

Néhány jó tanács az extrudálóknak

A Frankland Plastics Consulting, LLC. elnöke mindent tud, amit az extrudálásról tudni kell. Egy szakfolyóiratban megjelent cikksorozatában olyan részletekre hívja fel az extrudálók figyelmét, amelyek eddig elkerülték ezek figyelmét, vagy nem tulajdonítottak fontosságot nekik. Néhány jó tanácsa az alábbiakban olvasható.

Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; extrudálás; betáplálás; torokkiképzés; temperálás; ömledékszilárdság; hűtés.

A feldolgozandó anyag betáplálása az extruderbe

A feldolgozók néha nem értik, hogy miért kisebb az extruderük kihozatala, mint amire számítottak. Legtöbbször a csigafelépítésben vélik a hibát, pedig azt gyakran előbb kell keresni, a műanyagot betápláló rendszerben. A gépből ugyanis csak annyi anyag tud kijönni, amennyit bevittek.

Az extruder lényegében egy szivattyú, amelynek optimális működéséhez meg kell teremteni a megfelelő anyagáram folyamatos betáplálását az etetőrendszeren keresztül, majd folyamatos áthaladását a gépen, végül ugyancsak folyamatos kilépését a gépből.

A betápláló rendszer geometriája

Egy extruder tervezésekor a betápláló rendszerre viszonylag kevés figyelmet fordítanak. Kezdetben ez nem is volt több, mint egy kerek nyílás a csiga elején, és még azt is úgy helyezték el, hogy a műanyag granulátum a csiga kiinduló állapotában a csigacsúcsra hullott, ezért az anyag addig nem tudott az extruderben előre haladni, amíg a csiga annyira el nem fordult, hogy odaért az anyagot oldalirányban elmozdító majd előrehajtó része. Az elforduló csigaszárny minden csigafordulat alatt eltakarta a kerek nyílás egyharmadát, azaz csökkentette a betáplált anyag mennyiségét. Sokat javult a helyzet, amikor áttértek a négyzet vagy téglalap alakú etetőnyílás alkalmazására. A tölcsér alatt ezekben már mindig egy teljesen nyitott csigacsatorna-szakasz fogadja be a felülről áramló műanyagot.

A polimer csak akkor indul meg a hengerben előre, amikor a csigaszárny sugárirányban elmozdítja, majd bekerül a csigaszárny és a henger fala közé. Az etetőnyílásnál az előremozdulás még nagyon csekély mértékű. Más szivattyúkhöz hasonlóan kis túlnyomás kell ahhoz, hogy a granulátum bekerüljön a csiga és a henger közötti részbe.

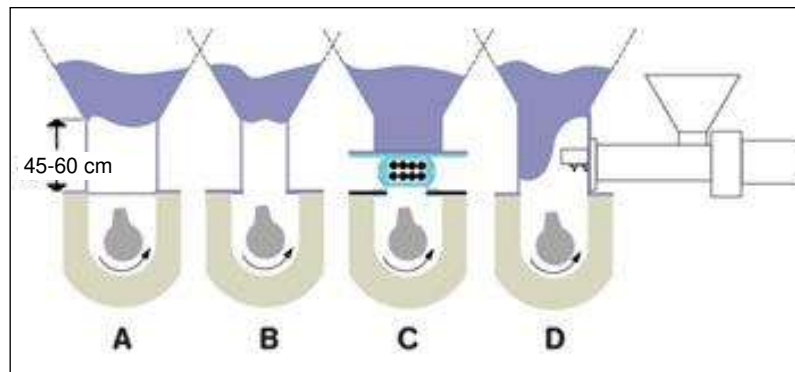
Megfigyelhető, hogy ha a tölcsérben a granulátum egy adott szint alá csökken, jelentősen visszaesik az extruder kihozatala annak ellenére, hogy az anyag folyamato-

san áramlik a gépbe. Ennek az az oka, hogy a tölcsérben lévő granulátum tömege már nem fejt ki azt a plusznyomást, amely bekényszeríthetné az anyagot a csiga és a henger közötti részbe, ehelyett a polimer „úszik” a csigán.

