

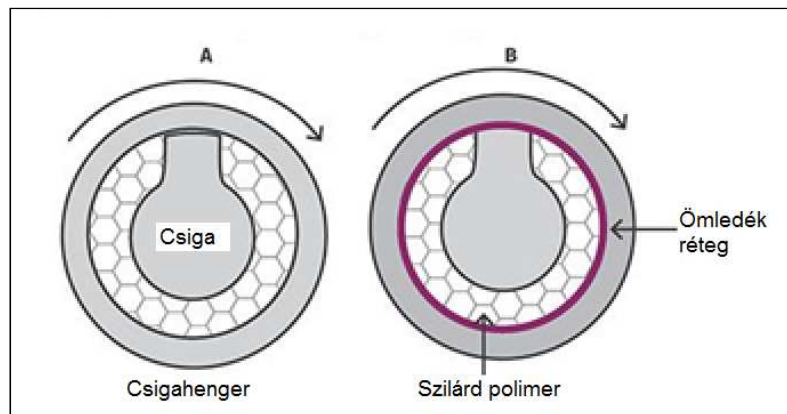
Amit nem, vagy rosszul tudnak az extrudálásról

Az extrúzió során a műanyag felhevítése jórészt a súrlódás által, mechanikai energia bevitelével történik. A csiga geometriájának helyes kialakítása nagy hatással van a folyamat hatékonyságára, különös fontossága van a barrier és a keverő csigaszakaszok helyes méretezésének. A hulladék visszadolgozása gazdasági kényszer, de az óhatatlanul fellépő degradáció miatt csak megfelelő üzemvitellel lehet állandó minőségű terméket és stabil feldolgozási paramétereket biztosítani.

*Tárgyszavak: műanyag-feldolgozás; extrúzió; csigatervezés;
Maddock keverőelem; barriercsiga; hulladékfeldolgozás.*

A csigahenger hőmérséklete és a nyírási energia szerepe a műanyag megömlésztésében

Akármilyen meglepő, de tény, hogy a műanyagfeldolgozók általában nem tudják, hogy hogyan is olvad meg a polimer egy egycsigás extruderben. Ugyanakkor fontos lenne ennek ismerete, hogy maximalizálhassák az extrúziós folyamat hatékonyságát. A koncepció egyszerűsítése és az alapmechanizmus illusztrációja érdekében tekintsék a rendszert úgy, hogy a csigához forog az álló csiga körül (1. ábra).



1. ábra A szilárd polimerreszecskek egyszerűsített megömlésztési folyamata egycsigás extruderben

A polimer a csigával szilárd részecskék (granulátum, por, pehely) formájában találkozik össze. Ezután a csiga menetei a részecskéket összetömörítik (ld. az „A” részt az 1. ábrán). Ettől fogva a polimerrészecskék és a csigahenger fala közötti súrlódás megnöveli a polimer hőmérsékletét a fal közvetlen közelében. További hő áramlik a csigahenger forró falából a polimerbe, elősegítve egy vékony megolvadt réteg kialakulását a csigahenger fala és a szilárd polimerrészecskék között (ld. „B” részlet az 1. ábrán).

Ezt az időpontot követően a polimer megömlesztéséhez szükséges energia főleg a megolvadt rétegben keletkezik, mégpedig nyírási energia formájában. A forró csigahengerből hőátadással történő energiátöransfer minden feldolgozó számára kézenfekvő, de a nyírási (vagyis mechanikai) energia által kiváltott felmelegítés folyamata már jóval kevésbé közismert, noha a polimer megömlesztéséhez szükséges energia túlnyomó részét ez közvetíti. Ezen hiányos ismeretek következtében sokan csak a csigahenger hőmérsékletével próbálják befolyásolni a feldolgozási folyamatnak a polimer megömlesztésére irányuló szakaszát.

