

## Nagy hőállóságú műszaki műanyagok

A nagy hőállóságú műszaki műanyagok fő alkalmazási területei közé tartoznak a dinamikusan fejlődő elektromos és elektronikai, valamint az elektromos járműveket gyártó iparág. A poli(aril-éter-ke-ton) (PAEK) szemikristályos, hőre lágyuló polimerek nagy hőtűrése, mechanikai szilárdsága és kémiai ellenállása számos más területen is jól használható.

*Tárgyszavak: nagy teljesítményű műszaki műanyagok; hőállóság; poli(aril-éter-ke-ton) (PAEK); poli(éter-éter-ke-ton) (PEEK); elektromobilitás*

### Nagy hőállóságú PAEK polimerek

A poli(éter-éter-ke-ton) (PEEK) nagy hőtűrése, mechanikai szilárdsága és kémiai ellenállása ideális tulajdonságok igényes autói-pari, elektronikai, repülőgépipari és orvostech-nikai alkalmazásokban. A PEEK a poli(aril-éter-ke-ton)-ok (PAEK) néven ismert szemikristályos, hőre lágyuló műanyagok családjába tartozik. A PAEK polimerek nagy hőmérsékleti stabilitással és kiváló mechanikai szilárdsággal rendelkeznek. Különbségek a fizikai állapotok közötti átmeneti hőmérsékletekben, vagyis az üvegesedési hőmérsékletben ( $T_g$ ) és az olvadási hőmérsékletben ( $T_m$ ) jelennek meg (1. táblázat).

A PAEK polimerek  $T_g$  és  $T_m$  hőmérséklete közötti eltérések befolyásolhatják a fröccsöntött alkatrészek fontos tulajdonságait, a gyúlékonyságot és füst kibocsátást, a mechanikai szilárdságot, az üto- és szakítószilárdságot, a méretstabilitást, a rugalmasságot, az adhéziót, a kúszást, a vegyszerállóságot, a kopásállóságot, a fáradással szembeni ellenállást, a nedvesség felszívódását, a szigetelési szilárdságot és a sugárzásállóságot.

A nagy hőállóságú műanyagok általában hagyományos fröccsöntő berendezéseken feldolgozhatók, de a szerszámokat magas hőmérsékletre (legalább 165 °C) kell felfűteni, mert a PAEK polimerek feldolgozási hőmérséklete általában 370 és 410 °C között van.

A szerszámtervezésnél is számos kulcsfontosságú tényezőt kell figyelembe venni:

- **Szerszám anyaga:** Az acél a standard választás a szerszámhoz, a H-13, S-7 vagy P-20 nagy szilárdságú típusok a legtartósabbak a PAEK műanyagok nagy volumenű gyártásában. A prototípusgyártásban költségkímélőbb megoldás az alumínium lehet.
- **Szerszám degradáció:** A PAEK polimerek feldolgozási hőmérséklete a legmagasabb a fröccsöntésben használt műanyagok közül. A szerszámtervezésnél figyelembe kell venni a gép és a henger méretét, megakadályozandó a berendezés és a szerszám idő előtti kopását.
- **Fűtés/hűtés:** A hőátadó csatornák elengedhetetlenek, hogy a szerszámot a fröccsöntés előtt megfelelően felfűtsék és a fröccsöntött terméket lehűtsék a kivétel előtt.
- **Karbantartási ciklusok:** A PAEK polimerek esetében a szerszámok karbantartása prioritást élvez, mivel fennáll az idő előtti kopás lehetősége, és több ütemezett tisztításra van szükség a fröccsöntött alkatrészek hibamentességének biztosítása és a gyártás megfelelő nyomon követése érdekében.

1. táblázat. PAEK hőre lágyuló műanyagok hozzávetőleges üvegesedési ( $T_g$ ) és olvadási ( $T_m$ ) hőmérséklete.

