

Hővezető műanyagok

A modern műszaki élet egyre inkább megköveteli a hőmenedzsmentben is a könnyen alakítható műanyagok és kompozitjaik alkalmazását. A cikkben a nagy hővezető-képességű és hőnyelésre és leadásra képes úgynevezett fázisváltó anyagok főbb típusait, legkorszerűbb megoldásait tekintjük át, és végül bemutatunk néhányat az ilyen kompaundokat előállító cégek és termékeik közül.

Tárgyszavak: hővezetés, fém és kerámia töltőanyag, vezetőképesség javítása, határfelület, perkolációs küszöb

A műanyagok hővezető képességének javítására szolgáló módszerek

A műanyagok kis villamos- és hővezető-képességükről ismertek. Az első oka a lokalizált elektronszerkezet (a polimerek többségénél), a másodiké a többnyire rendezetlen szerkezet és a gyenge intermolekuláris erők jelenléte. A műanyagok sokoldalú alakíthatósága, feldolgozhatósága azonban már régóta kívánatosá tette villamos- és hővezető-, estenként pedig villamosan szigetelő és nagy hővezető-képességű műanyagok előállítását. A villamos vezetőképesség növelésének egyik útja az ún. vezető polimerek kialakítása, amelyekben erősen delokalizált elektronok vannak, a másik pedig villamosan vezető adalékanyagok (elsősorban fémek vagy szénalapú mikro- vagy nanoszerkezetek) hozzáadása a műanyag mátrixhoz, amelyben az adalékok egymással érintkezve folyamatos vezető hálózatot alkotnak. Ez csak egy bizonyos határkoncentráció (az ún. perkolációs küszöb) felett következik be. A vezetőképességet az adalékok vezetőképessége, mennyisége, alakja, méret- és alakeloszlása, orientációja és a részecskék közti kontaktus minősége határozza meg. Bizonyos változtatásokkal ugyanez mondható el a hővezető-képességről is. Hővezető polimereket lehet ugyan fejleszteni, de szinte minden esetben hővezető adalékot kell hozzáadni a szigetelő műanyaghoz. Ha az adalék fém vagy szénalapú töltőanyag, akkor a villamos- és a hővezető-képesség egyidejűleg nő. A villamosan vezető adalékok hővezető-képességének két komponense van: a mozgékony elektronokból és a rácsrezgésekből származó. Ez utóbbit „kvázirészecskékkel”, úgynevezett fononokkal szokták leírni, amelyek áramlása viszi a hőt. Az elektronokhoz hasonlóan azonban a fononok is szóródnak, ami csökkenti a hőátadás hatásfokát. A fononok szóródnak magán a kristályrácsra is, de különösen a rácshibákon és a kristallitok közti határfelületeken. Ezért van az, hogy az amorf anyagok, amelyek definíció szerint sok rácshibát tartalmaznak, kevésbé vezetnek a hőt, mint az azonos kémiai összetételű kristályos anyagok (pl. kristályos kvarc és kvarcüveg). A villamosan nem vezető adalékok (ha, mint általában, hővezető-képességük nagyobb a műanyag mátrixénál) csak a hővezető-képességet növelik, a villamosat nem. Sok esetben, ha pl. a töltött polimert hő-menedzsment céljaira használják, a hőt vezető, de villamos szempontból szigetelő anyagokra van szükség. Tekintettel arra, hogy az anyagok hővezető-képessége sokkal kisebb skálán változik (nagyságrendek tekintetében) mint a villamos vezetőképessége, ezért a műanyagok hővezető-képességét adalékolással kisebb mértékben lehet növelni, mint a villamos vezetőképességet – de sok célra ez is elég. Jelenleg a legtöbb erőfeszítést a hővezető részecskék közti kapcsolat javítására és olyan hővezető-képességi modellek kifejlesztésére fordítják, amelyek segíthetik az új kompaundok fejlesztését.