A nyírási energia úgy jön létre, hogy a vékony megolvadt polimerréteg a csigahenger falához és a vele érintkező szilárd polimerrészecskékhez is egyaránt tapad. Ahogyan a fal a csigához viszonyítva elfordul, a megömlött, viszkózus polimer réteg folyamatos nyújtást szenved, mint egy gumiszalag. Az ömledék nyújtása mechanikai erőt (nyíróerőt) igényel, hogy a csigahenger a csiga körül foroghasson. Ez a nyírás az ömledékben hővé alakul, hasonlóan egy gyorsan hajlítgatott gumiszalaghoz vagy rézdróthoz, ahol a mozgó kar mozgási energiája adódik át az energiamegmaradás törvényét követve. E modellben a meghajtómotorban a villamos energia először mozgási energiává alakulva megforgatja a csigahengert, majd ez a mechanikai energia hővé alakul az ömledékrétegben, annak a két felület közötti folyamatos nyújtása révén.

Az extrudálás folyamán ez a folyamatos nyújtás mind több és több hőt visz be a műanyagömledékbe. Ennek következtében hőmérséklete megemelkedik, és így egyre több polimer ömlik meg, ahogyan a hő behatol a szilárd polimerrészecskékbe. Figyelembe kell azonban venni, hogy ez nem írja le az ömlesztési folyamat teljes mechanizmusát, mert a csigamenetek geometriája és kompressziós hatása is szignifikáns hatást gyakorol az olvasztásra. A spirális menetek hatásának elhanyagolása túlzottan leegyszerűsíti a megolvasztás mechanizmusát, de segít megérteni a viszkózus nyírási energiaátadás koncepcióját, ami a polimer megömlesztésének és ezután az ömledék-hőmérséklet emelésének fő energiaforrása. Egy adott polimerre az olvadás sebessége és a hőmérséklet emelkedése még egy teljes körű megolvasztási modell esetében is a csigahengernek a csigához viszonyított forgatásához szükséges nyírási energiával arányos, ami viszont a nyújtandó ömledék rétegellenállásának (viszkozitásának) felel meg.

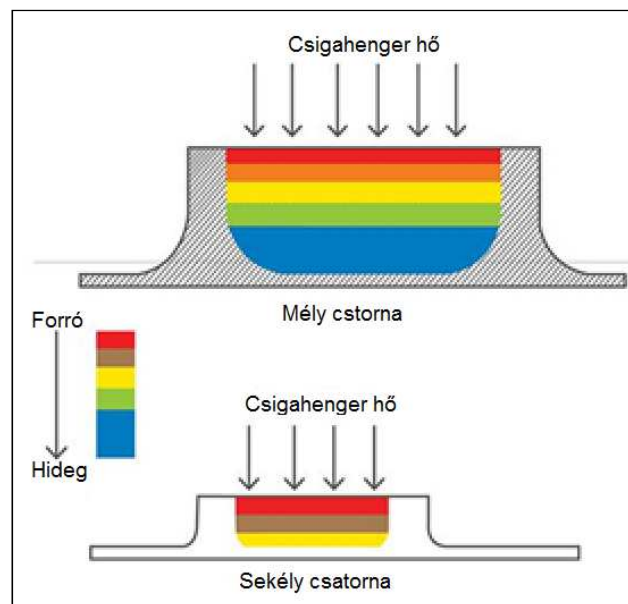
A megömlesztés sebessége szorosan arányos a csigahenger sebességével (a csigasebességgel), vagyis azzal a sebességgel, amellyel az ömledékréteget nyújtják. A nyíróerő a csigasebességgel szorozva lóerőben kifejezhető:

$$\text{nyírás} = (\text{HP} \cdot 63025) / \text{rpm},$$

ahol rpm a percenkénti fordulatszám, és HP a lóerő. Miután a lóerő a teljesítmény mértéke, ez azt jelenti, hogy a nyírás erősen arányos a polimerhőmérséklet változásával, ahogyan a polimer a csiga mentén elhalad. Ez természetesen egy nagyon leegyszerűsített magyarázata a nyírással átadott hőenergiaának.