Minél gyorsabban forog a csiga, annál jobban megemelkedik az áramló műanyag az etetőtorok nyílásában. Ha nincsen akkora nyomás, amely megnövelhetné a gravitációt, a granulátumszemek nem tudnak olyan gyorsan behullani a nyitott csigacsatornába, hogy ki tudják tölteni annak terét. Ezért gyakran észlelik azt, hogy egy adott csigafordulat felett visszaesik, vagy a fordulatszám növelésével nem növelhető a kihozatal.

Minél nagyobb az előrehaladó műanyagra ható nyomás, annál könnyebben és gyorsabban lehet az anyagot betáplálni. Ez különösen igaz olyankor, ha a granulátumhoz visszadolgozandó örleményt is kevernek. A gravitáció kiegészítésére az etetőtorokban elegendő egy 45-60 cm-es granulátumréteg a csiga felett.

Nem közömbös az sem, hogy milyen alakú a tölcsér és az etetőtorok. Néhány gyakorlatban előforduló megoldás az 1. ábrán látható.



1. ábra Különböző megoldások a betápláló rendszer kialakítására. Optimális az A változat. Részleteket lásd a szövegben

Optimális az A megoldás. Itt a tölcsér alsó derékszögű nyílásának mérete és alakja azonos az etetőtorokéval, amely a henger ugyanekkora méretű nyílásába irányítja a granulátumot. Az etetőtorok hossza 45–60 mm között van, hossza a henger belső átmérőjének 1,5-szöröse.

A B megoldásban a torok szűkebb, mint a hengeren lévő nyílás, ami lassítja az anyag beáramlását az extruderbe és kisebb nyomást fejt ki az áramló anyagra.

A C változatban a tölcsér és a henger nyílása közé beiktattak egy kiegészítő eszközt (az ábra szerint egy kisebb méretű mágneses kiválasztót), ami gátolja az anyag szabad beáramlását a gépbe. A granulátum útjának bármilyen szűkítése csökkenti a kihozatalt.

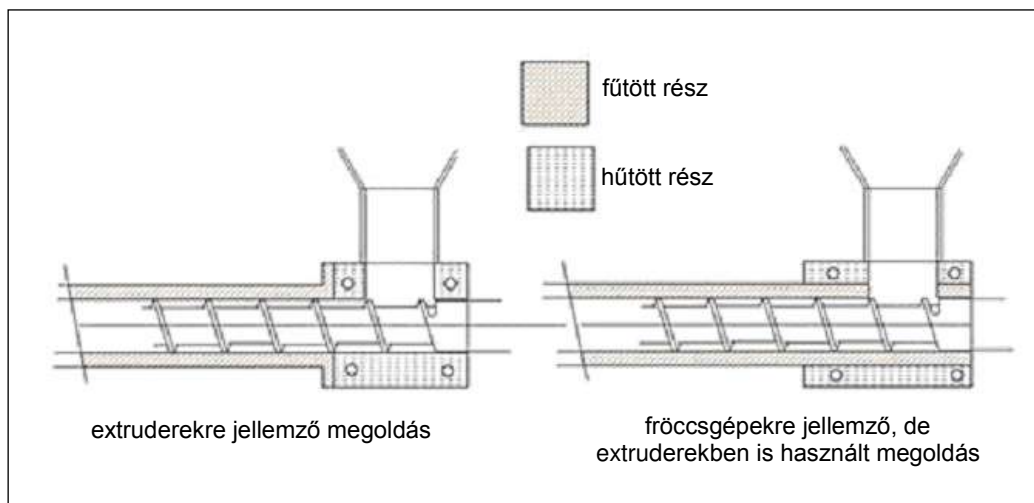
A D megoldásban egy oldaletető hatol be az etetőtorokba, ezáltal csökkenti az anyagra ható nyomást, ill. a kihozatalt. Ha ilyen etetőrendszert terveznek, a benyúló résznek legalább 60 cm-rel a csiga felett kell végződnie, hogy a megfelelő anyagnyomás kialakulhasson.

Az etetőtorok hőmérséklete

Megfigyelték még, hogy az azonos felépítésű csigát tartalmazó és azonos nyomással dolgozó fröccsgépek hengerének fajlagos kihazatala nagyobb, mint az extrudereké. Ennek az az oka, hogy a fröccsgépeken nincs külön etetőtorok, a henger viszont (a nagyobb szilárdság érdekében) túlnyúlik az etetőnyíláson, emiatt a henger belső fala sokkal melegebb azon a helyen, ahol a műanyag-granulátum bejut a gépbe. A meleg felület miatt nagyobb a súrlódás a fémfelület és a granulátum között, ami jótékony hatással van a kihazatalra, és annak stabilitását is javítja.