A polimerek hővezető-képessége többnyire a 0,2–0,4 W/(m·K) tartományba esik, és ez megnehezíti az elektronikai eszközökben keletkező hő elvezetését. Vannak ugyan olyan polimerek, amelyek (többnyire irányfüggő módon) nagyobb hővezető-képességet mutatnak (pl. folyadékkristályos vagy kristályos szerkezetük miatt), de kézenfekvőbb a nagy hővezető-képességű adalékok bedolgozása a polimerekbe. Ennek egyik akadálya az, hogy még ha az adalék hővezető-képesség százszorosa is a műanyag mátrixénak, a hatás alig észrevehető. Az alábbiakban néhány olyan „trükköt” mutatunk be, amelyet a kínai Shaanxi-ban működő Északnyugati Műszaki Egyetem ezzel foglalkozó csoportja fejlesztett ki a hővezető-képesség javítására.

A nagyobb hővezető-képességű polimerek fejlesztése során a folyadékkristályos fő- vagy oldalláncú epoxigyantákon sok kísérletet végeztek. Egy normál biszfenol-A-diglicidil éter alapú epoxigyantához képest, ahol vékony filmekben a filmre merőleges hővezető-képesség 0,19 W/(m·K) körül van, a filmmel párhuzamos pedig 0,65 W/(m·K) körül, a folyadékkristályos oldalláncot tartalmazó epoxigyanták esetében ezt sikerült 0,33 W/(m·K)-re, illetve 1,24 W/(m·K)-re növelni. Főláncban folyadékkristályos egységet tartalmazó epoxigyantákban az általános hővezető-képességet sikerült 2,7-szeresre növelni a közönségesen használt típusokhoz képest (0,51 W/(m·K)). Ha ehhez még nagy hővezető-képességű BN (bórnitrid) töltőanyagot is adtak 30%-ban, a kompozit hővezető-képessége 1,02 W/(m·K)-re nőtt. Az epoxigyanták mellett történtek kísérletek poliimidek, polioximetilén, polikarbonát és más (főként aromás) hővezető-képességének növelésére is folyadékkristályos egységek bevitelével, de ennek megvannak a maga korlátjai, nem kis mértékben azért, mert a folyadékkristályos részletek lehetnek ugyan lokálisan rendezettek, de makroszkópos méretekben az anyag izotrop, tehát az orientáció irányában vett és arra merőleges vezetőképességek átlagát tapasztaljuk. A láncok orientációja azonban a feldolgozás megfelelő kialakításával növelhető.

A következő tényező, amivel javítani lehet a hővezető polimer kompozitok hatásfokát, a polimer/töltőanyag határfelület termikus ellenállásának csökkentése. A határfelületi szóródás egyik fő oka a két fázis rezgési tulajdonságainak (akusztikus impedanciájának, végső soron modulusának) ugrásszerű változása. A kutatás két pályán halad: a határfelületi ellenállás csökkentése (ITR) a töltőanyag és a mátrix között (ITRM-F) és két különböző töltőanyag között (ITRF-F). Ha például alumínium oxidot (Al_2O_3) bórnitrid (BN) nano-lemezekkel (BNNS) borítottak úgy, hogy a drágább BNNS 1:7 arányban szerepelt az olcsóbb alumíniumoxidhoz képest és ezt a módosított töltőanyagot 65 tf%-ban bekeverték epoxigyantába, 2,43 W/(m·K) hővezető-képességet kaptak (a tiszta gyanta megfelelő értéke 0,21 W/(m·K) tehát ez több, mint tízszeres növekedés), és ezt hasonlíthatjuk össze az azonos mennyiségű alumíniumoxidot tartalmazó rendszer 1,39 W/(m·K) értékével, illetve azzal az 1,94 W/(m·K) értékkel, amit akkor kapunk, ha az Al_2O_3 és BNNS töltőanyagokat külön-külön adjuk hozzá a gyantához. Hasonló javulást lehetett kimutatni SiC/BNNS heteroszerkezetek alkalmazása során is. A töltőanyag/mátrix határfelületi ellenállást hatékonyan lehet csökkenteni a mechanikai erősítésben már jól ismert megoldásokkal, pl. szilán kapcsolóanyagokkal. Ha pl. többfalú szén nanocsövet (MWCNT) trietoxi-vinilszilánnal kezelnek, majd ebből 10 tf%-ot bevisznek a polivinilidén fluoridba (PVDF, hővezető-képessége 0,17 W/(m·K)), a kompozit hővezető-képessége 1,55 W/(m·K), ami jelentősen nagyobb, mintha azonos mennyiségű, nem felületkezelt MWCNT töltőanyagot használtunk volna (0,48 W/(m·K)). (Azt csak melleleg jegyezzük meg, hogy a megnövekedett hővezető-képességhez az is hozzájárulhatott, hogy a felületkezelt nanocső kevésbé agglomerálódik, tehát jobban ki tud épülni a vezető (perkolatív) szálhálózat). Raman spektroszkópia alkalmazásával sikerült közvetlenül is kimutatni az ITRF-M ellenállás csökkenését a felületkezelt rendszerekben. A kompozitok hővezető-képességének növekedése önmagában nem elég bizonyíték

