

A műanyagok feldolgozásának elő- és utóműveletei

Dr. Füzes László okl. vegyészmérnök

Tartalom

I. rész

1. Előműveletek

1.1. Szárítás

1.2. Előmelegítés

1.3. Anyagváltást megelőző géptisztítás

2. Utóműveletek

2.1. Hőkezelések

2.2. Sorjamentesítés

2.3. Leállást követő géptisztítás

II. rész

2.4. Műanyag alkatrészek kötése

III. rész

2.5. Felületkezelések

A műanyagok feldolgozását számos olyan művelet kíséri, amelyek ugyan nem tartoznak szorosan a feldolgozási művelethez, de amelyek nélkül azt vagy nem lehetne megfelelő minőségben (néha egyáltalán) elvégezni vagy amelyek révén a feldolgozott termék tovább alakítható, új hasznos tulajdonságokkal látható el, esetleg tulajdonságai javulnak és így használati értéke nő.

A tanulmányt a Műanyagipari Szemle nyomtatott változatában 3 részre osztva közöljük (a 2014. 4. 5. és 6. számban), a honlapon pedig – legkésőbb a III. rész megjelenésekor – teljes terjedelmében szabadon hozzáférhetővé tesszük.

I. rész

1. Előműveletek

1.1. Szárítás

A hőre lágyuló műanyag alapanyagok közül a polietilén, polipropilén, PVC és polisztirol kivételével mindegyiket szárítani kell feldolgozás előtt. Ennek az az oka, hogy a levegő nedvességtartalmából tárolás, szállítás közben egyensúlyi mennyiségű

vizet vesznek fel és ez a víz a feldolgozás magas hőmérsékletén gőzzé alakulva hidrolízis révén a polimerláncok tördelődését okozza, azaz az átlagos molekulatömeget (láncossz) csökkenti és ez által erősen lerontja a feldolgozott műanyagtermék tulajdonságait. Egyes esetekben (pl. polikarbonát, PET) a mechanikai tulajdonságok terén akár nagyságrendi romlást is előidézhet. A nem megfelelően kiszárított anyag feldolgozása estén emellett legtöbbször a felület minősége is romlik, a termék felülete „cirmos”, esetenként akár hólyagos is lehet.

Bizonyos esetekben azokat az anyagokat is szárítanunk kell, amelyeknél egyébként erre nincs szükség, ha például tárolás vagy szállítás közben megáztak, vagy ha a hideg raktártérből a melegebb üzemcsarnokba behozva felületükön pára csapódik le. Ez utóbbi jelenség elkerülése érdekében az alapanyagokat a hideg időszakban minden esetben legalább egy nappal korábban a feldolgozóműhely területére kell hozni, hogy az anyag kellően felmelegedhessen.

Hasonló okok miatt a hőformázás és hegesztés előtt is szükség van szárításra ugyanezeknél az anyagoknál.

A szárítás történhet szakaszosan és folyamatosan, illetve központilag vagy az egyes gépek etető, adagoló berendezéseiben. Vannak olyan extruderek, amelyek csigaképzése olyan, hogy a kezdeti rövid megömlesztési és komprimáló szakaszt követően gáztalanító vákuumszegmenst iktatnak be, ahol a keletkező vízgőzt (és az esetlegesen képződő egyéb légnemű anyagokat) elszívják, és az ezt követő második kompressziós és egyéb szakaszokon már a hagyományos módon lehet a kiszárított anyagot feldolgozni. A szárítás történhet vákuumban is, ilyenkor alacsonyabb hőmérsékleteket lehet használni, és a beégés veszélye is kisebb. Tálcsás szárítóknál a műanyag granulátum rétegvastagsága 20–50 mm-nél ne legyen nagyobb.

Egyes anyagok (pl. a polikarbonát) nagyon érzékenyek a szárítás hőmérsékletére. Ha a szárítás hőmérséklete túl alacsony, egyáltalán nem szárad ki az anyag, ha pedig túl magas, az anyag károsodik azaz „beég”. Ez utóbbi jelenség, pl. a poliamid 6 és 66 esetén jól megfigyelhető. Az ilyen jellemzőkre az alapanyaggyártó termékismertetőjében általában felhívja a felhasználók figyelmét, de természetesen a felelősség mindig a feldolgozót terheli. A leggyakrabban használt műanyagok szárítási jellemzőit az *1.1. táblázatban* mutatjuk be.

Ügyelni kell arra, hogy a kiszárított anyag ne szívhasson fel újra nedvességet a levegőből. Ezért lehetőleg mindjárt a szárítás után, azaz 5–10 percen belül helyezzük be a (fűtött) etetőtölcsérbe (adagolóberendezésbe) vagy tároljuk levegőtől elzárt edényben. A központi szárítóktól a feldolgozó gépekhez vezető csővezetékek biztosítják, hogy a kiszárított anyag ne találkozzon nedvességgel. Ez azonban a legtöbb esetben nem igaz hosszabb (>1–2 napos) üzemleállítás esetén. Ilyenkor a csővezetéket le kell üríteni és az anyagot újra ki kell szárítani.