Az extruderbe jutó granulátumszemcsék először megtapadnak a henger belső felületén, majd az etetőnyílás felől növekedő nyomás hatására csúszni kezdenek a felületen. Emiatt az szállítás sebessége ciklikussá válhat és a kihazatal folyamatosan változik. Melegebb torokkal nemcsak a kihazatal nő, hanem az extrudálás stabilitása is, különösen kisebb súrlódási együtthatójú és nagyobb hőállóságú polimerek feldolgozása-kor.

Az extruderek etetőrendszereit mégis inkább hűtik. A tervezők ugyanis attól tartanak, hogy a granulátum már a torokban megolvad, ami sok kellemetlenséget okozhat. Munka közben ilyesmi ritkán fordul elő, inkább akkor eshet meg, ha a gép leáll. Megelőzhető azonban a torok alsó részének szabályozott hűtésével. Némely extruderen már alkalmazzák ezt az elvet (2. ábra), amivel – polimerfajától függően – 10–20%-kal növelhetik a termelékenységet.



2. ábra A legtöbb extruderben a granulátum a hűtött etetőtorokból a fűtött zónán túlnyúló csigára hullik

Az etetőtorokot legtöbbször áramló vízzel hűtik. A gépkezelők az etetőnyílást többnyire csak egy olyan lyuknak nézik, amelyen behullik az anyag a gépbe. pedig az valójában a henger kezdete. Meg vannak győződve arról, hogy ha a feldolgozásnak jót tesz a kevés víz, a több víz még jobb lesz. Ugyanezt gondolják a csiga belső hűtéséről

is. Jól kinyitják a vízcsapot, és ezzel felborítják a rendszer hőegyensúlyát és csökken-
tik a termelékenységét. Valójában minden extrudernek megvan a maga optimális
egyensúlyi torokhőmérséklete, amely függ a csigasebességtől, az 1. zóna kialakításá-
tól, a feldolgozott polimer tulajdonságaitól, az extruderen áthajtott anyag tömegétől
stb. Ezt az optimális hőmérsékletet csak kísérleti úton, a hűtőközeg áramlásának vál-
toztatásával lehet meghatározni.

Ma már van olyan extrudáló üzem, amelyben mérik a torok hűtővizének hőmér-
sékletét és környezeti hőmérsékletet is. Van, ahol beállítják az áramlást vagy a víz-
hőmérsékletet, esetleg mindkettőt. Ezzel jelentős javulást lehet elérni, de nem ellensú-
lyozható a torok hőmérsékletében bekövetkező esetleges változás. Egy beépített
hőelem a torokban, amely folyamatosan jelzi az aktuális hőmérsékletet, lehetővé teszi
azt is, hogy az extrudálást mindenkor a korábban meghatározott optimális hőmérsékle-
ten végezzék.

1. zóna: a behúzó szakasz jelentősége

Az extrudercsigák tervezői gyakran kevesebb figyelmet szentelnek a csiga első,
ún. behúzó szakaszára, mint a későbbi szakaszokra. Sima belső falú hengerekben ez a
betáplálástól a kompresszió kezdetéig tart. (Hornyolt behúzó szakaszt tartalmazó
extruderekben más szempontokat kell érvényesíteni.) A csigacsatorna mélységét ha-
gyományosan a kompresszió (összenyomhatóság) mértéke alapján határozzák meg.
Ebben a csigacsúcsnak is van szerepe, de mivel az ideális csigacsúcs megtervezése
nehéz feladat, legtöbbször standard csigacsúccsal számolnak. A szakasz hosszát a csi-
ga teljes hosszának százalékában vagy fix menetszámmal definiálják.

Az optimális csatornamélység nagymértékben a szilárd polimer tulajdonságaitól:
a sűrűségtől, a sűrűlódási tulajdonságoktól és a szilárd granulátum folyásától függ. Fi-
gyelembe kell venni azonban az ömledékvizkozitást is – minél kisebb az ömledék
vizkozitása, annál nagyobb csatorna kell a megömlés maximális sebességének eléré-
séhez. Szerepe van természetesen az összenyomhatóságnak is, de nem szabad csupán
erre támaszkodni.