a határfelületi ellenállás csökkenésére, szükség van megfelelő mikroszkopikus modellek és mérési technikák kidolgozására is.

A hagyományos effektív-közeg alapú számítások nem elég pontosak a finom részletek megkülönböztetésére, és nem tudják figyelembe venni azt a jól ismert ténytet, hogy a hővezető (vagy villamosan vezető) részecskék hajlamosak szálszerű agglomerátumokká összeállni, amelyekben belül könnyebben megy a hőtranszport, mint az egymástól elszigetelt, vagy gyengébben érintkező agglomerátumok között. Végeselem módszerrel végzett számítások segíthetnek annak eldöntésében, hogy az ilyen agglomerátumok száma, hossz szerinti eloszlása és orientációja hogyan befolyásolja a makroszkóposan megfigyelhető vezetőképességet. Ami a perkolációs koncepció érvényességét illeti, még további vizsgálatokra lehet szükség, ugyanis széntartalmú töltőanyagok esetében azonos mintáknál a villamos vezetőképesség sokkal nagyobb mértékben nő, mint a hővezető-képesség. Ennek egyik oka az is lehet, hogy a töltőanyag és a mátrix villamos vezetőképességének hányadosa általában jóval nagyobb, mint a hővezető-képességek hányadosa, a másik az, hogy a villamos tér (különösen, ha nagy) változást okoz a töltőanyag részecskék közti kontaktusokban (mikro-letörések) és ez csökkenti a részecskék közti ellenállást. Ilyen mechanizmus a hővezetésben nem létezik.

Újdonságok a polimer alapú hő-menedzsment anyagok területén

A hővezető műanyagok egyik legfontosabb alkalmazási területe az elektronikai hő-menedzsment, ahol a nagy teljesítményű elektronika által termelt hőt kell elvezetni. A korábban gyakran alkalmazott fém vagy kerámia alapú hő-menedzsment anyagoknak megvannak a hátrányaik: a fémeket villamosan szigetelő réteggel kell elválasztani az elektronikától – ami többnyire termikus szigetelést is jelent – a kerámiák alakíthatósága pedig korlátozott, és sűrűségük is viszonylag nagy. A hő-menedzsmentben használt anyagoknak két fő típusa létezik: az egyik a megnövelt hővezető-képességű anyagok csoportja, a másik a hőtároló anyagoké. Ez utóbbiakat fázisváltó anyagokként (PCM) is ismerjük, amelyek a fázisátalakulás során elnyelik a fejlődő hőt, majd később leadják, ezzel csökkentik a hőmérséklet ingadozását.