1.2. Előmelegítés

A műanyag alapanyagok és félkész termékek előmelegítésére általában nincs szükség, de bizonyos anyagoknál és technológiáknál ez elengedhetetlen. Előmelegítésre az alábbi esetekben kerül sor:

Műanyagok szokásos szárítási paramétereit

Műanyag típusa	Szárítás hőmérséklete*, °C	Szárítás ideje, h
Polietilén**	70–80**	2
Polipropilén**	80–100**	2
PVC**	70–80**	2
Polisztirol**	70–80**	2
ABS	80–85	2–5
SAN	70–80	2–4
Poliformaldehid	100–120	2–6
Poliamid 6	70–75	2–6
Poliamid 66	70–75	2–6
Poliamid 11	70–90	2–4
Poliamid 12	70–90	2–4
Poli(metil-metakrilát)	60–100	4–6
Polikarbonát	120	2–4
Poli(etilén-tereftalát)	120–140	3–7
Poli(butilén-tereftalát)	100–120	3–4
Poli(metil-metakrilát)	80–100	4–6
Poli(fenilén-éter)	100–110	2–3
Poliszulfon	135–150	3–4
Poli(fenilén-szulfon)	150–160	2–4
Poli(éter-szulfon)	150–180	2–5
Poli(éter-éter-ke-ton)	150–160	3–4
Poli(éter-imid)	120–150	4–7
Poliuretán (hőre lágyuló)	80–110	2–6

Megjegyzés: * vákuumszárítás esetén ált. 20–30 °C-kal alacsonyabb hőfok is elég.

** Normál esetben NEM kell szárítani, csak ha vizes lett az anyag.

- a) Hőre keményedő műanyagok sajtolása és fröccsajtolása gyakorlatilag mindig igényli az alapanyag előmelegítését. Fröccsöntésnél ezt a plasztikáló csiga végzi el. Ilyenkor a fröccshengerben (és a plasztikáló extruderekben) lévő anyag hőmérséklete mindig 30–60 °C-kal alacsonyabb, mint a szerszám hőmérséklete.
- b) A reaktív gyantaöntés (RIM) és a közönséges öntés esetében is akkor használnak előmelegítést, ha a ciklusidőt csökkenteni akarják. Az önmagukban még nem reakcióképes komponenseket felmelegítik, és a meleg folyadékokat általában egy statikus keverőben egyesítik. Ezt követően a gyantát bejuttatják a

(legalább 30–50 °C-kal) melegebb gyártószerszámba, ahol a reakció, azaz a polimerizáció és/vagy a térhálósodás végbemegy. Ügyelni kell arra, hogy a reakció a meleg komponensek összekeverése után azonnal megindul, noha az alacsonyabb hőmérséklet miatt lassabban. Általában minden 10 °C hőmérséklet-emelkedés megkétszerezi a reakció sebességét. Ezért egyrészt az összekevert anyagot minél hamarabb be kell juttatni a szerszámba, másrészt ha a gyártás folyamata valamilyen ok miatt 1–2 ciklusidőnél hosszabban leáll, a keverőt és az azt követő vezeték ki kell tisztítani, különben a gyanta beköt(het).

1.2. táblázat

Duroplaszt sajtolóanyagok előmelegítése

Műanyag típusa	Előmelegítés	
	Hőmérséklete, °C	Technikája
Fenoplaszt présporok	80–100	szárítószekrény vagy szállítószalagos alagútkemence, automata sajtológépeknél külön plasztikáló extruder
Aminoplaszt présporok	80–100	szárítószekrény vagy szállítószalagos alagútkemence, automata sajtológépeknél külön plasztikáló extruder
Epxi sajtolóanyagok	90–120	nagyfrekvenciás előmelegítés
Poliészter sajtolóanyagok	90–110	nagyfrekvenciás előmelegítés

- c) Hőformázás során a félkész terméket mindig elő kell melegíteni (1.3. táblázat).
- d) A fémbetéteket „besütésük” előtt szinte mindig szükséges előmelegíteni mind a fröccsöntés, mind pedig a sajtolás/fröccssajtolás esetében. Ugyanis a műanyagok hőtágulási együtthatója jóval (kb. tízszer) nagyobb, mint a fémeké. Ezért, amikor a forró műanyagömladék lehűl, a hideg fémbetétet nagy erővel szorítja össze. Ez gyakran olyan nagy feszültséget eredményez, hogy a műanyag megreped. A műanyagömladék hőfokához hasonló magas hőmérsékletű fémbetét az öt körülvevő műanyaggal együtt lehűl és önmaga is összehúzódik. Noha ez az összehúzódás kisebb mértékű, mint a műanyagé, mégis jelentősen csökkenti a műanyagban kialakuló feszültséget. Egyes műanyagok annyira érzékenyek a besütött fémbetétek okozta feszültségre, hogy besütés helyett utólag, a már lehűlt termékbe sajtolják be különböző módszerekkel a fémbetéteket. A duroplasztok térhálós szerkezetük miatt kevésbé érzékenyek a fémbetétek besütésére, mint a termoplasztok.

Hőformázandó műanyagok előmelegítése

Műanyag	Előmelegítés, °C
PS és PS-HI	95–135
PVC és PVC-HI	90–150
ABS	130–170
PC	150–210
PMMA	130–170
PETG (amorf)	130–160
PPE	170–195
PE-LD	100–115
PE-LLD	110–120
PE-HD	125–135
PP	160–170

1.3. Anyagváltást megelőző géptisztítás

A műanyag-feldolgozó gépeken általában elég gyakran cserélik a feldolgozandó anyagokat. Ez sok esetben más alappolimert is jelent, de új anyagnak számít ebből a szempontból az is, ha csak a feldolgozandó anyag színe változik. Ilyenkor az új anyag betáplálása előtt a gépet ki kell tisztítani. Egyes anyagok és egyes technológiák alkalmazásakor akkor is el kell végezni a gép (és gyakran a szerszám) kitisztítását, ha huzamosabb időre megszakítják a gyártást. Az olyan esetekben, amikor a feldolgozás során kémiai reakció is lejátszódik (pl. hőre keményedő műanyagok feldolgozásakor mindig) a gépet leállás után is mindig ki kell tisztítani.