A szilárd műanyag-granulátum tulajdonságait célszerű néhány egyszerű saját mé-
réssel megvizsgálni. Egy meghatározott térfogatú granulátum szűk nyíláson kiengedve
kúpba rendeződik, a kúp palástjának hajlásszöge jellemzi a szemcsék folyását, azt,
hogy milyen könnyen mozdulnak el egymáson, azaz milyen az egymás közötti sűrű-
dési együtthatójuk. A granulátum sűrűségéből és a csatornamélységből kiszámítható,
hogy mennyi granulátummal lehet feltölteni a csigacsatornát. Ilyenkor tudatában kell
lenni annak, hogy a műanyag-granulátum általában 25–40% levegőt tartalmaz. Ennek
a levegőnek a kiszorítása önmagában 1,25–2:1 arányú összenyomódást eredményez.

Ha ezeket az adatokat összevetik a betáplálás kísérletekben meghatározott haté-
konyságával, ki lehet számítani a betáplálásnak azt a sebességét, amellyel megközelít-
hető a kívánt kihozatal. Ha feldolgozáskor örleményt is visznek a gépbe, az elemzés-
kor ezt is számításba kell venni. Végül azt is meg kell vizsgálni, hogy mennyire képes

a szemcsés anyag összetömörödni. Ehhez elegendő egy bizonyos mennyiséget fóliazacskóba tölteni és azzal együtt összenyomni.

Egy konkrét polimer ilyen vizsgálatához és az eredmények értékeléséhez megfelelő tapasztalat szükséges, de két polimert könnyű ilyen módon összehasonlítani. *A könnyen összetömöríthető granulátumokat jobb hatásfokkal lehet betáplálni, mint azokat, amelyek elcsúsznak egymáson.* Az etetőtorok és a granulátum közötti súrlódást is lehet kísérletekben mérni a torok hőmérsékletének függvényében, de léteznek erre laboratóriumi mérőeszközök is. Az összenyomhatóság a keménységtől és a polimer-részecskék jellemzőitől is függ.

Az optimális csigacsúcsot csak kísérletekkel és vizsgálatokkal lehet megtervezni a sok befolyásoló tényező miatt. Általánosságban igaz, hogy a nagy belső súrlódású (granulátumuk kiszórásakor meredekebb szögű kúpot képező) polimerek kicsit hosszabb, a kis belső súrlódású (laposabb kúpot képező) polimerek kicsit rövidebb csigacsúccsal etethetők jobb hatásfokkal. A különbség azonban 3°-on belül van, ezért a standard csigacsúccsal is jól lehet dolgozni.

A behúzó szakasz ideális hossza elsősorban a granulátum súrlódásától és összenyomhatóságától függ, de jelentős szerepe van ebben a polimer termikus tulajdonságainak is. A csiga szállítófunkciója mellett a csigaszárnyak tömörítő és levegőt kiszorító tevékenysége nyomán a granulátum szilárd dugószerű képződményt alkot, mielőtt megindulna gyors olvadása. Ebben a jelenségben is számít az anyag keménysége, amely szerepet játszik az 1. zónában fellépő nyomás kialakulásában.

Az olvadásnak meg kell kezdődnie a kompresszió megindulása előtt, mert ha az anyag nem képes előre haladni a szűkülő térben, túlnyomás lép fel és csökken a betáplálás, esetleg dugulás alakul ki, felborul a kihozatal stabilitása, jobban kopik a csiga. Ez elkerülhető, ha az etetőszakasz hosszának becslésekor a polimer hődiffuzivitását szorozzák a feldolgozás hőmérsékletével (ha nincs előmelegítés). Az így kiszámított hosszúságú hengerben biztosan megindul a megömlés a kompresszió előtt.

Az ilyen számítások szerint pl. a poliamid 66 feldolgozásakor 50%-kal hosszabbnak kell lennie a behúzó szakasznak, mint PE-LD extrudálásakor. *Az 1. zóna hosszának meghatározása legalább olyan fontos, mint az optimális csigamélység.*

Mekkora a feldolgozott polimer ömledékszilárdsága?

A műanyagok extrudálásával foglalkozó szakirodalomban az elmúlt években néha felbukkant az ömledékszilárdság mint fontos tulajdonság, de ha a feldolgozó többet szeretne erről tudni, alig-alig talál adatokat. Az extrúziós műanyagok adatlapjaiban megtalálja a sűrűséget, a szilárd anyag fizikai, néha termikus tulajdonságait is, de ömledékszilárdságról szó sem esik.