A tiszta (töltőanyagot nem tartalmazó) polimerek hővezető-képességét az alábbi egyenlet írja le:

$$\kappa = \frac{C_p v l}{3}$$

ahol C_p az állandó nyomáson mért fajhő, v a fononok (a rácsrezgés kvázi részecskéinek) sebessége és l a fononok átlagos szabad úthossza. Ha a polimer lánc teljesen egyenes lenne a számított hővezető-képesség nagyon nagy is lehetne ($350 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), a gyakorlatban azonban $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ alatti értékeket mérünk, mert a láncok orientációja rendezetlen, és még a részben kristályos polimerek esetében is a párhuzamos polimer láncszakaszokat hurkok választják el egymástól, ahol a rácsrezgések szóródnak – ezért a szabad úthossz valóságos polimerekben sokkal alacsonyabb, mint kinyújtott, különálló polimer láncok esetében lehetne. Ezért a polimerek hővezető-képességének növelésére az egyik lehetséges stratégia a kristályosság mértékének és orientációjuknak növelése. Az orientációt növelhetjük pl. mechanikai vagy villamos erőtér alkalmazásával, vagy a feldolgozás során alkalmazott erős nyírással. A főlánc menti hővezető-képesség növelhető, ha a főláncot merevvé tesszük (konjugáció, aromás csoportok, folyadék-kristályos rendezettség). A villamosan szigetelő polifenilén-szulfid, vagy az úgynevezett vezető főláncú polimerek (poliacetilén, polipirrol, politiofén, polianilin) hővezető-képessége valamivel (mintegy másfélszer)

nagyobb, mint az alifás főláncú polimereké. Hasonló nagyságrendű növekedés érhető el folyadék-kristályos részek beépítésével. A polimerek kristályossága általában nem teljes, ezért a kristályosság növelésével elérhető javulás viszonylag csekély – hacsak, mint az ultra nagy molekulatömegű polietilén (UHMWPE) esetében, nem alakul ki speciális kristályszerkezet (hengeres krisztallitok, erősen orientált lamellák). A kevésbé speciális HDPE (nagy sűrűségű polietilén) esetében is akár 8,14 W/(m·K) hővezető-képesség érhető el erősen orientált rendszerekben – az orientáció irányában. Még további növekedés érhető el polimer szálak esetében, ahol a megnyúlás több 100% is lehet. Polietilén esetében nagyon nagyfokú megnyújtással a polietilén monokristályra jellemző értékek is elérhetők.

Hővezető kerámiát tartalmazó polimer kompozitok esetében alkalmazzák azt a trükköt is, ami a villamosan vezető kompozitok esetében jól ismert: ha különböző alakú és méretű töltőanyagot alkalmazunk, a kisebb méretű töltőanyag segíthet a vezető hálózat hatékonyabbá tételében azzal, hogy összeköti a nagyobb hővezető szemcséket. Az 1. táblázatban olyan töltőanyagokat tüntettünk fel, amelyeket gyakran használnak műanyagok hővezető-képességének növelésére.

1. táblázat.
Különböző hővezető töltőanyagok és azok hővezető-képessége

| | Töltőanyag | Hővezetőképesség [W/(m·K)] |
|-------------------|---|----------------------------|
| Fémek | ezüst (Ag) | 421 |
| | réz (Cu) | 401 |
| | alumínium (Al) | 237 |
| | nikkel (Ni) | 158 |
| | cink (Zn) | 121 |
| Szénalapú anyagok | szénszálak (CF) | 300–1000 |
| | szén nanocső (CNT) | 2000–6000 |
| | grafit | 100–400 |
| | grafén | 5300 |
| Kerámiák | bórnitrid (BN) | 250–300 |
| | alumíniumnitrid (AlN) | 300 |
| | szilíciumkarbid (SiC) | 120 |
| | alumíniumoxid (Al ₂ O ₃) | 30-40 |

A szénalapú töltőanyagok között említhetjük volna még az expandált (duzzasztott) grafitot, a grafén-oxidot és a grafén-nanolemezeket is, amelyek ugyancsak javítják a műanyag hővezető-képességét. Az expandált grafit erős savak hozzáadásával készül és egyfajta fellazított szerkezetet mutat, amelyet impregnálni is lehet pl. epoxigyantával. Ezzel a technikával mindössze kb. 1 tf% expandált grafitot tartalmazó rendszerben sikerült az orientációra merőleges irányban 4,14 W/(m·K) hővezető-képességet elérni. Redukált grafénoxidot tartalmazó rendszerekben hidrotermális módszert alkalmazva szén-nanocsövekkel összekötött szén-aerogéleket alakítottak ki, amelyeket utólag gyantával impregnáltak.