Hőre lágyuló anyagok feldolgozásakor a fröccsöntő gép és az extruder csigáját és csigaházát általában vagy nagy sűrűségű polietilénnel, vagy speciális csigatisztító műanyaggal (ált. akrilát származékok) átjáratva tisztítják ki. Ha csak színcsere történik, akkor egyszerűen az új anyaggal járatják át a rendszert addig, amíg a korábban alkalmazott szín hatása eltűnik. Ha lehetséges, a termelést úgy kell programozni, hogy a világos (pl. fehér) színű anyaggal kezdenek és a sötét színeket a végére hagyják. Ha csak saját anyaggal járatják át (öblítik ki) a rendszert, előfordulhat, hogy a sötét és különösen a fekete szín még órák múlva is véletlenszerűen meg-megjelenik a gyártmányok egyes részein. Ennek az az oka, hogy a csigaház falán, az extruder fejrészében vagy máshol „felragadt”, pangó műanyag darabka egy idő után leválik helyéről és bekerül az anyagáramba. Mindez komoly minőségi problémákat okozhat.

Ha viszont kémiailag is eltérő műanyagot akarnak feldolgozni, akkor könnyen előfordulhat, hogy ha egy alacsonyabb feldolgozási hőmérsékletű anyag után egy magasabb ömledék-hőmérsékletet igénylő következik, a korábbról bennmaradó anyagma-

radék kémiaiilag elbomlik, degradálódik, elszenesedik, és ezáltal szennyezi a másodjára feldolgozott műanyagot. Egyes anyagok (pl. a PVC vagy a poliformaldehid) kémiai bomlása során korrozív és/vagy egészségkárosító gázok (sósav, formaldehid) is keletkezhet.

1.4. táblázat

Anyagváltásnál ajánlott géptisztító átjárató anyagok

Műanyag típusa	Tisztítóanyag	Átjárítás hőmérséklete
Polietilén	–	–
Polipropilén	PE-HD	170–200
Polisztirol	–	–
PVC (kemény)	PE-HD	150–180
PVC (lágy)	–	–
ABS	SAN/PE-HD	200-220
SAN	PE-HD	180-200
Poliamid 6	PE-HD	220–240
Poliamid 66	PE-HD	250–270
Poliamid 11	PE-HD*	200–220
Poliamid 12	PE-HD*	190–210
Poliformaldehid	PE-HD	190–210
Poli(etilén-tereftalát)	PE-HD/PP	220–270
Poli(butilén-tereftalát)	PE-HD/PP	200–240
Polikarbonát	PE-HD/PMMA/akrilátalapú csigatisztítók	220–280
Poli(metil-metakrilát)	Akrlátalapú csigatisztító	280
Poli(fenilén-éter)	PMMA/PE-HD	230–280
Poliszulfon	PE-HD/polikarbonát	260–300
Poli(fenilén-szulfon)	PE-HD	200–220
Poli(éter-szulfon)	PE-LD/PE-HD	250–330
Poli(éter-éter-keton)	PE-HD	300–350
Poli(éter-imid)	PE-HD	300–350
Poliuretán (hőre lágyuló)	SAN	180–220

Megjegyzés: *nem minden esetben szükséges.

Fordított esetben pedig, vagyis ha magasabb hőmérsékletről alacsonyabbra váltanak, az előző anyag maradéka nem tud megolvadni és ezért darabos formában leválva és az anyagáramba kerülve eltömi a rendszert vagy a termékbe „beágyazódva” eredményez selejtet.

2. Utóműveletek

A műanyagok egyik előnye más szerkezeti anyagokkal (pl. fémekkel, fával) szemben az, hogy az alakadás után általában nincs szükség festésre, polírozásra, illetve az, hogy a termék szabad formakialakítása gyakran feleslegessé teszi az alkatrészek összeszerelését, hiszen egyetlen, bonyolult formájú darabban több funkciót lehet egyesíteni. Bizonyos esetekben azonban mégis felületkezelés és szerelési műveletek szükségesek műanyagtermékeknél is. Tudomásul kell venni azonban, hogy az ilyen műveletek szinte mindig lényegesen megdrágítják a terméket és rontják a technológia termelékenységét. Ezért ha lehetséges, el kell kerülni azokat a megoldásokat, amelyek ilyen utóműveleteket igényelnek.

Bizonyos utóműveletekre azért van szükség, hogy csökkentsék azt az időt, amíg a termék a feldolgozógép alakadó egységében (ált. a szerszámban) tölt és ezáltal rövidebb ciklusidővel vagy tartózkodási idővel lesz gyártható és így a termelékenység növelésével jelentős költségmegtakarítás érhető el. Tipikusan ilyenek a hűtési, utóhőkezelési és a kondicionálási műveletek.

A felületkezelési eljárások, illetve a ragasztás és gyakran a hegesztés is felületelőkészítő műveleteket (legalább tiszta, zsírtalanított felületet) igényelnek. Az elő- és utóműveleteket célszerű a gyártástechnológia szerves részeként kezelni, vagyis az anyagtól és az alkalmazott technológiától függő módon már a termék formájának megtervezésekor figyelembe kell venni.

