

## Tömítések áteresztőképessége

*Tárgyszavak: autógyártás; műszaki követelmények; permeáció; üzemanyag-emisszió; mérési módszer; áteresztés csökkentése.*

### Szigorodó előírások

*Áteresztésnek vagy permeációnak nevezik azt a folyamatot, amelynek révén egy gáz vagy egy folyadék átjut egy pórusmentes szilárd anyagon. Számos műszaki alkalmazásban, pl. a tömítéseknel fontos szerepet játszik az áteresztőképesség. Mivel mind a műszaki követelmények, mind a környezetvédelmi és biztonsági előírások folyamatosan szigorodnak, az anyagok záróképességével szemben támasztott igények is egyre növekednek. Három példa a követelmények szigorodására:*

- az USA-ban a gépkocsikból kijutó szénhidrogénekre vonatkozó előírások („kis emissziójú” és „zéró emissziójú” gépkocsik) új tömítési elvek kidolgozását teszik szükségessé,
- a gépkocsik klímaberendezésében egyre inkább a szén-dioxidot használják hűtőközegként, ami – tekintettel a CO<sub>2</sub> elasztomerekben való jó oldhatóságára és a széles hőmérséklet-tartományban működő tömítésekre – igen nagy követelményeket támaszt a tömítésekkel szemben,
- a nyomástartók membránjainak beépítéséhez egyre kevesebb hely áll rendelkezésre, mert egyre kisebb a gáztérfogat – ez is egyre nagyobb követelmények elé állítja a tömítéseket.

### A permációs folyamat jellemzői

*A permeációs folyamat alapvetően három lépcsőből áll: a molekula először adszorbeálódik az egyik oldalon, átdiffundál az anyagon, majd deszorbeálódik a másik oldalon. A sorba kapcsolt folyamatok közül általában a diffúzió határozza meg az áthatolás sebességét. Az anyagáram függ a diffundáló anyag koncentrációgradiensétől, ami gázok esetében a parciális ( $\Delta p$ ) nyomáskülönbséggel arányos a tömítés két oldala között. Feltételezve, hogy érvényes a Henry törvény, vagyis:*