A fémek közül leggyakrabban az ezüstöt, a rezet és a nikkelt használják. Különösen szívesen alkalmazzák a nanorészecskéket vagy a nanocsöveket (vagy ún. nanodrótokat), mert ezek kisebb térfogattört mellett alakítják ki a perkolatív hálózatot. Mindössze 1,8 tf% réz nanocsövet

tartalmazó szilikogumi esetében $3,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ értéket sikerült elérni, ami közel hússzorosa a szilikogumiénak. A fém töltőanyagot természetesen szénalapú, vagy kerámia töltőanyagokkal is lehet kombinálni, amely sokszor szinergetikus hatást eredményez. Ilyenkor célszerű a kétféle töltőanyagot eltérő mérettartományból kiválasztani, hogy a kisebb részecskék el tudják játszani az összekötő híd szerepét a nagyobb részecskék között.

A kerámiák közül leggyakrabban az alumíniumoxidot, az alumínium- és bórnitridet használják, mert ezek növelik legnagyobb mértékben a hővezető-képességet. Mivel a hexagonális bórnitrid, amelyet erre a célra használnak, lemezes szerkezetű, a lemezek orientációjának növelésével javítható a hővezető-képesség a random orientációhoz képest. Az orientáció hőre lágyuló mátrixok esetében javítható a nyírás növelésével vagy préssel, hőre keményedő mátrixok esetében pedig fagyasztva szárítással, majd impregnálással.

A hővezető-képesség javításának egyik eszköze az ún. kettős perkoláció jelensége, amely a villamosan vezető rendszerekben jól ismert. Ha például redukált grafénoxidot és bórnitridet használnak természetes gumi mátrixban, és a kétféle töltőanyagot úgynevezett jégtemplátos önszerveződéssel hálózattá alakítják, már alig 5 tf% körüli töltő anyagtartalomnál $1,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ értéket sikerült elérni. A jégtemplátos orientáció arra a megfigyelésre épül, hogy a víz erős hőmérsékletgradiens hatására hajlamos orientáltan kristályosodni. Ha az ilyen szerkezeteket fagyasztva szárítási módszerrel állítják elő, a visszamaradó diszpergált anyag elég szilárdságot mutat ahhoz, hogy az utólagos impregnálást az orientáció elvesztése nélkül el lehessen végezni. Természetesen ez csak akkor működik, ha az impregnáló folyadék vagy ömledék viszkozitása nem túl nagy. Az önszerveződés elérésének több más módja is van, például a rétegenkénti felépítés (layer-by-layer assembly), kémiai gőzkiválasztás, 3D nyomtatás, villamos fonás, vékony rétegek összepréselése, vákuumos párologtatás stb. Gyakori megoldás az úgynevezett „dekorált” vékonyrétegek vagy nanoszálak készítése, ahol a felülethez kémiai úton hővezető nanorészecskéket kötnek, majd az így kapott, megnövelt vezetőképeségű elemeket (amelyekben a hővezető elemek elmozdulása korlátozott) kötik össze egymással akár impregnálással, akár meleg préssel. A 3D nyomtatási technikát ugyancsak felhasználják olyan mikrostruktúrák létrehozására, amely rendezett formában tartalmazza a hővezető töltőanyagokat, mert így nagyobb a hőtranszfer hatásfoka. Grafén tartalmú poliuretánok esetében az orientáció révén $12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ hővezető-képességet is el lehet érni, ami majdnem két nagyságrenddel haladja meg a mátrix hővezető-képességét. A kémiai gőzkiválasztás és préselési technológiák kombinációjával szén nanocső és exfoliált grafit tartalmú kompozitokban $38,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ hővezető-képességet sikerült elérni.