A műanyagtermékeken végzett legfontosabb utóműveleteket a következő csoportokba lehet sorolni:

2.1. Hőkezelések

- Hűtés
- Temperálás, feszültségrelaxáció, átkristályosítás, kémiai utóreakciók
- Kondicionálás,

2.2. Sorjamentesítés

2.3. Leállást követő géptisztítás

2.4. Műanyag alkatrészek kötése

- Hegesztés
- Ragasztás
- Mechanikai kötések

2.5. Felületkezelések

- A felület geometriájának módosítása
- A felület kémiai szerkezetének módosítása
- Festés, lakkozás
- Nyomtatás és feliratok készítése
- Fémbevonatok
- Egyéb utóműveletek
 - Polírozás
 - Bolyhosítás

- A felület textúrájának módosítása (prézelés)
- Kémiai módosítás
- Antisztatizálás,
- Súrlódáscsökkentés

(A 2.4. pontot a Szemle 2014. 5. számában, a 2.5. pontot a Szemle 2014. 6. számában fogjuk lözölni)

2.1. Hőkezelések

2.1.1. Hűtés

Annak a néhány esetnek a kivételével, amikor egyes polimerek feldolgozásakor szobahőmérsékleten játszódik le a térhálósodási reakció (pl. kézi laminálásnál), mindig szükség van a műanyag formadarabok hűtésére. Ez, legalábbis egy bizonyos hőmérséklet eléréséig, hőre lágyuló anyagoknál bekövetkezhet az alakadó szerszámban (pl. fröccsöntés, üreges test fúvás, hőformázás), az extrudálásakor a kaliberben vagy a lehúzóegységet megelőző külön hűtő-simító berendezésekben. A duroplasztok feldolgozásakor a fröccsszerszámból vagy a sajtolószerszámból kiemelt darabok a levegőn hűlnek le, vagy mesterséges hűtéssel biztosítják a megfelelő hűtést.

Hőre lágyuló fröccstermékek (továbbá fűjt üreges testek és hőformázott darabok) gyártásakor az első hűtési szakasz mindig a szerszámban játszódik le, melynek hőmérséklete lényegesen alacsonyabb, mint a műanyagömledéké (hőformázásakor pedig az előmelegített félkész termékénél). A szerszámba belépő forró anyag hőenergiáját a szerszám hűtésével, temperálásával el kell vezetni.

Minél nagyobb a hőmérséklet-különbség, annál gyorsabb a hűtés, a termék annál hamarabb szilárdul meg annyira, hogy a szerszámból kiemelhető. Mindez rövidebb ciklusidőt, azaz termelékenyebb, tehát olcsóbb gyártást tesz lehetővé. Azonban a gyors hűtés mindig növeli a belső feszültségeket, egyes anyagoknál (pl. PET, POM) pedig a kristályosodás lassú folyamata gyors hűtés esetén egyáltalán nem, vagy csak részben tud lejátszódni. Ezért a fröccsszerszámokat gyakran jóval szobahőmérséklet fölé, bizonyos műszaki műanyagoknál 100 °C fölé kell temperálni. Polipropilén vagy polietilén fröccsdarabok gyártásánál viszont gyakran hűtött vízzel szobahőmérséklet alatti értékre temperálják a szerszámot.

A szerszámok temperálását 70–80 °C alatt általában vízzel, 70–130 °C között olajjal, e felett pedig villamos fűtéssel végzik. Természetesen a helyi adottságoknak megfelelően e hőfokhatárok átléphetők. A legjobb hőátadása vizes temperálásnak van, ezért néha nyomás alatti vízhűtéssel 100 °C felett is temperálnak. A különböző műanyagokhoz ajánlott szerszámhőmérsékleteket a 2.1.1. táblázat mutatja be.

A szerszámból kiemelt darabok hőmérséklete szinte mindig jóval szobahőmérséklet felett van, különösen a vastagabb falú termékeké, mivel a műanyagok nagyon jó hőszigetelők. Ugyanakkor a külső „kéreg” már eléggé lehűlt ahhoz, hogy a darab manipulálható legyen.

Bizonyos esetekben azonban a szerszámból kiemelt darabokat ún. hűtősablonokra helyezik, amelyek nem engedik, hogy a hűlés közben „dolgozó” belső feszültsé-

gek vagy nagy termékeknél a darab saját súlya a terméket deformálja. Természetesen több hűtősablonra van szükség, mivel az utóhűtés ideje több, általában 3–15 fröccsciklus. Ez a megoldás munkaigényes (kivéve, ha robotok végzik) és ezért csak akkor alkalmazzák, ha szükséges. Hűtősablonokkal deformációmentes és általában nagyobb méretpontosságú termékek gyárthatók.

A hőformázásnál használt szerszámhőmérsékleteket a 2.1.2. táblázat mutatja be. Az extruderszerszámokat és a duroplasztok fröccsöntésénél és sajtolásánál (fröccsajtolásánál) használt szerszámokat nem hűtik, hanem éppen ellenkezőleg fűtik (ált. 150–170 °C), hogy egyrészt az ömledék ne szilárduljon meg, másrészt pedig a duroplasztok esetében a térhálósodás (és így a termék megszilárdulása) végbemenjen.