Az ömledékszilárdságnak fontos szerepe van az extruderből kiáramló formázott ömledék (profil, fólia, cső stb.) viselkedésében (megereszkedés, belógás, deformálódás) a szerszámnyílás és a hűtőrendszer között. Gyenge ömledékszilárdságú műanyagot nehéz hossz- vagy keresztirányban nyújtani és a belőle fűjt fólia tömlőstabilitása is bizonytalan.

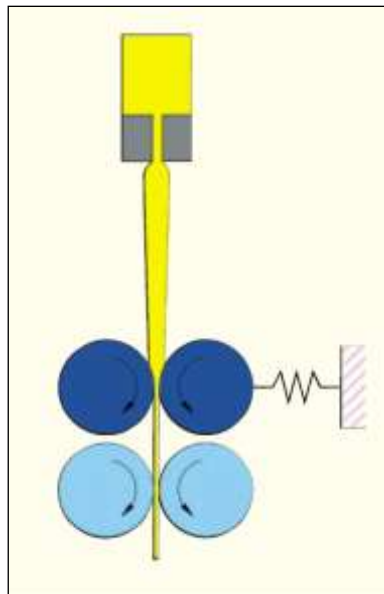
Az ömledékszilárdság lényegében az ömledék ellenállása a nyújtással szemben. Nagysága attól függ, hogy milyen mértékben vannak a polimermolekulák összegabalyodva. A sok és hosszú elágazást tartalmazó vagy a sok nagyon hosszú lineáris láncmolekulát tartalmazó polimerek ömledékszilárdsága emiatt nagyobb, az elágazást egyáltalán nem, vagy csak kevés rövid oldalláncot tartalmazó polimerek ömledékszilárdsága kisebb. *Az ömledékszilárdság az a fajlagos erő, amellyel a molekulaláncok egyenes és párhuzamos láncokká húzhatók szét.* Nagysága függ a molekulatömegtől, a molekulatömeg-eloszlástól és a molekulák elágazottságától.

Mivel a feldolgozó számára ez az adat fontos, de nem hozzáférhető, kénytelen maga megmérni, ill. a feldolgozási paraméterek (ömledék-hőmérséklet, kihozatal, szerszámfelépítés, a kilépés és teljes lehülés közötti időtartam) módosításával ellensúlyozni az esetleg gyenge ömledékszilárdságot.

A térhálós műanyagok feldolgozáskor úgy viselkednek, mint az erősen elágazó hőre lágyuló műanyagok. Vannak olyan adalékok is, amelyek a lineáris molekulaláncok között feldolgozás közben keresztkötéseket létesítenek, és ezáltal növelik a polimer ömledékszilárdságát.

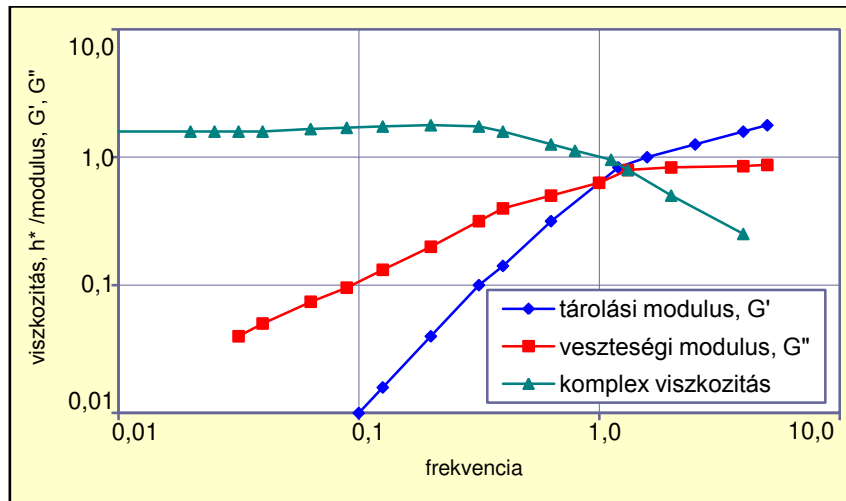
Az ömledékszilárdság szabatos mérését többféle elven próbálják megoldani. Vannak, akik az ömledék folyóképességéből, pl. a folyási (melt) indexből próbálnak kiindulni, egyelőre kevés sikerrel.