Polimer típus	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]
Poli(éter-éter-ke-ton) (PEEK)	151	338
Poli(éter-ke-ton) (PEK)	160	372
Poli(éter-éter-ke-ton-ke-ton) (PEEKK)	160	360
Poli(éter-ke-ton-éter-ke-ton-ke-ton) (PEKEKK)	165	384
Poli(éter-ke-ton-ke-ton) (PEKK)	156	338

Nem kapcsolódik közvetlenül a szerszámtervezéshez, de fontos megjegyezni, hogy a magas hőmérsékleten történő fröccsöntés különösen érzékeny a nedvességre. Az anyagoknak teljesen száraznak kell lenniük a feldolgozás előtt, különben meghibásodás léphet fel.

### Nagy hőállóságú műanyagok alkalmazása

A magas hőmérsékletnek ellenálló, vagy más néven nagy hőállóságú műanyagokat elsősorban az elektromos és elektronikai (E&E) termékek, valamint az elektromos járművek (EV) gyártása során használják, de más területen is egyre gyakoribbá válik alkalmazásuk. Az E&E iparág évek óta erőteljesen nő, de az elektromos járművek piacának bővülése jelenti a legnagyobb kihívást a nagy hőállóságú műanyagok gyártói számára. Az elektromos járművek alkatrészeinek nemcsak könnyebbnek és kisebb méretűnek kell lenni ahhoz, hogy megfeleljenek a gyakorlati követelményeknek, hanem hosszabb ideig ellen kell állniuk a magasabb hőmérsékletnek, és olyan további tulajdonságokkal is rendelkezniük kell, mint az égéskésleltetés, a kúszóáram-szilárdság és az olajállóság, mindezt a stabilitás és a mechanikai integritás megőrzése mellett.

Ha az elektrosztatikusság a kérdés, például érzékeny elektronikai termékeknél, az antisztikus vagy sztatikus disszipatív technológiák nagy hőállóságú műanyagokkal kombinálhatók. A PEEK szénszállal vagy szén nanocsövekkel módosítható, hogy állandó sztatikus disszipatív és antisztikus teljesítményt nyújtson. Ez hiánypótló az elektronikai termékek és félvezetők piacán, ahol a berendezéseknek, szerszámoknak és szerelvényeknek az elektrosztatikus kisüléssel (ESD) szemben ellenállónak kell lenni, de nem lehetnek annyira vezetőképesek, hogy az elektromos áramot vezessék. Az üveg-, az ásványi- és a szénszállak továbbra is a nagy hőállóságú, hőre lágyuló polimerek standard erősítőanyagainak számítanak.

Az **Eurotec** 30%-ban üvegszállal erősített PA66 polimere kifejezetten magas hőnek kitett motoralkatrészek, mint légbeszívó rendszerek, alváz egységek, sebességváltóházak vagy üzemanyag-ellátó rendszerek alkatrészeinek gyártásához készült. A PPA (poliftalamid), PPS (poli(fenilén-szulfid)) és PEEK polimerek általában gyújtásrendszerekben, érzékelőkben, elektronikus rendszerek aljzataiban és tekercseiben használhatók. A mechanikai és elektromos tulajdonságok, a méretstabilitás megőrzése létfontosságú a folyamatosan magas hőmérsékleten működő alkatrészeknél. A PESU-alapú (poli(éter-szulfon)) polimerek méretstabilitását vagy elektromos szigetelőképességét rotoroknál és zárósapkáknál használják ki. Mivel az elektromos járművek gyártói 800 V-os vagy magasabb feszültségű rendszereket fejlesztenek, az új előírások megkövetelik, hogy az akkumulátor alkatrészek akár az 1000 °C-os hőmérsékletnek is ellenálljanak. Számos jelenlegi, nagy hőállóságú, hőre lágyuló műanyag már nem képes biztosítani a szükséges hőstabilitást és integritást az ilyen igénybevételnél működő alkatrészek számára.