A hőmenedzsment területéhez tartoznak az úgynevezett fázisváltó anyagok (PCM), amelyekben a főkomponens vagy a töltőanyag elsődleges fázisátalakulása (többnyire olvadása és fagyása) révén a hőenergia átmeneti tárolására képes, és így csökkenti a hőmérséklet ingadozását. A módszernek vannak fejlettebb, de egyben magasabb műszaki felkészültséget igénylő változatai is, amelyben a hőtárolásra nem fázisváltást, hanem reverzibilis kémiai reakciót használnak. A fizikai fázisátalakulás előnye, hogy annak során a hőmérséklet állandó, csak a hő áramlik. Ez a kémiai reakciókra nem igaz. A fázisátalakulás lehet szilárd-szilárd (pl. kristálmódosulatok közti átalakulás), aminek előnye, hogy nincs lényeges alak- és térfogatváltozás, de az energiatárolás sűrűsége nem túl nagy. A legtöbb alkalmazásban a szervetlen és a szerves alapú szilárd-folyadék átalakulást használják. A két módszer előnyeit és hátrányait az alábbi 2. táblázat hasonlítja össze.

A szerves alapú fázisváltó anyagok többnyire viaszokat (C16–C26 alifás szénhidrogének), poli(etilén)glikolokat (PEG400–PEG20000) vagy zsírsavakat alkalmaznak. Mint a 2. táblázatban említettük, a szerves anyagok esetében a túlhűlés mértéke (a kristályosodási és az olvadási

2. táblázat.

A szervesetlen és szerves alapú fázisváltó anyagok előnyei és hátrányai a hőtárolásban

| Szilárd-folyadék PCM | Előnyök | Hátrányok |
|-----------------------------------|--|--|
| Szervesetlen szilárd-folyadék PCM | 1. Nagy energiatárolási sűrűség 2. Nagy hővezetőképesség 3. Olcsó | 4. Nagy túlhűtés 5. Fázisszeperáció |
| Szerves szilárd-folyadék PCM | 1. Nagy energiatárolási sűrűség 2. Széles hőmérséklettartományban választható a fázisátalakulás hőmérséklete 3. Izoterm viszonyok 4. Nincs fázisszeperáció 5. Nincs túlhűlés vagy nagyon kicsi 6. Nem toxikus, nincs korrózió 7. Jó termikus és kémiai stabilitás a hosszú távú felhasználás során 8. Gyakori természetes előfordulás | 9. Instabil alak (szivárgás a fázisátalakulás során) 10. Kis hővezetőképesség |

hőmérséklet különbsége, amit a gátolt göcképződés okoz) kicsi, legfeljebb 10 °C, az olvadáspontok tipikusan 5 és 70 °C között változnak, az olvadáshők 100 és 250 J/g között. A szerves alapú fázisváltó anyagoknál az egyik probléma az elszivárgás megakadályozása és a hővezetőképesség növelése, hogy gyorsabb legyen a termikus válasz. A szivárgás megakadályozására leggyakrabban alkalmazott eszközök a kapszulázás, a porózus és támasztó (scaffold) hordozóanyagok alkalmazása. A kapszulázás 140 J/g olvadáshőig jól használható és viszonylag könnyen feldolgozható anyagokat eredményez. A kapszula lehet nagyobb méretű (mm–cm), vagy mikrométerű (µm–mm). A kapszula fala lehet hőre lágyuló anyag (PMMA, PS) vagy hőre keményedő műanyag (pl. melamin-formaldehid gyanta). Esetenként szervesetlen bevonatokat is létrehozhatnak (pl. SiO₂ bevonatot szol-gél reakcióval). A szervesetlen bevonat növeli a hővezető-képességet, de viszonylag törekeny. Ezért a szervesetlen komponenseket a kapszula héjában gyakran szerves komponensekkel kombinálják.