Egy adott csigageometriához tartozó ömlesztési sebesség, illetve ezt követően a polimerömladék hőmérsékletének emelkedése nagyrészt a viszkozus nyírási energiaátadástól függ, ami viszont a csigasebesség és az adott polimer viszkozitásának a függvénye. Ez megmagyarázza, hogy miért befolyásolja olyan erősen a kihozatali teljesítmény az ömledék-hőmérsékletet, ha a csiga sebességét állandóan tartják. Mivel a nyíróerő, amely ahhoz szükséges, hogy a csigahengert a csigához viszonyítva forgassák, erősen függ a megnyújtandó polimer ellenállásától és nem pedig a tömegáramtól, a gyorsabb áramlás alacsonyabb ömledék-hőmérsékletet ad, míg a lassabb áramlás magasabbat. A csigahenger falának hőmérséklete sokkal kisebb hatást gyakorol az ömledék hőmérsékletére, kivéve a nagyon kis extruderátmérők esetében.

A csigahenger hőmérséklete a polimer megömlesztésében csak akkor játszik jelentős szerepet, ha az extruder átmérője kicsi és a csigasebesség is alacsony. Minden más esetben a viszkozus nyírási energia hatása dominál. Ugyanis a henger faláról a hőnek a polimerrétegen áthatolva kell lejutni a csigacsatorna aljára, a műanyagok pedig jó hőszigetelők, vagyis a hővezetéssel történő hőátadás komoly akadályba ütközik. Ha a modellt úgy egyszerűsítik, hogy a csigát (menetek nélküli) tömör rúdként tekintik, amely a viszkozus anyaggal teli, fűtött hengerben forog, belátható, hogy a nyírás által okozott hőfejlődés és a hővezetés aránya erősen függ attól, milyen nagy a rúd és a henger közötti rés. Ezért általánosságban igaz, hogy *minél nagyobb a csiga és minél mélyebbek a menetei, annál nagyobb a viszkozus nyírás okozta hőfejlődés szerepe* (2. ábra).



2. ábra A csiga csatornamélységének szerepe a csigahenger faláról átadott hőmennyiség hatására

Abban az esetben, ha a csiga kis átmérőjű és a menetek mélysége is csekély, a csigahenger fűtött faláról a hő gyorsabban adódik át vezetéssel a szilárd polimer részecskékhöz, mivel kisebb távolságot kell megtennie a jó hőszigetelő polimerrétegen át. Ezért ilyenkor a hengerfűtésből adódó hőátadás jelentős szerepet játszik, feltéve, hogy a lassú üzemelés erre elegendő időt biztosít.

Minden más esetben ennek hatása csekély, a menetmélység növekedésével a hővezetéssel történő teljes hőátadás időintervalluma exponenciálisan növekszik. Ahogy a csigák átmérője és menetmélysége növekszik, döntő fontosságúvá válik kialakításuk a hőfejlődés közben tartása szempontjából. Így például 12 collos (≈ 305 mm) csigával rendelkező, polimerrel feltöltött extruderekben több órás felfűtés után a polimer nagyobb része még nem ömlött meg. Ugyanakkor 2 collos ($\approx 50,1$ mm) csigák esetében már fél órás fűtés is szinte teljes megolvadást eredményez. Az egyszerű hővezetési modellszámítások szerint a polimerréteg vastagságának növelése négyzetes arányban növeli a hőátadáshoz szükséges idő nagyságát.

A gyakorlati tapasztalatok szerint az 1,5 collos ($\approx 38,1$ mm) vagy kisebb csigaátmérőjű, egycsigás extruderekben a gyártási folyamat a csigahenger hőmérsékletének szabályozásával szinte minden polimer feldolgozásakor jól kézben tartható. Ugyanakkor az ömledék homogenitása romlik, mivel itt a nyíróerők keverőhatása kevésbé tud érvényesülni. Az ömledék inhomogenitásának növekedésével a folyamat stabilitása is romlik.