Az **Ascend Performance Materials** szabadalmaztatott PA66 égésgátolt polimere (*Starflam X-Protect*) az autóiparban kulcsfontosságú anyag a hőinstabilitás, vagy más néven termikus megfutas kezelésében a biztonság és a teljesítmény növelése mellett. Jellemző alkalmazási területei a különböző modulok, nagyfeszültségű szigetelők, szerkezeti elemek, szellőzőnyílások és nyomáscsökkentő szelepek. Az alkatrészek hőállósága extrém nagy, jóval túlszárnyalva a hagyományos égésgátolt műszaki termoplasztokét, és mechanikai stabilitást biztosítanak a standard PA66 olvadáspontja feletti hőmérsékleten is. A töltetlen, az üveg és üveg/ásványi töltésű típusok mindegyike 960 °C-os izzóhuzalos gyúlékonysági indexszel, valamint 0,8 mm falvastagság mellett UL94 V-0 besorolással rendelkezik. Az 1100 °C-on végzett közvetlen lángexpozíciós vizsgálatok során a *Starflam X-Protect* 3 mm falvastagságú öntött mintái ellenálltak a vizsgálat teljes 15 perces időtartamának, szemben a 3 mm-es alumínium rövidebb mintái 4 perces és a 3 mm-es standard PA66 rövidebb mintái 3 perces teljesítményével. A megnövelt integritása hasznos olyan alkalmazásokban, ahol ívképződés fordulhat elő. Az *X-Protect* folyóképessége jó a fröccsöntéshez, hasonló a standard poliamidokhoz, élénk árnyalatokban, például narancssárga színben is színezhető. Esztétikus felületű, kopásállósága és ultrahangos hegesztési szilárdsága jobb a hagyományos PA66-nál. Emellett az anyag újrahasznosítható.

A **Kuraray Genestar** poliftalamidja (PPA) jó vegyszerállóságú és kicsi a nedvességmegkötése, ezért ideális hűtőfolyadék-szabályozó szelepekhez és hőelvezető alkatrészekhez. Mivel a zajcsökkentés fontos

az elektromos járműveknél, a *Genestar* portfólióban erősítetlen típusok is találhatóak nagy méretstabilitással és jó kopásállósággal. A *Genestar HB* és *V-0* minőségű típusai 950 V feszültségnek is ellenállnak 30 kV/mm körüli dielektromos szilárdsággal. A tulajdonságok csak kis mértékben romlanak kondicionálás (nagy nedvességtartalom, magas hőmérséklet) hatására a többi PPA és PA polimerrel összehasonlítva, így nagyfeszültségű (csatlakozó) modulokban alkalmazhatók.

Nagy hőmérsékleti igénybevételnél LCP polimereket, például **Celanese Vectra** és **Zenite** típusokat is használnak. A mobil adatátvitel területén a 4G-ről (15 MB/sec) az 5G-re (1–10 GB/sec) való áttérésnél rendkívül robusztus anyagokra van szükség a megbízható kapcsolat biztosításához. A kritikus műszaki követelmények közé tartozik az alacsony nedvességfelvétel, a megbízható adatátvitelt lehetővé tevő konzisztens  $Dk/Df$  (dielektromos állandó/disszipációs tényező) értékek és a magas hőmérsékletek kezelése. Ezek a típusok 340 °C-ra növelik a HDT-t (terhelés alatti behajlás hőmérséklete), így akár négy percig is ellenállnak az ólommentes forrasztásnak 260 °C-on.