2.1.1. táblázat

Fröccsöntő szerszámok ajánlott hőmérséklete

Műanyag típusa	Ajánlott szerszámhőmérséklet* °C
Polietilén	5–20
Polipropilén	5–20
Polisztirol	20–40
PVC (kemény)	20–40
PVC (lágyított)	20–30
ABS	40–70
SAN	40–80
Poliamid 6	30–100
Poliamid 66	80–100
Poliamid 11	30–90
Poliamid 12	30–50
Poliformaldehid	60–140
Poli(etilén-tereftalát)	15–50** vagy 90–140***
Poli(butilén-tereftalát)	30–140
Polikarbonát	80–120
Poli(metil-metakrilát)	40–100
Poli(fenilén-éter)	70/110
Poliszulfon	95–160
Poli(fenilén-szulfon)	130–140
Poli(éter-szulfon)	120–180
Poli(éter-éter-ke-ton)	150–180
Poli(éter-imid)	65–175
Poliuretán (hőre lágyuló)	15–70

* Üvegszál-erősítésű típusoknál a magasabb hőfoktartományt ajánlják.

** Amorf terméket eredményez (pl. palack előgyártmányokhoz).

*** Kristályos terméket eredményez műszaki alkalmazásokhoz.

Hőformázott műanyagok ajánlott szerszámhőfoka

Műanyag típusa	Ajánlott szerszámhőmérséklet, °C
PS és PS-HI	–
PVC és PVC-HI	–
ABS	–
PC	80–150
PMMA	50–60
PETG (amorf)	55–60
PPE	80–90
PE-LD	–
PE-LLD	–
PE-HD	–
PP	–

Megjegyzés: a”–, jelöléssel ellátott anyagok feldolgozásakor hűteni kell a szerszámot.

2.1.2. Temperálás

2.1.2.1. Feszültségrelaxáció

A feldolgozási folyamatok során a polimermolekulák orientálódnak és a műanyag-termékekben mindig kialakulnak belső feszültségek is.

Az orientációt gyakran szándékosan hozzák létre, megszüntetése ilyenkor kimon-dottan káros lenne. Ha az orientáció kialakulása nem volt szándékos, megszüntetése álta-lában nem lehetséges a termék jelentős méretváltozása nélkül, emellett az esetek túlnyo-mó részében az orientáció nem zavaró, ezért nem is foglalkoznak megszüntetésével.

Más a helyzet a belső feszültségekkel. Ezek a feszültségek, ha a feldolgozási tech-nológia e tekintetben nem volt megfelelő, olyan nagyok is lehetnek, hogy a termék külső erőhatás nélkül, raktározás, szállítás közben eltörik, megreped. Különösen káros a na-gyobb mértékű belső feszültség a felületkezelésnek alávetett, a feszültségkorróziós hatá-soknak kitett és a jelentős külső terhelés mellett alkalmazott, illetve a nagy méretállandó-ságot igénylő termékekben. Ha forgácsolással dolgozzák fel a terméket, és ezzel meg-bontják a belső feszültségek egyensúlyát, ez a darab vetemedéséhez, töréséhez vezethet. Elastomerek és lágyított rendszerek esetében nincs szükség feszültség-relaxációra.

A belső feszültségeket jelentős mértékben vissza lehet szorítani a feldolgozási tech-nológia megfelelő beállításával. Ha ez valamilyen okból nem lehetséges (pl. fémbetétek használatakor) vagy ha ciklusidő csökkentése miatt használnak belső feszültségeket eredményező technológiát, illetve ha a felhasználás körülményei minimális feszültséget

igényelnek, akkor általában hőkezeléssel csökkenthető a belső feszültségek mértéke. A hőkezelés emellett gyakran elősegíti, meggyorsítja az esetleges kristályosodást vagy átkristályosodást és a kémiai reakciókat is. Ha a hőkezelést forró vizes közegben végzik, egyúttal kondicionálás is lejátszódhat. A feszültségrelaxáció az anyag T_g -je felett viszonylag gyorsan (néhány óra alatt) lejátszódik. A gyakorlatban a következő hőtáradó közegekben végzik a hőkezelést:

- a) levegőben (légcirkulációs kemencében)
- b) olaj- vagy glicerinfürdőben
- c) vízfürdőben (főként poliamidok esetében).

A hőkezelések ajánlott hőfokát a 2.1.3 táblázat tartalmazza.

- a) A forró levegős módszer akkor előnyös, ha a felületet tisztán kell tartani a következő műveletek vagy a felhasználási cél (pl. festés vagy gyógyászati termékek) miatt. Ekkor ugyanis nincs szükség az olajnyomok eltávolítására. A módszer hátránya, hogy lassúbb a folyadékfürdős eljárásnál, emellett a termék felülete oxidálódhat (pl. a nem hőstabilizált poliamid 6 és 66 termékek felülete 80 °C felett már néhány óra alatt besárgul). Ha a hőkezelést 140 °C felett végzik, a nem teljesen száraz terméket először ki kell szárítani, ezért felmelegítése csak fokozatosan történhet. A termékeket általában homokra, talkumra fektetik, hogy az esetleges méretváltozásokat ne gátolják.
- b) Az olajfürdős módszer (természetesen glicerint vagy más, magas forráspontú, semleges folyadékfürdőt is lehet használni) előnye a jó hőtáradás következtében a rövid kezelési idő, a tetszés szerinti, csak az anyag lágyuláspontjától függő mértékű hőmérséklet és az oxidáció megakadályozása. Ügyelni kell azonban arra, hogy az olaj ne okozzon feszültségkorróziós repedezést és ne is duzzassza a műanyagot. Ezért kritikus esetekben az olaj típusának kiválasztásánál az alapanyaggyártó ajánlásait kell figyelembe venni. A termékeket az olajban hagyva, a fűtés kikapcsolása után lassan kell lehűteni. A higroszkópos műanyagokból készült termékeket vagy közvetlenül a gyártás után, vagy külön kiszárítva szabad csak az olajfürdőbe behelyezni.
- c) A vízfürdős eljárást elsősorban a PA 6 és PA 66 termékeknél alkalmazzák, mert ekkor a feszültségrelaxáció mellett egyúttal megtörténik az egyensúlyi vízfelvételt megközelítő kondicionálás, és többé-kevésbé az átkristályosodási folyamatok is lejátszódnak. A módszer előnye, hogy a víz olcsó, nem szennyezi a felületet, megakadályozza az oxidációt, jó hőtáradást biztosít, és forrásban lévő víz esetén nem szükséges drága hőfokszabályozót alkalmazni. Desztillált (ioncserélt) víz használatakor a termék felületén nem rakódik le vízkő. A módszer hátránya, hogy csak 100 °C-ig alkalmazható (atmoszferikus körülmények között) és a gőzfejlődés miatt célszerű a szabadban vagy olyan helyiségben dolgozni, ahol a páralecsapódás nem okoz korróziós vagy más jellegű problémákat.