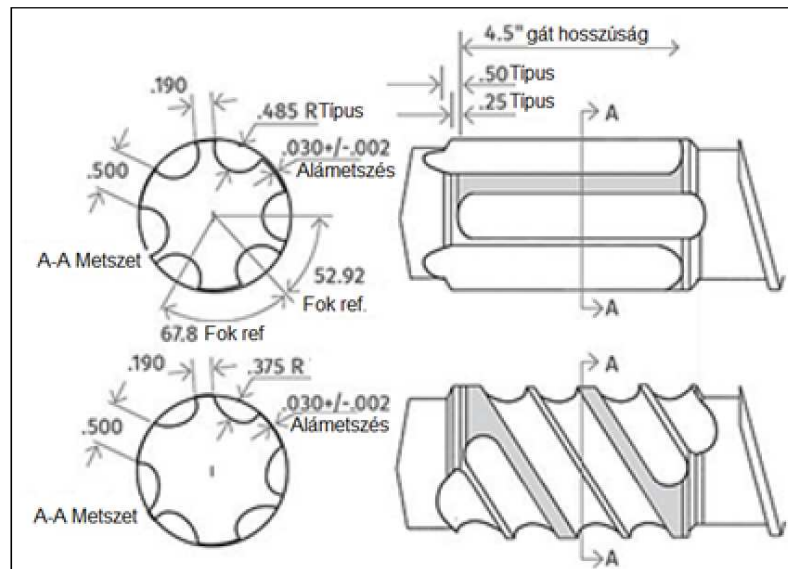
A csiga keverőszakasza

Észak-Amerikában az egycsigás extruderekben alkalmazott csigák felépítésében ma is igen elterjedten használják a *Maddock keverőelemeket*. Az 1970-es évek óta használatos megoldást kezdetben a fóliák és a kábelbevonatok gyártásához használták. Ez elsődlegesen egy diszperziós keverőeszköz, de ma már szinte mindenfajta keverési feladathoz felhasználják. Számos dizájn iterációs lépés után az ún. „*spirál Maddock*” lett a *legelterjedtebb típus*. Ennél a kialakításnál az az elképzelés, hogy a spirális csigamenetek egy bizonyos mértékű szivattyúzást biztosítanak, ami kisebb nyomásesést és bizonyos mértékű öntisztítást is eredményez. Mindkét várakozás többé-kevésbé teljesülhet, de az a tervezési ráfordítás, amellyel ezeket az előnyöket optimalizálni lehet, összehasonlítva az eredeti tengelyirányú „meneteket” tartalmazó kialakítással (3. ábra), meglepően komplex feladat. És ezen komplexitások figyelembevétele nélkül a spirális konfiguráció előnyei elveszhetnek, sőt a keverőszakasz hatásfoka még romolhat is.

Attól függően, hogy az eredeti kialakításból a méretek mely kombinációját tartották meg, az eredményezett kihozatali teljesítmény, nyomásesés, nyírési felhevítés és keverőhatás javulhat vagy romolhat az eredeti, egyenes menetek kialakításához képest. Mivel a tervezés során a megfelelő komplex számításokat gyakran elhagyták, ma számos gyengén teljesítő Maddock keverőelemekkel ellátott csigát használnak az iparban.

A spirális kialakításnál a keresztmetszet vagy a kerület néhány méretét le kell csökkenteni az eredeti kialakításéhoz képest a hélix szög (a csavarvonal szöge) miatt.

A 3. ábra szerinti spirális kialakításnál a hélix szög $32,48^\circ$ (5 coll ≈ 127 mm menetemelkedés), míg a barrier és lehúzó átfedéseket állandóan tartották, azzal a szándékkal, hogy diszperziós keverést és csatornaszivárgást biztosítsanak. Ez azt eredményezte, hogy a horony rádiusza 0,485 collról ($\approx 12,3$ mm) lecsökkent 0,375 collra ($\approx 9,52$ mm), hogy a keresztmetszethez illeszkedjen.



3. ábra A Maddock keverőelemek eredeti (fent) és spirális (lent) kialakítása

A hélix szög kiválasztása a keverőelem minden méretét befolyásolja. Ebben az esetben, például, a spirál 5 collos menetemelkedése a horony hosszának 75%-os növekedését és a horonytérfogat 40%-os csökkenését eredményezte. Ennek következtében az axiálisan hornyolt keverőelemhez képest a nyomásesés, még a spirál csekély szivattyúzó hatásával együtt is, a többszörösére nőtt. A szivattyúzás elemzése közepes viszkozitású polimerekre még csekély fejnnyomások esetében is elnyomta a spirál keverőelem okozta nyomásesés előnyét. Nem ismeretes az öntisztító hatás kvantitatív elemzésére irányuló munka, de a gyakorlati (a csiga kihúzásán alapuló) tapasztalatok szerint ez nem tűnik szignifikánsnak.