A **Lati** cég speciális, PA9T-alapú polimerei (*Laramid T*) kiemelkedő hőteljesítménye jó kompaundálhatósággal, könnyű fröccsönthetőséggel és versenyképes ár-teljesítmény aránnyal párosul. Megbízható mechanikai teljesítményt nyújtanak akár 150 °C-os folyamatos használati hőmérsékletig, ami számos területen kritikus küszöbérték, lehetővé téve, hogy a PA9T versenyképes legyen más PPA és PPS polimerekkel szemben az autóiparban, az energiagazdálkodásban, az elektronikus és elektromos eszközökben. Az alappolimer közel 130 °C-os üvegesedési hőmérsékletének köszönhetően a PA9T olyan területeken használható, ahol a hőfelhalmozódás valódi probléma. A polimer 290 és 310 °C között olvad, ami azt jelenti, hogy átalakulási ablaka hasonló a többi PPA és PPS polimeréhez. Nagyon szűk méretű, komplex, vékonyfalú geometriák fröccsöntésére alkalmas. Üveg- és szénszállal erősített kompaundjai szerkezeti, hő- és elektromosan vezető, valamint önkény alkalmazásokban használhatók.

A hagyományos PPA polimerekhez képest, a hasonló olvadáspontú *EMS-Grivory HT6* üvegesedési hőmérséklete 20 °C-kal magasabb. Előnye a jelentősen megnövelt teherbírás magas hőmérsékleten. A HDT/C értéke 250 °C, ami 20 °C-kal több, mint a PEEK polimereké. Rendkívüli kúszásszilárdságának köszönhetően, a HT6 nemcsak magas üzemi hőmérsékleten működő alkatrészekhez alkalmas, hanem bárhol, ahol a legmagasabb követelményeket támasztják a méretstabilitással és az élettartammal szemben. Vékonyfalú alkatrészek tervezésére is használható, így csökkenti a gyártási költségeket.

Az optoelektronika egy másik olyan terület, amely gyakran szükségessé teszi a nagy hőállóságú polimerek használatát. A hőre lágyuló poliimid és a nagyon kis hőtágulási képességű poliéterimid (PEI) jól alkalmazható optikai adó-vevők fröccsöntött lencséihez. A poliimid ellenáll az újraolvasztó lágyforrasztás 260 °C-os csúcshőmérsékletének, miközben megőrzi a komplex, miniatürizált lencsénél szükséges méretstabilitást, a nagyon kis hőtágulási együtthatójú poliéterimid pedig a kollimátor lencsék méretstabilitásának növelésében játszik kulcsszerepet. További jellemzőjük a tervezési rugalmasság, a közeli infravörös átlátszóság, a rendkívül magas hőmérsékleti ellenállás és a kiváló feldolgozhatóság, amellyel javítják az adatátvitel sáv szélesség-kapacitását és energiahatékonyságát.

A **SABIC** speciális *LNP Konduit* kompaundja megfelel a kettős adatsebességű, memória-integrált áramkörök stresszvizsgálatára használt tesztaljakatok szigorú követelményeinek. Az anyag kiváló folyóképessége megkönnyíti a komplex, miniatürizált tesztaljakatok kialakítását, kiváló méretstabilitást és nagy hőállóságot nyújt, az akár 4,5 W/(m·K) hővezetőképesség értéke pedig gyors hőelvezetést biztosít. A 150 °C-os hőállóság lehetővé teszi az aljakatok ismételt felhasználását degradáció nélkül, de az *LNP Konduit* akár 260 °C-nak is ellenáll.

A megújuló energiára való áttérés előtérbe helyezi a „zöld” hidrogén előállítását és felhasználását. A nagy tisztaság a polimerek alkalmazásakor általános követelmény, különösen az üzemanyagcellák vagy az elektrolízálók kulcsfontosságú alkatrészeinél, ahol további követelmények vonatkoznak a kémiai-, a hő- és mechanikai ellenállásra. Ezekben az alkalmazásokban a polimerek gyakran érintkeznek különösen agresszív közegekkel, például ioncserélt vízzel vagy hűtőközegekkel, mint a víz-glikol keverék. A **Mocom** kifejezetten erre az alkalmazási területre fejlesztette ki az üvegszállal megerősített *Tedur* PPS kompaundjait, amelyek nagy vegyszerállósággal, termikus és mechanikai stabilitással, valamint hosszú

üzemidő alatt alacsony ionszivárgással rendelkeznek. Kiemelkedő tulajdonságaik még a kis kúszás magas hőmérsékleten. Felhasználhatók az üzemanyagcellák portelosztóiban vagy vezetékkötegek zárófedeleiben. Keresettek az üzemanyagcellák zárt hűtési köreibe, ezek a rendszerek 135 °C-nak is ellenállnak.