Mások az ömledék ún. nyúlási (extensional vagy elongation) viszkozitását tekintik irányadónak. A Göttfert cég (Buchen, Németország) egy *Rheotens* nevű mérőberendezést forgalmaz, amelyben egy függőlegesen extrudált szálat két henger egyre nagyobb sebességgel forogva nyújt meg. A nyújtáshoz szükséges erőt folyamatosan mérik (3. ábra). Ebből számítják ki a nyúlási viszkozitást és következtetnek az ömledékszilárdság nagyságára. A számításokat a berendezéshez szükséges szoftver végzi el.



3. ábra A Göttfert cég Rheotens mérőeszközének mérési elve

Oscillációs reométert sok műanyaggyártó használ belső minőségvizsgálatra. Ezen mérik a polimer tárolási (G' , storage) és veszteségi (G'' , loss) modulusát (4. ábra). A frekvencia függvényében felvett két modulus görbéjének metszéspontja jellemző az ömledékszilárdságra: minél alacsonyabban van ez a metszéspont mind a vízszintes, mind a függőleges tengelyhez viszonyítva, annál nagyobb az ömledékvizkozitás.



4. ábra Oscillációs reométerben mért komplex viszkozitás (η^*), tárolási modulus (G') és veszteségi modulus (G'') a frekvencia függvényében. Minél alacsonyabban metszi egymást G' és G'' görbéje, annál nagyobb a polimer ömledékszilárdsága

A feldolgozandó polimereket gyakran változtató extrudáló üzemeknek nagyon hasznos, ha a feldolgozási paraméterek beállítása előtt valamennyire tájékozódnak a polimer ömledékszilárdsága felől. Ha eltérő ömledékszilárdságú anyagokat kell egymás után feldolgozniuk, feltétlenül paramétereket is kell változtatniuk, hogy ellensúlyozzák a gépből kilépő termék eltérő tulajdonságait.

Hogyan érdemes hűteni az extrudátumot?

Az extruderből kiáramló, formázott ömledéket le kell hűteni, hogy – lehetőleg minél gyorsabban – megszilárduljon. Itt is felbukkanhat az a téveszme, hogy ha kevés vízzel jól megy a hűtés, sok vízzel még jobban megy majd. Ez nem mindig válik be, főképpen a kristályos polimerből gyártott vastag falú, egyik oldalukon hűtött termékek (csövek, lemezek, üreges testek fűvásához készített profilok) extrudálásakor.

A kristályos polimerek ömledékük hűtése közben erősen zsugorodnak. A legtöbb polimer ömledéke ugyanis gyakorlatilag tökéletesen amorf szerkezetű, hűlés közben azonban részlegesen kristályosodik, azaz az addig teljesen rendezetlen molekulák rendeződni kezdenek, ezáltal közelebb kerülnek egymáshoz és egyes – kristályos és amorf – fázist képeznek. Szilárd állapotban ez a természetes és egyensúlyi szerkezetük. A nagyobb rendezettség következtében a molekulák tömörebben helyezkednek el

az anyagban, amelynek sűrűsége is növekszik, az extrudátum ömledékállapothoz viszonyított térfogata pedig csökken. A PE-HD sűrűsége pl. ömledékállapotban $0,78 \text{ g/cm}^3$, részlegesen kristályos szilárd állapotban $0,94 \text{ g/cm}^3$, ami hűtés közben kb. 20%-os zsugorodással jár. Részlegesen kristályos polimer a PE-LD, a PE-LLD, a PP, a PA66, a PET, a PLA és a PTFE is.