A keverőszakasz kialakítását az adott feldolgozási folyamathoz kell illeszteni, akárcsak a csiga többi részét. A csiga teljes kitolási teljesítménye függ a barrierréstől, és a hornyok szélességétől, mélységétől és hosszától. A kényszeráramlás a barrierrésen keresztül – vagyis az elsődleges keverési hatás – támogatja a kitolási teljesítményt, mivel legyőzi a barrierszakaszon fellépő nyomásesés jelentős részét. A barrierszakasz geometriája nagy befolyással van a diszperziós és elosztó jellegű keverési folyamatokra egyaránt. A nyomásesés és hőmérséklet-emelkedés esetében is hasonló a helyzet. Tudomásul kell venni, hogy ha a keverőszakasz valamely jellemzőjét egy kívánt hatás fokozása érdekében módosítják, az kedvezőtlen változásokat fog okozni más jellemzőknél (vagyis itt sincs „ingyen ebéd”).

A keverőelemekben lejátszódó folyamatok elemzése nagyon komplex feladat, különösen a keverő különböző részeinél az ömledék viszkozitásának becslése, illetve áramlásának mértéke a barrierszakaszon át és a csatornáknban. További változóként kell kezelni a keverőszakaszhhoz a csiga többi része által eljuttatott ömledék minőségét és viszkozitását is. Ezért érdemes egyszerű logikára hagyatkozni. Például, ha a fő kérdés a diszperzív keverés, akkor a nem barrier szélességét a kerületi irányban nem célszerű csökkenteni. Ha a minimális nyomásesés a kritikus érték, a hélix szöget és a csatornatérfogatot a lehető legnagyobbra célszerű választani, hogy lerövidítsék a folyási utat és csökkentsék az átlagos nyírást.

Összefoglalva megállapítható, hogy a spirális kialakítású Maddock keverőszakasz ugyan a fejlettebb technika imázsát sugallja, de nem feltétlenül jelent jobb keverő teljesítményt az áramlási viszonyok mélyreható elemzése nélküli csigatervezésnél, enélkül pedig előfordul, hogy rosszabb lesz, mint az eredeti kialakítás.

Barriercsigák kialakítása

Miután barriercsigákat nagyon gyakran alkalmaznak az extruderekben, érdemes tisztában lenni azok helyes kialakításának alapelveivel. A barriercsigákat úgy tervezik, hogy azon a csigaszakaszon, ahol a szilárd műanyag egy része már megömlött, az ömledék továbbjuthasson a szilárd anyagot tartalmazó csatornából az alámetszéses barrierszakaszon át a csiga további, ömledékcsatorna részeihez, a szilárd anyagot viszont ne engedje tovább. *A barrier helyes kialakításához egyaránt jól kell megválasztani a barrierés magasságát, hosszát és szélességét.*

Két erőhatás felelős a polimer átáramlásáért a barrieren át a szilárdanyag-csatornából az ömledékcsatornába. Az első (és általában a jóval fontosabb) erőhatás a kényszeráramlás (vonzolósos áramlás), a másik a két csatorna közötti nyomáskülönbség. Ez utóbbi csak nagyon komplex számításokkal kapható meg, ezért a csigatervezők sokszor elhanyagolják. Ez általában nem okoz jelentős hibát, kivéve néhány nagyon lágú műanyag esetében. A nyomás többnyire nagyobb a szilárdanyag-csatornában, és így ez hozzáadódva a kényszeráramláshoz, növeli az ömledék áramlási sebességét. A barrieren áthaladó kényszeráramlást a csiga kényszeráramlásához (QD) illesztve, az felhasználható a minimális barrierés kiszámításához. Egy egyszerű, párhuzamos lemezek közötti kényszeráramlás-egyenlet ($QD = V_0 H/2$) módosításával kiszámítható a csigabarrieren áthaladó áramlás (QB):

$$QB = 1/2(\text{fordulat/s} \cdot 2\pi \cdot 2(\text{csiga}\varnothing) \cdot \text{rés} \cdot \text{hélikus hossz})$$

Beillesztve a barrier hélikus hosszának értékét, és a csiga kényszeráramlását azonosnak tekintve a barrierével a minimális barrierés kifejezhető:

$$\text{rés}_{\min} = QD/[1/2(\text{fordulat/s} \cdot 2\pi \cdot 2(\text{csiga}\varnothing) \cdot \text{hélikus hossz})]$$