### Elektromobilitás

Az akkumulátoros elektromos járművek hatótávolságának növelése és az akkumulátor töltési idejének csökkentése érdekében az autóiipari OEM-ek és beszállítók 800 és 1200 V közötti nagyfeszültségű rendszereket alkalmaznak. Ezek a rendszerek speciális szigetelőanyagokat igényelnek, hogy megfeleljenek a nagyfeszültségű tartomány magas követelményeinek. A **Solvay KetaSpire** PEEK polimeréből készült mágneshuzal-szigetelés ellenáll a nagyfeszültségű környezetnek, ahol a részleges kisülés jellemző kezdeti feszültsége 1600–1700 V 150 µm-en. Ezenkívül a PEEK használatával nő a nagyfeszültségű rendszerek hatékonysága is.

A **Solvay Xydar** nagy hőállóságú és égésgátolt folyadékkristályos polimere (LCP) megfelel az elektromos jármű akkumulátor alkatrészek biztonsági, hőállósági és szigetelési követelményeinek. Ahogy az autógyártók 400-ról 800 V-ra váltanak a következő generációs elektromos járművekben, az új európai, kínai és amerikai szabályozások megkövetelik, hogy az akkumulátor alkatrészek akár 15 percig is ellenálljanak a 300 és 1000 °C közötti hőmérsékletnek. Az anyagoktól elvárják, hogy az elektromos szigetelés védelme elegendő időt biztosítson az utasok számára a jármű elhagyásához hőinstabilitás esetén. Ez az LCP a biztonságot kivételes feldolgozhatósággal ötvözi. Az üveggel töltött LCP 400 °C-on 30 percig képes megtartani elektromos szigetelését. Ez az eredendően égésgátolt polimer, halogén- vagy bróm-adalékok használata nélkül, kivételes folyóképességű, így az akkumulátor egységek szigetelései a lehető legvékonyabbra tervezhetők.

Az e-motorok tervezői számára továbbra is kihívás a megfelelő másodlagos szigetelések kiválasztása, amelyek tökéletesen tapadnak a PEEK mágneshuzalhoz és a PEEK résszigetelés anyagaihoz. Az **Epic Resins ProPreg E240** egykomponensű epoxigyantát kifejezetten a PEEK-hez való tapadás növelésére tervezték, miközben kompatibilis más általános szigetelőanyagokkal is, például poliamid-imiddel (PAI). A **ProPreg** képes csökkenteni a hőtágulási együtthatók különbségeit, amelyek a jelenleg használt törékeny poliészter gyanták meghibásodását eredményezték. Az epoxigyanta minimális változtatásokkal használható a csepegtetés elvén működő feldolgozó berendezésekben, illetve az anyag biztosítja a keményedési és feldolgozási idő csökkentését is.

A kereskedelemben is kaphatók már vezeték nélküli elektromos jármű töltőrendszerek. Ezek két egységből állnak, az egyik a vevő, amely az autó alvázához csatlakozik, a másik az átviteli egység, amelyet a földre szerelnek és az áramforráshoz csatlakoztatnak. Az átviteli egységnél halogénmentes, égésgátolt **Celanese Zytel HTN** polifitálamidből készült tartós ház védi a belső, vezeték nélküli töltőrendszert, megakadályozva az ütődés, az autókerék nyomás, a vegyi anyagok, az olajok és az UV-sugarak okozta károkat. A járműoldali tekeresház és a talajoldali tekerestartó is Zytel poliamid és polifitálamid felhasználásával készül.