Szerkezet rögzítő hordozóanyagokként alkalmaznak aerogéleket, 3D nyomtatott szerkezeteket, de ha pl. a fázisváltó anyag polimer (PEG), térhálósítással is rögzíthető a struktúra. Porózus hordozók vagy támasztó anyagok lehetnek szilikátok (vermikulit, diatomit), expandált grafit, aktív szén stb. Itt a kapillaritás biztosítja az átmenetileg megolvadó fázisváltó anyag szivárgásának megakadályozását. A porózus anyag mennyiségét kísérletileg kell megállapítani, hogy a szivárgásra ne kerüljön sor, de a mechanikai és egyéb jellemzők még elfogadhatóak maradjanak. A PEG alapú fázisváltó anyagokban szívesen alkalmaznak olyan cellulóz-származékokat, amelyek funkció csoportokat tartalmaznak és hidrogénhidakkal kötik meg a PEG molekulákat (pl. karboxil-cellulóz). Kitüntetett szerepet játszik a cellulóz-nanokristály (CNC), amely nagy fajlagos felületével önmagában is kitűnő rögzítőanyag. A poliuretán-kémia változatossága lehetővé teszi, hogy blokk-kopolimerizációval a fázisváltó anyagot mintegy bepolimerizálják a PUR mátrixba. Erre a PEG, amely maga is egy diol, tehát része a poliuretán szerkezetnek, különösen alkalmas. Ha a PEG blokkok elég hosszúak, akkor is képesek kristályosodni, hőt lekötni és leadni, ha a poliuretán térhálós szerkezetű. Hosszú oldalláncot tartalmazó akrilátok/metakrilátok (pl.

hexadecil-akrilát) polimerizációjával vagy töltőanyagokra történő ojtásával előállíthatók olyan PCM anyagok, amelyekben az oldallánc-fázis saját olvadásponttal rendelkezik – anélkül, hogy olvadás után folyékonnyá válna, hiszen hozzá van kötve a főlánchoz. Ha az a töltőanyag, amihez ezt a speciális polimert hozzákötik, maga is jó hővezető (pl. grafénoxid) akkor a hővezetés problémája is kiküszöbölhető. A fentebb felsorolt hővezető töltőanyagok többsége alkalmazható a szerves PCM anyagok hővezető-képességének javítására.

Ami a PCM anyagok alkalmazását illeti, itt előkelő helyen szerepel a nagyteljesítményű elektronika, ahol hő-interfészként és/vagy hőelvezető/elosztó anyagként használják őket. Az alkalmazástól és a geometriától függően a síkban vagy a síkra merőlegesen van szükség nagyobb hővezető-képességre, és itt kell azokat a megfontolásokat alkalmazni, amiket korábban a hővezető töltőanyagok orientációjával kapcsolatban említettünk.

Hővezető műanyagokat gyártó cégek és termékeik

A némileg egzotikus, az iparág csúcsát jelentő megoldások után, amelyek inkább a jövő lehetőségeit vázolják, nézzük meg a már rutinszerűen alkalmazott hővezető kompaundok piacát és gyártóit.