A polimerek az olvadáspontjuk és üvegesedési hőmérsékletük (T_g -értékük) közötti hőmérséklet-tartományban nagy sebességgel kristályosodnak. Ha hőmérsékletük a T_g -érték alá csökken, a kristályosodás sebessége hirtelen kisebbé válik, mert a molekulák elvesztik szabad mozgásukat, és nem képesek a számukra optimális, relaxált állapotba rendeződni. A termék kristályosodása a legtöbb feldolgozási folyamatban a hűtés végéig legfeljebb 60-80%-ban megy végbe, kb. egy hét múlva éri el a 90%-ot, számos esetben pedig csak több hónap után alakul ki a végső, stabil szerkezet. Ennek tudatában kell lenni. Gyors hűtéssel ugyanis időlegesen „be lehet fagyasztani” az amorf szerkezetet. Egy vastagabb falú termék hűtött oldala lehül, a műanyagok rossz hővezető képessége miatt az ellenkező oldal még elég meleg marad ahhoz, hogy ott tovább menjen a kristályosodás és a zsugorodás. Az eredmény egy feszültséget tartalmazó, esetleg vetemedett termék lesz. A belső feszültségek csövekben törést, feszültségrepedést okozhatnak. Fújtt üreges testekben feszültség alakul ki a vékonyabb és vastagabb falú részek között, ami növeli a feszültségrepedezés iránti érzékenységet és csökkenti az ejtési szilárdságot, de beszívódást, deformálódást is okozhat.

A kristályosodás és a zsugorodás kézbe tartásához a hűtési sebességet a darab teljes egészében szabályozni kell. Ez elérhető úgy, hogy a hűtés sebességét mindenütt csökkentik, de úgy is, hogy a külső felület hűtését korábban leállítják, és hagyják, hogy a meleg oldal felől a hő a hűtött felület felé áramoljon. Az extrudált termékek elérendő külső méreteit gyakran csak a kezdeti gyors hűtéssel tudják beállítani, de ha a gyors hűtést továbbra is fenntartják, fennáll a veszély, hogy a termékben belső feszültségek alakulnak ki.

Honnan tudhatja a feldolgozó, hogy túlhűti az extrudátumot? Egy gyors és egyszerű méréssel ellenőrizheti ezt. Vágjon le egy darabot a termékből és néhány percre tegye be azt egy $95\text{--}120 \text{ }^\circ\text{C}$ -os szárítószekrénybe. Kivétel után hűtse le, majd mérje meg a hűtött és a nem hűtött oldal méreteit és számítsa ki a méretváltozásokat (zsugorodást) a hőkezelés előtti méretekhez viszonyítva. A hőkezelés optimális hőfoka és időtartama a polimerfajtától és a termék falvastagságától függ. Görbült termékek méreteit mérőszalaggal lehet meghatározni, bonyolult alakzatok méretváltozásait pedig egy tökéletesen temperált mesterdarabbal összehasonlítva lehet ellenőrizni.

A hűlés okozta zsugorodást nem szabad összekeverni a lehúzásból vagy az extrudálást követő nyújtással kapcsolatos zsugorodással. A vastag falú extrudált termékek zsugorodása a gyártás irányában mindig nagyobb, mint keresztirányban, ami a molekulák gyártás közben fellépő rendeződéséből, majd részleges visszarendeződéséből adódik. A hűtés okozta zsugorodás csakis a külső és belső felület hőkezelés utáni méretváltozásából számítható ki, a darab teljes zsugorodása erre alkalmatlan.

Az egyenetlen hűtés a darabban sokféle hibát okozhat. Ha az amorf fázis tovább duzzad és nekinyomódik a már megállapodott kristályos fázisnak, óriási belső feszül-

ségek lépnek fel, a darab megrepedhet. Ha nagyon erős a hűtés egyenetlensége, a fázisok között rétegelválásnak tűnő hibák szemmel is láthatóvá válnak.

Ha a feldolgozó azt észleli, hogy a termék kis terhelés alatt is könnyen törik, elsőként érdemes a túl erős hűtésre gondolnia, különösen, ha az csak a darab egyik felére hat. Ilyenkor végezze el az ajánlott hőkezelési próbát, és ha a méretkülönbség a külső és belső felület között nagy, csökkentse a hűtés sebességét.

Összeállította: Pál Károlyné

Frankland, J.: Having output problems? Check your feed-port design = Plastics Technology, 2010. február, www.ptonline.com

Frankland, J.: Extrusion: what's the right feed throat temperature? = Plastics Technology, 2014. június, www.ptonline.com

Frankland, J.: Don't overlook the feed section = Plastics Technology, 2013. december, www.ptonline.com

Frankland, J.: What about melt strength? = Plastics Technology, 2013. június, www.ptonline.com

Rheotens 91.97. Göttfert: The new tensile tester for polymer melts = <http://www.asi-team.com/asi%20team/gottfert/Gottfert%20data/Rheotens.pdf>

Frankland, J.: Cooling tips for crystalline polymers = Plastics Technology, 2013.március, www.ptonline.com