2.1.2.2. Kondicionálás

A kondicionálás egyfelől azt jelenti, hogy a feldolgozási folyamatok után 1–2 napig a normál klímát (23 °C, 50% relatív páratartalom) megközelítő körülmények között pi-

hentes a műanyagtermékeket. Ezalatt lejátszódik a kristályosodási és a feszültségrelaxációs folyamatok, illetve az esetleges kémiai utóreakciók legnagyobb része, a termék felveszi környezetének hőmérsékletét és több-kevesebb nedvességet is abszorbeál. Másfelől egyes műanyagok, mint pl. a poliamidok és a (főleg a hőre lágyuló) poliuretánok jelentős mennyiségű vizet vesznek fel környezetükből az egyensúlyi állapot (levegőn ált. 1–5%) eléréséig.

2.1.3. táblázat

Ajánlott hőkezelési eljárások

Műanyag típusa	Hőkezelés hőmérséklete és ideje, °C/h		
	Levegőben	Olajfürdőben	Vízfürdőben
PE-HD	80/2–4	–	–
PE-LD	60/2–4	–	–
PP	80/2–4	–	–
PVC(kemény)	60/2–4	–	60/1–2
PS	60/2–4	–	–
ABS	80/4–6	–	–
POM	110/2–4	150/1–2	–
PPE	100–120/1–3	100–120/0,5–1*	–
PET	140/1–4	–	–
PBT	150/4–24	–	–
PMMA	75/1–3	–	–
PA 6	–	170/0,3–1	100/0,5–1
PA 66	–	180/0,3–1	100/0,5–1
PA 11	80/1–3	120/0,5–1	100/0,5–1
PA 12	80/1–3	110/0,5–1	–
PC	120/2–3	120/1–2	–
PSU	166/1–5	165/0,02–0,1*	–
PES	190/3–5	–	–
PUR	80–160/1–24	–	–
PEI	150/2–6	–	–
PPS	220/2–4	–	–
PEEK	190/3–5	–	–

Megjegyzés: * gliceriben.

A poliamid- és a poliuretántermékekben a víz lágyítóként viselkedik, és jelentős mértékben befolyásolja a méreteket, továbbá a mechanikai és villamos (esetenként néhány más) tulajdonságok értékét. Ezért az ilyen anyagból készült termékeket felhasználásuk, szerelésük előtt kondicionálni kell, azaz beállítani, illetve minél jobban megközelíteni az egyensúlyi állapotnak megfelelő víztartalmat. Ez a PA6 és PA66 esetében a falvastagságtól függően vagy 1–2 napos hideg vizes áztatást, vagy 0,5–1 órás forró vizes főzést igényel. Ez utóbbi a feszültségrelaxációs és átkristályosodási folyamatokat is elő-

segíti, vagyis tovább javítja a termék méretállandóságát. A poliamid 11 és 12 esetében az egyensúlyi vízfelvétel (kb. 1–1,2%), illetve hatása az anyagjellemzőkre sokkal kisebb. A nedvességfelvétel a levegőn is bekövetkezik, de ez néhány mm falvastagságú termékek-nél 1-2 hónapot is igénybe vesz. A kondicionálatlan PA6 és PA66 termékek törékenyek, méreteiket jelentősen megváltoztathatják. A kondicionálást azonban csak a hegesztések, hőkezelések és más, száraz anyagot megkövetelő műveletek befejezése után szabad elvégezni.

2.1.2.3. Kémiai utóreakciók, átkristályosítás

- a) A hőre keményedő műanyagok legnagyobb részénél a feldolgozási műveletet követően megszilárdult polimer még tartalmaz lereagálatlan funkció csoportokat. Az ilyen csoportok koncentrációja a hidegen térhálósodó rendszerekben általában nagyobb, mint a melegen térhálósítottakban, mert ha a térhálósodás alatt egyre növekvő molekulatömegű polimer T_g -je magasabb lesz, mint az anyag aktuális hőmérséklete, a reakció kinetikusan gátoltta válik (befagy). Ha a terméket megmelegítik, és így a hőmérséklet meghaladja az üvegesedési hőmérsékletet, a térhálósodási reakció tovább folytatódhat.