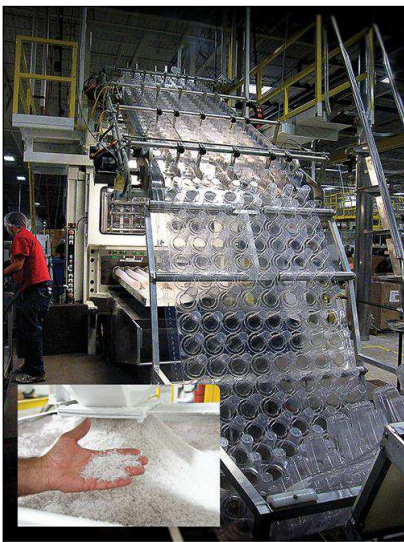
A barrier csigamenet szárnyszélessége negatívan befolyásolhatja a kitolási teljesítményt, mivel minél szélesebb annál nagyobb lesz a nyomásesés a barrierésen áthaladó ömledék számára. Miután azonban ezt az értéket a tervezők általában kicsire vá-

lasztják, legtöbbször nincs jelentős hatása. A sima falú csigahengerrel rendelkező egy-csigás extrudereknél a kitolási teljesítmény nagyon ritkán nagyobb, mint a kényszeráramlás sebessége, ezért ez bátran felhasználható a minimális rés méretének meghatározásához. Azonban hornyolt csigahengerű extruderekre ez nem igaz, itt a kitolási teljesítmény általában meghaladja a kényszeráramlásét, és a barrieren átfolyó anyag nyomáskülönbségből adódó része jelentős hatású lehet.

A fenti egyszerű kalkuláció segít elkerülni azt, hogy a barrier csigamenet szárnyai visszafogják a kitolási teljesítményt egy egyébként megfelelő barrier kialakításánál, és támpontot adnak ahhoz, hogy elkerüljék a túl nagy résméreteket. Arra is rávilágít, hogy a barrier hélikus hossza is ugyanolyan fontos tényező, mint a rés alámetszése.

Első látásra úgy tűnik, mintha egy rövid barrierhossz nagyobb rést igényelne, illetve megfordítva, a nagy barrierhossz nagyon kis rést tenne elegendővé. Azonban a QB használata önmagában nem elegendő, figyelembe kell venni, hogy a résnek összhangban kell lennie az olvasztási sebességgel a csatornában, vagyis az ömledékréteg filmvastagságával. A túl nagy résméret lehetővé teszi, hogy szilárd műanyag is bejusson az ömledékcsatornába, míg a túl kicsi visszafogja az áramlást és ömledék fel fog halmozódni a szilárdanyag-csatornában, ami akadályozza a megolvasztást.

Az ömledékréteg filmvastagságának kiszámítása nagyon nehéz a polimer tulajdonságainak mélyreható ismerete nélkül, és általában csak számítógépes szimulációval végezhető el, noha néhány jó közelítést adó empirikus módszer is létezik. Ezeket azonban nem minden tervező ismeri. Mindenesetre *a QB alkalmazásával a minimális résméret kalkulálható*. A gyakorlati tapasztalatok sokat segítenek, és általában a számított minimális résméret néhányszorosát lehet alkalmazni. A rés méretének alábecsülése jóval több problémát okoz, mint a túl nagy méret alkalmazása.



4. ábra Az in-line lemezextrúzió/hőformázó gépsoroknál a hulladék aránya elérheti a 60%-ot

A hulladék újrafeldolgozása

A műanyag-feldolgozók számára a hulladék újrafeldolgozása szükséges rossz. Fontos, hogy tudatában legyenek azoknak a negatív hatásoknak, amelyeket a hulladék okoz a termék tulajdonságai és az extrúzió hatékonysága szempontjából.

