falához az ömledéket. Az eljáráshoz kis (20, max. 100 bar) nyomás szükséges, nincs utánnomás. A *fluid lehet gáz, víz, alkohol*, a gyártott darabtól és a hozzá alkalmazott műanyagtól függően.

A „*Full-shot*” vagy *zsugorodást kompenzáló eljárásban* a gáznyomást a teljes folyamat alatt fenntartják, beleértve a hűtést is, hogy kiküszöböljék a vetemedést és a beszívódásokat. Ezt az eljárást csekély átalakítással utólag is meg lehet valósítani egy meglévő szerszámban. Fluidként itt csak nitrogén használható.

A népszerű *melléküreges eljárást* a cég főképpen nagy felületű, helyenként anyagtorlódást igénylő darabok fröccsöntéséhez ajánlja. Ilyeneknél nem könnyű megoldani a műanyag és a fluid kombinált befröccsentését és figyelembe venni az erős nyomásváltozásokat; a forma- és szerszámtervezéskor emiatt gyakran követnek el hibát. Itt különösen fontos, hogy hol és mennyire töltik meg a szerszámot és mikor nyitják meg a melléküreget. A kialakult üreg(ek)et az üreget kialakító gáz helyett hideg (–25 °C-os) gázzal is ki lehet öblíteni, hogy a hőt a formadarab belsejéből kivonják. Ezáltal csökken a ciklusidő és a vetemedés veszélye.

Mozgatható magokkal palackrekeszeket lehet gyártani. A gázt a mag visszahúzásakor, a magot mozgató tolattyún keresztül vezetik be a fészekbe. Fluidumként csak gázt, pl. sűrített levegőt használnak. A gáznyomás 20–50 bar.

A Stieler cégnél kifejlesztett új különleges módszer a „*GaNaSys*” eljárás, amelyben a GIT eljárást fűtött csatornás fröccsöntéssel kombinálták. Ez lehetővé teszi, hogy az üregbe ne csak befűjjék és kiszívják a gázt, hanem ezután az üreget le is zárják. Ilyen eljárással gyártották a 4. ábrán látható dugókat.

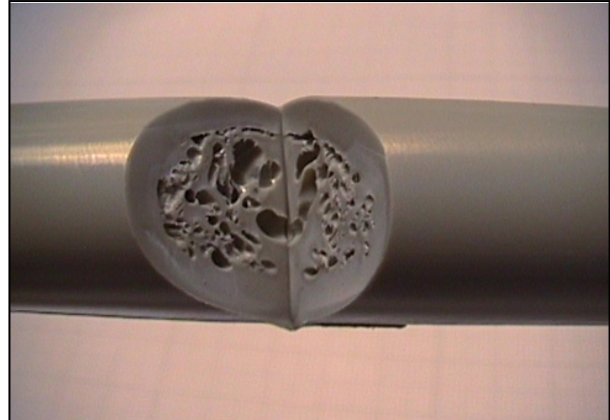
A gázzal segített fröccsöntés érdekes változata a *külső gáznyomást alkalmazó eljárás (Gasaußendruckverfahren)*, amikor a gázt nem az ömledék belsejében alkalmazzák, hanem közvetlenül a formálódó darab egyik sík, lapszerű oldalára fűjják csatorna nélkül, amivel a zsugorodást ellensúlyozzák. Ezáltal a kidobóoldalon gázpárnát hoznak létre, hogy az ellentétes oldalt a szerszám falához nyomja. A gáz nyomását a hűtés teljes időtartama alatt fenntartják. A szerszámot a kidobóoldalon ajkos tömítéssel teszik gázzáróvá. Az ezzel az eljárással gyártott termékek nemcsak feszültségmentesek és méretállóak, hanem kivételesen szép a felületük is. A bordák vagy más erősítőelemek látható oldalán véletlenül sincsenek beszívódások. Sajnos, ez a technológia nem alkalmazható bármilyen műanyaghoz. Üvegszállal erősített, gyorsan kristályosodó, hosszú ideig utózsugorodó anyagokkal nem érdemes kísérletezni.

A Stieler „*SmartFoam*” eljárásával vastag falú termékeket lehet készíteni fizikailag habosított maggal hagyományos fröccsöntő gépen (5. ábra). Első lépésként itt a

vastag külső héjat alakítják ki a szerszám részleges kitöltésével, az ilyenkor befröcscentett műanyag nem tartalmaz „hajtóanyagot”. A hajtóanyagként funkcionáló fluid (nitrogéngáz, víz, folyékony szén-dioxid) a keverőzónában elegyedik a polimerrel, elegyüket késleltetve speciális fúvóka lövi be a részlegesen megszilárdult üreg belsejébe, ahol a keverék zárt cellás habot képez. Kiterjedése egyúttal utánnyomást is kifejt. Átala megrövidül a ciklusidő, kisebb a szükséges szerszámzáró erő és csökken az energiafelhasználás.



4. ábra GaNaSys eljárással gyártott dugók



5. ábra SmartFoam eljárással fröccsöntött belül habszerkezetű rúd

Ha az eljárásokban fluidként nitrogéngázt alkalmaznak, a nitrogént fel lehet használni a kész darab kidobásához, és védőgázként is szerszámzárás után, ha az oxigén jelenléte barnulás vagy gyulladás veszélyével jár.

A további fejlesztésekben foglalkoznak az eljárások kombinálásával. A vizet mint fluidot már alkalmazzák, most azt vizsgálják, hogy lehetne-e a szerszám ún. forró pontjain a temperáláshoz folyékony szén-dioxidot vagy gőzt használni, ezáltal a hőcserét erősen felgyorsítani, és a ciklusidőt akár 70%-kal megrövidíteni. Ez különösen azokon a pontokon volna hatásos, ahol az anyag feltorlódik.

Összeállította: Pál Károlyné

Michaeli, W.; Grönlund, O.; Gründler, M.: WIT: Den Hohlraum im Blick = K-Berater, 55. k. 9. sz. 2010. p. 21–24.

Hopmann, Ch.; Becker, S.: Die Hohlraumausbildung im Lichte des Ultraschalls = Kunststoffe, 102. k. 3. sz. 2012. p. 38–41.

Stieler, U.: Mehr als nur Hohlräume = Kunststoffe, 101. k. 11. k. 2011. p. 48–50.