### PEEK fogaskerekek

Számos műszaki alkalmazásban műanyagból készült fogaskerekek helyettesítik a klasszikus fém fogaskerekeket. Könnyebbek, csendesebbek, jó szárazfutási tulajdonságokkal, kis súrlódással és kopással rendelkeznek, gyártásuk hatékony. A műszaki műanyagból készült fogaskerekekhez képest a nagy teljesítményű PEEK fogaskerekek mechanikai, termikus és kémiai szempontból általában stabilabbak, ezért növelhető a terhelhetőségük.

A fogaskerék súrlódási és kopási viselkedése bonyolult módon függ az érintkezési helyeken fellépő feszültségtől és a működési környezettől. A fogaskerekekhez használt nagy teljesítményű polimerek fejlesztésekor a különböző mechanikai, termikus és tribológiai követelményeket a lehető legnagyobb mértékben össze kell hangolni, a fellépő igénybevételtől függően. Bizonyos fontos módosítások antagonisztikus

hatással lehetnek a fogaskerék viselkedésére. Például a jobb kopásvédelmet vagy a csökkentett súrlódást szolgáló adalékanyagok negatív hatással vannak a fogaskerék dinamikus-mechanikai viselkedésére az adalék tulajdonságaitól és a műanyag mátrixhoz való kötési lehetőségektől függően, ha hiba- vagy repedésgócot hoznak létre. A polioximetilén (POM), PA6 vagy PA66 műszaki műanyagokkal összehasonlítva, a nagy teljesítményű PEEK számos előnnyel rendelkezik, mint fogaskerék alapanyag. Különösen magas hőmérsékleten is nagy terheléseket képes átadni. A gyakorlatilag elhanyagolható vízfelvétel és a kismértékű zsugorodás miatt a fröccsöntött alkatrészek nagyon méretstabilak, a molekuláris szerkezet pedig kivételesen ellenállóvá teszi vegyi anyagokkal szemben. Ez a tulajdonság még fontosabb, ha a fogaskerekeket motor- vagy sebességváltó-olajokkal kenik, ami sok műanyag számára agresszív környezet.

A PEEK nagyon nagy mechanikai- és hőstabilitása sok más műszaki műanyaghoz képest kifizetődik a fogaskerekeknél. További előnyei közé tartoznak a nagyon jó tribológiai tulajdonságok, különösen a kis kopási és súrlódási együtthatók. Ez utóbbi energiamegtakarítást eredményez mind szárazonfutás, mind kenhető körülmények között. A PEEK viszkoelasztikus viselkedése és az ezzel járó jó csillapító hatás a zajcsökkentésben játszik szerepet. A csendes sebességváltók egyre fontosabbá válnak, különösen az elektromos járművekben, mivel ezeknél nincs a belső égésű motorokra jellemző zaj. A zsírkenésű spirális hajtóműben a PEEK-acél érintkezés drasztikusan csökkenti a levegőben terjedő zajt, egyes esetekben több mint 10 dB-lel. A fogaskerekek fröccsöntése költséghatékony és pontos, ez kiküszöböli a fémeknél szükséges utómegmunkálást. A vezetés közbeni kisebb tömegű tehetetlenségi nyomaték energiát takarít meg, nagyon sima futást és alacsony zajszintet eredményez.

Összeállította: dr. Lehoczki László

Vogel, J.: Beyond PEEK: High-temperature injection molding solutions with PAEK Plastics, <https://www.kaysun.com/blog/peek-material-high-temperature-injection-molding>

Saunders, C.: Coping with the heat = Injection World, 4. sz. 2023. pp. 46–50.

Baleno, B.; Smith, D.; Shaikh, M. Q.; Brown, K.; Southworth, J.: Partner for PEEK = Kunststoffe International, 2. sz. 2022. p. 18–20.

Getting to the heart of wheels = Kunststoffe International, 5. sz. 2022. pp. 58–61.