A hőkezelésen kívül besugárással is ki lehet alakítani térhálós szerkezetet. Így végzik pl. egyes polietilén termékek térhálósítását, de lehet kémiai módszereket, azaz általában peroxidok (pl. dikumil-peroxid) bekeverését is alkalmazni. Kémiai térhálósítással állítják elő a PE habok jelentős részét. A besugárással történő eljárásnak elsősorban a polietilénhabok gyártásában, továbbá csövek, kábelek hőállóságának növelésében és az ún. zsugorcövek előállításában van nagy jelentősége.

Polipropilénben már nagyipari szinten használnak olyan (szilikonalapú) adalékokat, amelyek a fröccsöntött vagy extrudált termékekben utólag alkalmazott melegvízes fürdő (vagy nedves meleg klíma) hatására elbomlanak és az így aktiválódott gyökök térhálós szerkezetet eredményező keresztkötéseket hoznak létre a polimerláncok között. Hasonló megoldásokat más műanyagokhoz is lehet alkalmazni, illetve nemcsak nedvesség, hanem utólagos besugárással hatására aktivizálódó adalékokkal is lehet keresztkötéseket létrehozni.

- b) A hőre lágyuló polimerek közül egyesek részlegesen kristályos anyagok. Ez azt jelenti, hogy a polimerláncok egy hányada apró kristályokat alkot, e kristallitok között pedig mindig több-kevesebb amorf állapotú lánc helyezkedik el. A kristályos hányad aránya, a kristálymódosulatok fajtája, illetve a kristallitok méretei, továbbá az apró kristallitokból felépülő ún. szupermolekuláris szerkezetek (pl. szferolitok, lamellák stb.) mérete adott műanyagban egyrészt a feldolgozási körülményektől, másrészt az esetleges utókezelésektől függ. Ezek az anyagjellemzők ugyanakkor nagy hatást gyakorolnak a műanyagtermékek mechanikai, termikus, vegyszerállósági, optikai és más tulajdonságaira.

Az egyes műanyagok kristályos hányada, a kristályosodás sebessége és a lehetséges módosulatok száma nagyon eltérő. A legfontosabb hatása a molekulászerkezetnek van,

de olykor az adalékanyagok és a darab termikus előélete is jelentős hatást gyakorolhatnak a kristályos jellemzőkre.

Vannak olyan anyagok, mint pl. a polietilén, amelyek rendkívül gyorsan kristályosodnak, a kristályos hányad gyakorlatilag csak a molekulaszervezettől (az elágazások számától, hosszától és relatív elhelyezkedésétől) függ. A szferolitok méretei csak a legkülső rétegben függenek a feldolgozási körülményektől, az adalékanyagok (pl. gócképzők) teljesen hatástalanok.

Más műanyagokban (pl. PET, PPS, PEEK, POM) a kristályosodás lassú, ezért a feldolgozási körülményeknek, az utókezelésnek és a gócképző adalékoknak nagyon nagy hatása van a kristályos hányad nagyságára, a képződő krisztallitok módosulataira, illetve a belőlük kialakuló szupermolekuláris szerkezetek méreteire egyaránt. Az ilyen anyagokból gyors lehűtéssel teljesen vagy nagyrészt amorf termékeket lehet előállítani (pl. PET palackok), amelyeket azután utólagos hőkezeléssel részben kristályosítani lehet. Ebben az esetben azonban nagymértékű zsugorodásra és emiatt vetemedésre kell számítani. A polikarbonát viszont olyan lassan (180–190 °C-on néhány napig hőkezelve) kristályosodik, hogy a gyakorlatban alkalmazott feldolgozási módszerekkel (pl. extrúzió, fröccsöntés) csak amorf termékeket lehet előállítani belőle. Oldatból kicsapva azonban már kristályosítható, így készülnek a nagy hőállóságú villamosipari fóliák.

Bizonyos műanyagok, mint pl. a poliformaldehid, polipropilén, poliamid 6 és más poliamidok, kristályos hányada csak kismértékben függ a feldolgozási körülményektől, és az utólagos hőkezelésektől, de a kristálymódosulatok aránya és a szferolitok mérete nagymértékben befolyásolható mind ezekkel, mind pedig gócképző adalékok bekeverésével. A polietilénkristályok átlagos növekedési sebessége 5, a poliformaldehidé 0,4, a poli(etilén-tereftaláté) pedig csak 0,01 mm/min.

Végül az amorf polimerek nevüknek megfelelően nem kristályosíthatók, legfeljebb extrém körülmények között érhető el bizonyos mértékű molekuláris rendezettség. Ennek oka a polimerlánc rendezetlenségében és az oldalsoportok zavaró hatásában rejlik. A térhálós polimerek a laza térhálójú gumik és a kristályok kialakulása után térhálósított polimerek (pl. a besugárzott polietilén) kivételével szintén nem kristályosíthatók.

A kristályosodási folyamatok elősegítéséhez alkalmazható hőkezelés körülményei megegyeznek a feszültségrelaxációnál alkalmazottakkal (2.1.3. táblázat), általában a két folyamat egyidejűleg játszódik le, mivel mindkettőhöz a polimerláncok elmozdulása, részleges átrendeződése szükséges. Műszálak gyártásakor a hőkezelésnek döntő hatása van az erősen orientált polimerláncokból kialakuló kristályok szerkezetére és ezen keresztül a szál tulajdonságaira. Átkristályosítás játszódhat le nagyfokú deformáció (ált. nyújtás) hatására is. Ennek legismertebb példája a hidegen húzott, rendkívüli szilárdságú polietilén-szálak gyártása.