Minden műanyag-feldolgozó folyamat során keletkezik hulladék, még ha ez csak az indítási és a vágási hulladékot jelenti is. Ugyanakkor hőformázáshoz szükséges lemezextrúzió/hőformázó sorok esetében a hulladék aránya 60% körül mozoghat, míg a zacskó- és zsákgyártásnál ez az érték kb. 20%, még hatékony üzemvitel esetében is (4. ábra). A hulladék újrafeldolgozása gazdasági kény-

szer, de fontos ismerni a termék tulajdonságaira és az anyagtulajdonságok változása miatt a folyamat paramétereire gyakorolt hatásait.

Amikor egy műanyag áthalad egy extruderen, több-kevesebb degradációt szenved. Az ismételt feldolgozás során a molekulatömeg fokozatosan csökken, mert a polimerláncok eltöredeznek a nyíróerők és/vagy a megömlesztés hője okozta kémiai változások hatására. Ugyanakkor a molekulatömeg, vagyis a polimerláncok hossza az anyag számos fizikai tulajdonságát befolyásolja, beleértve a mechanikai jellemzőket is. Minél nagyobb volt a polimer eredeti lánchossza, annál nagyobb lesz a feldolgozás során a korai szakaszban elszenvedett tulajdonságromlás. Ezen túlmenően, számos tulajdonságokat pozitívan befolyásoló adalékanyag, mint az antioxidánsok, csúsztatók, stabilizátorok és az ütésállóságot javító adalékok elbomlanak az ismételt feldolgozási folyamat során, ezáltal tovább gyorsítva a polimer degradációját.

A hulladék degradációja az ismételt feldolgozás során rontja az extrúzió hatékonyságát is. Az extruderszerszám és a termék méretei közötti összefüggés megváltozik, változnak a szerszámban az áramlási viszonyok, csökken az ömledékszilárdság, még a csiga megömlesztő képessége is változik a molekulatömeg csökkenése következtében.

Az olyan technológiáknál, ahol a hulladék nagy százalékarányban kerül újrafeldolgozásra, egyes polimermolekulák akár több százszor is áthaladhatnak az extruderen, ami olyan mértékű degradációt okoz, hogy az originális műanyag hozzákeverése nélkül már teljesen használhatatlanná válna. E hatás minimalizálása érdekében ki kell dolgozni egy hulladék-visszadolgozási programot, hogy napi szinten, arányosan visszavezessék a különböző technológiai lépések során keletkezett hulladékot a gyártási folyamatba. Ez nem csak az egy molekula által elszenvedett feldolgozási folyamatok számát csökkenti az átlagos mértékre, hanem mérsékli a hulladék raktározási igényét is.

Természetesen az első lépés annak megállapítása, milyen a hulladékképződés „normál” szintje egy adott technológiánál. Ezt sorozatos mérésekkel, legalább egy hónapos intervallum alatt kell elvégezni. Ennek alapján lehet beállítani a technológiára a hulladék-visszadolgozási arányt. Ezt követően az arány tartásával újabb, legalább egy hónapos megfigyelés következik, aminek alapján tovább lehet módosítani az arányokat. Természetesen az ez alatt az idő alatt bekövetkezett drasztikus, előre nem látható változások (pl. meghibásodások, haváriák) hatását ki kell szűrni.

A konszolidálódott, hosszú távon is fenntartható hulladék-visszadolgozási arány betartásával a termék minősége és az extrúziós paraméterek beállítása stabilizálható, és nem lesz szükség az egyébként elkerülhetetlen folyamatos beavatkozásokra. A hulladék visszadolgozásához természetesen megfelelő, a hulladék összegyűjtésére, aprítására, kezelésére és tárolására szolgáló berendezések szükségesek, amelyek növelik az adott technológia beruházási és raktározási költségeit.

Összeállította: Dr. Füzes László

Frankland J.: Know how extrusion: Melting 101 = Plastics Technology, www.ptonline.com, 2015. december.

www.quattroplast.hu

Frankland J.: Know how extrusion: Managing regrind = Plastics Technology, www.ptonline.com, 2016. január.

Frankland J.: Know how extrusion: Venerable Maddok mixer still an extrusion workhorse = Plastics Technology, www.ptonline.com, 2016. február.

Frankland J.: Know how extrusion: Understanding the barrier gap = Plastics Technology, www.ptonline.com, 2016. március.

Frankland J.: Know how extrusion: Barrel heat and melting = Plastics Technology, www.ptonline.com, 2016. április.