Az elektronikai cégek mellett az autóipar, a világítás, az orvosi eszközgyártás és a gépgyártás is nagy vásárlója a hővezető polimereknek és kompozitoknak, a piaci vizsgálatok két-számjegyű éves növekedésről szólnak. A fejlesztés korábbi stádiumában a nagyteljesítményű műszaki műanyagok voltak a tipikus mátrixok (PPS, PSU, PEI), a későbbiekben az elérhetőbb műszaki műanyagok kerültek előtérbe (poliamid 6 és 66, polikarbonát stb.). Az olyan kompaund-gyártók, mint az RTP, a Celanese, a PolyOne, a DSM vagy a BASF korán ráálltak ilyen termékek fejlesztésére és gyártására. Az elektromobilitás nagymértékben növelte az ilyen anyagok iránti keresletet, pl. az akkumulátor-tartó szerkezetek gyártására. Itt a hővezető, de villamosan szigetelő anyagok különösen fontos szerepet játszanak. A súlycsökkentés és az egyre nagyobb „sűrűségű” integrált villamos szerkezetek esetében a hőelvezetés lehet a sebességkorlátozó tényező. A hőelvezető anyag kombinációja a tartókerettel olyan megoldás, ami csökkenti a terigényt és a szerelési költségeket. A teljesítményelektronikában az ráfröccsöntés és tokozás az egyik legfontosabb követelmény, amit kerámiákkal nem lehet teljesíteni. A nagyobb világítótestekben (pl. utcai világítás) a súlycsökkentés ugyancsak fontos gazdasági szempont, a hővezető műanyagok alkalmazásával akár 20%-os költségmegtakarítás is elérhető. Az autóiparban az akkumulátorok mellett a világítástechnikai és a kijelző alkalmazások jelentik a fő piacot, ahol intenzív hőfejlődés van. A szerkezeti alkalmazásokban komoly mechanikai igénybevétel is fellép, ez az oka annak, hogy pl. a poliamidokat szívesen használják a kompaundálók. A polikarbonát előnye, hogy a hővezető PC könnyen kombinálható a világítótestekben szívesen alkalmazott átlátszó polikarbonát elemekkel. A PBT jó fröccönthetőségének és kiváló mechanikai tulajdonságainak köszönhetően ugyancsak szívesen felhasznált mátrixanyag, de a már olcsóbb műszaki műanyagokkal versenyezni képes PP is megjelent a kínálatban. A nagyobb igényeket támasztó, de költségeket elviselni képes alkalmazásokban a PPS, PEI, PEEK, PSU is szerepel. Ilyen igény lehet pl. az orvosi készülékek esetében az ismételt sterilizálhatóság, vagy a folyamatosan nedves környezettel szembeni ellenállóképesség. A kompaundáló cégeknél felhalmozódó tapasztalat lehetővé teszi a vevők számára, hogy az alkalmazásnak megfelelő terméket kérjenek, mert nem mindig vannak tisztában vele, hogy milyen szintű hővezető-képességre lesz szükségük.

Az adalék- és töltőanyaggyártók ugyancsak felfedezték maguk számára ezt a piaci szegmest, és a grafit, garfén, kerámiák számára ez is nagyon fontos piaccá vált. A grafit olcsóbb,

de kisebb hővezető-képesség növekmény érhető el vele, a grafén drágább, de hatékonyabb. Az alumíniumoxid esetében, amely a viszonylag olcsóbb hővezető töltőanyagok közé tartozik, a szemcseméret-eloszlás és a felületkezelés testre szabásával próbálják javítani a hővezető-képességet. A Huber Engineered Polymers cég részként működő Martinswerk cég Martoxid alumínium-oxidjai ilyen fejlesztések révén akár 60%-ban is bedolgozhatók PP, TPO, poliamid 6 és 66, ABS, PC és LSR termékekbe anélkül, hogy a mechanikai tulajdonságok vagy a feldolgozhatóság elfogadhatatlan mértékben romlana.

A mátrix, töltőanyag, kompaund megválasztásakor mindig az jelenti a problémát, hogy megfelelően egyensúlyozzunk az ár, a termelékenység és a mechanikai és egyéb jellemző között. A jelenleg kereskedelemben elérhető kompaundok hővezető-képessége tipikusan a 0,40–40 W/(m·K) tartományban mozog. Vannak speciális területek, ahol pl. a hővezető-képességet elektromágneses árnyékolással, ütésállósággal, UV vagy hőstabilitással, vagy égésgátlással kell kombinálni, ami újabb megoldandó problémát jelent – szóval az élet nem áll meg, nem lehet üldögélni a babérokon, a fejlesztés folyamatos.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György

Gu J., Ruan K.: Breaking through bottlenecks for thermally conductive polymer composites: a perspective for intrinsic thermal conductivity, interfacial thermal resistance and theoretics = Nano-Micro Letters, 2021 február, 13.k., 110.

Zhang H., Shi T., Ma A.: Recent advances in design and preparation of polymer-based thermal management material = Polymers, 2021 augusztus, 13.k., 2797.

Sherman L.M.: A Bright Future for Thermally Conductive Plastics = Plastics Technology, 2019 július, <https://www.ptonline.com/articles/a-bright-future-for-thermally-conductive-plastics>

Sherman, L.M.: Thermally Conductive Nylon 6 for Electric Sports Car Component = Plastics Technology, 2022 június, <https://www.ptonline.com/news/thermally-conductive-nylon-6-for-electric-sports-car-component>