2.2. Sorjamentesítés

A két- vagy többrészes alakadó szerszámok segítségével előállított műanyagtermékek, vagyis pl. a fröccsöntött, sajtolt, fújt és öntött darabok szinte mindig tartalmaznak sorját ott, ahol a két szerszámfél találkozik. A sorja lehet jelentős mértékű (pl. 0,1–0,5

mm vastag, 0,1–10 mm széles), de lehet alig észrevehető kitüremkedés is. A fröccsöntéssel, RIM technológiával, fröccsajtolással és egyes öntési eljárásokkal gyártott darabok emellett egy vagy több beömlési csonkot is hordoznak (kivéve a forrócsatornás fröccsöntést). A beömlési csonkot szinte minden esetben el kell távolítani (pl. lecsípni, levágni), a sorját pedig legfeljebb akkor lehet rajtahagyni a darabon, ha az a felhasználó által nem látható felületen helyezkedik el.

2.2.1. A beömlőcsonk eltávolítása

A beömlőcsonk eltávolítása fröccstermékekről gyakorlatilag csak akkor nem szükséges, ha ún. forrócsatornás szerszámot használtak (ilyenkor a beömlőcsonk nem szilárdul meg). Bizonyos esetekben a beömlőcsonkot a gyártó szándékosan hagyja rajta a darabon. Erre általában akkor kerül sor, ha egy szerszámban több különféle alkatrészt készítenek el, amelyeket azután össze kell szerelni és a beömlőcsonk egy hordozókeretre (ez általában az elosztócsatorna) rögzíti azokat. Ennek közismert példáját jelentik a játékmódellek, ahol az így kiszerelt apró alkatrészeket a felhasználónak kell a hordozókeretről letörnie/levágnia.

A beömlőcsonkot általában a gépen dolgozó munkás a helyszínen, még meleg állapotban vágja le éles késsel vagy csípőfogóval. Ha a darab kihűlt vagy az alapanyag nagyon szívós, illetve ha a csonknak nagy a keresztmetszete, azaz kézi módszerekkel nem lehet boldogulni, akkor kis célgéppel szokták a csonkot levágni. Ezt a módszert alkalmazzák akkor is, ha a csonk olyan felületen van, ahol rontja a darab esztétikai értékét. A gépi levágás (ált. marással kombinálva) és a vágási felület polírozása sok esetben kielégítő eredményt ad.

Előfordul, hogy ha ez funkcionálisan nem zavaró, a beömlőcsonk helyét kifúrják/kimarják és a visszamaradó lyukat vagy a szerkezet részeként fogadtatják el, vagy egy külön szerszámban készített (fém vagy műanyag) dugóval zárják le. Tübeömlés esetén gyakran a kidobáskor bekövetkező rázkódás és a darab leesése elegendő ahhoz, hogy a beömlőcsonk a gátnál letörjön. Nagy darabszámoknál kifizetődő lehet az ultrahangos levágás, melynek elve azonos az ultrahangos hegesztéssel és szegeccseléssel. Az ultrahangos levágókészüléket vagy a szerszámba integrálják (ez nagyon drága) vagy kézzel/robottal átrakják a darabot egy levágóberendezésbe. Ez a módszer nemcsak levágja a beömlőcsonkot, de a vágási felületet is elsimítja. Ultrahanggal a sorját is eltávolíthatják (megolvasztva eltűnik). Az ultrahangos eljárást csak hőre lágyuló műanyagoknál lehet alkalmazni.

A RIM technológiával gyártott PUR integrálhab darabok esetében a viszonylag nagy keresztmetszetű csonkok levágásának helyét, ha azok látható felületen helyezkednek el, kikittelik és (ált. a darabbal együtt) lefestik.

2.2.2. A sorja eltávolítása

A sorjázás a hőre lágyuló műanyagokon általában elkerülhető, ha a gyártószerszámok jó állapotban vannak. Ha mégis sorja keletkezik, az melegen, éles késsel a legtöbbször könnyen eltávolítható. Ha ez nem lehetséges, sorjátlanító célgépet kell szerkeszteni,

de ez ritkán fordul elő. A sorja helyét, ha az a darab megjelenését rontja, fel kell polírozni, vagy ultrahangos sorjátlanítást kell alkalmazni.

Hőre keményedő műanyagokból sajtolt vagy fröccsöntött termékeken a sorjázás szinte mindig szükséges. Ez elvégezhető:

- a hőre lágyuló műanyag termékekhez hasonlóan a helyszínen, a még meleg darab kézi sorjátlanításával,
- sorjázó célgéppel,
- kisebb alkatrészeket koptató szemcsékkel (pl. dióhéj- vagy barackmag őrléménnyel) együtt dobmalomba helyezve. Számos ezen az elven működő, automata és félautomata univerzális sorjázógépet forgalmaznak.
- Előfordul, hogy átmenő furatok, hornyok felületén a sorja összefüggő hárttyát alkot, amelyet az egyszerű sorjátlanítás nem távolít el. Ezeket ki kell fújni vagy marni.

2.3. Leállást követő géptisztítás

Hasonlóan a feldolgozási folyamat indításakor végzett géptisztításhoz, ha a gép leállítása után más anyagot akarnak feldolgozni, célszerű a még meleg gépet kitisztítani. Néhány különösen érzékeny anyag (pl. polikarbonát) feldolgozásakor még akkor is ajánlatos a tisztítást elvégezni, ha a későbbiekben nem kívánnak anyagot cserélni.