$$c = S * p,$$

ahol  $c$  a koncentráció,

$S$  az oldhatóság ill. szorpciós együttható,

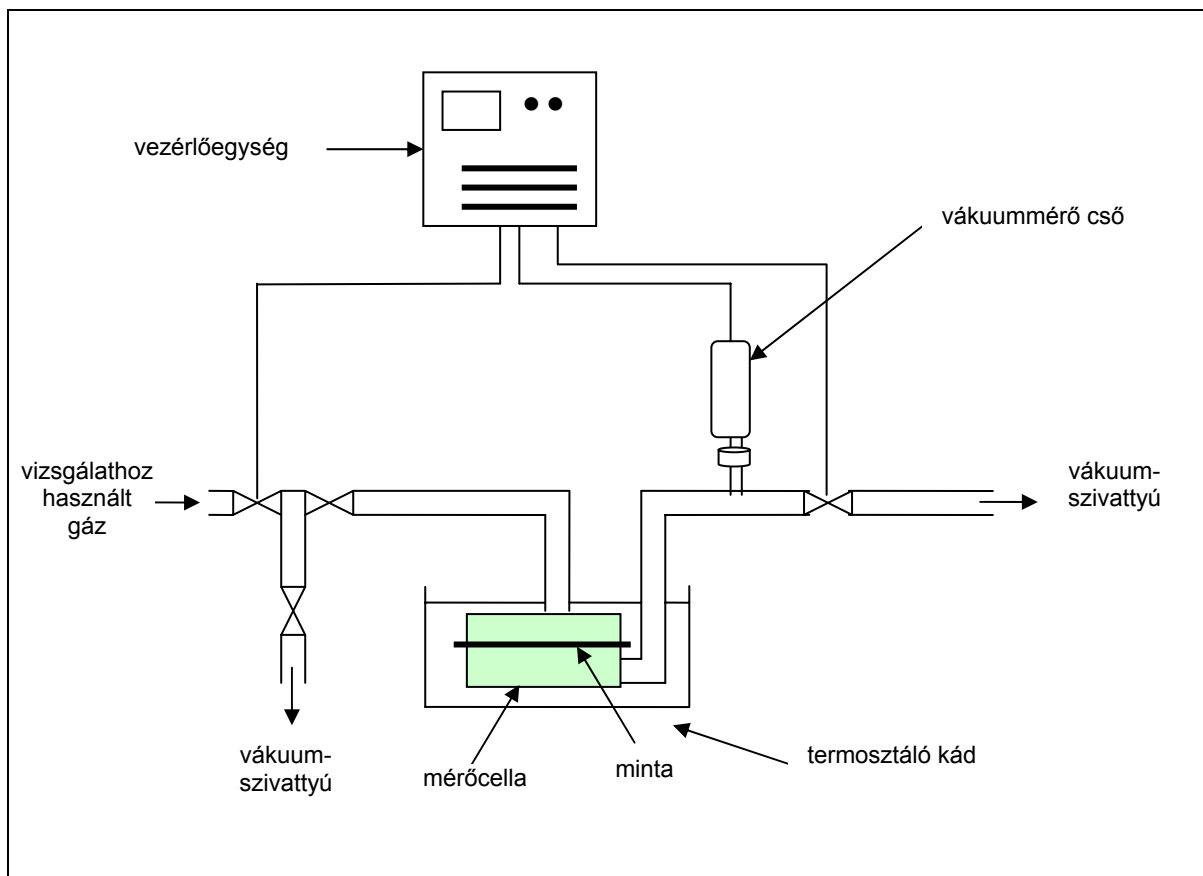
$p$  a parciális nyomás,

kiszámítható a koncentráció, ill. a koncentrációcsökkenés a minta két oldala között. Az áteresztőképességet (permeabilitás, permeációs együttható, jele  $P$ ) az alábbi módon definiálják:

$$P = S * D,$$

ahol  $S$  a szorpciós,

$D$  a diffúziós együttható.

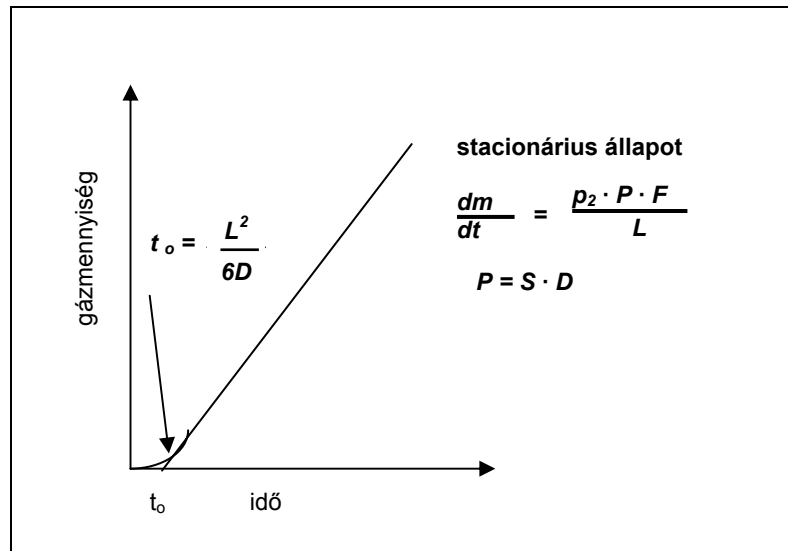


1. ábra Az áteresztőképesség méréséhez használt berendezés működési elve

## Az áteresztőképesség mérése

A tömítőanyagok jellemzéséhez és továbbfejlesztéséhez jó mérési módszerekre van szükség. A permeáció mérésre használt berendezés vázlatát az 1. ábra mutatja. A mérőcellát a mérendő minta osztja két részre, amelynek

egyik felén vákuumot hoznak létre, a másikat megtöltik a meghatározott nyomású mérendő gázzal. Az evakuált oldalon mérve a nyomás időfüggését, kiszámítható az átteresztőképesség (2. ábra). A mérés kezdetétől a lineáris nyomásnövekedés beállásáig eltelt időből ki lehet számítani a gáz diffúziós együtthatóját az anyagban, a nyomásnövekedés meredekségéből pedig a permeációs együtthatót.



2. ábra Az átteresztőképességi mérés kiértékelése

A permeációs együtthatót meg lehet pl. adni a következő egységben

$$P = \frac{\text{cm}^3(\text{NTP}) \cdot \text{mm}}{\text{mm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}}$$

*P érték azt a gázmennyiséget adja meg (térfogategységben, NTP, azaz normál hőmérséklet és nyomásviszonyok mellett), amely 1 mm<sup>2</sup>-s felületen, 1 mm vastag mintán keresztül, 1 óra alatt, 1 bar nyomáskülönbség esetén hatol át.*

Folyadékok áthatolásának mérésére több módszer is rendelkezésre áll. A DIN 53 532 szabvány gravimetriás módszert ír le. A folyadékot olyan edénybe töltik, amelynek alját a tömítőanyaggal zárják le, majd az idő függvényében mérik az edény tömegvesztését. A folyadékátertesztés:

$$[FP] = \frac{g}{m^2 \cdot h}$$

Ez a módszer nem alkalmazható olyan rendszerekre, ahol az átteresztőképesség kicsi (<0,5 g/m<sup>2</sup> · h), mert itt nagyon hosszú ideig tart (>1000 óra) a tömegvesztés sebességének meghatározása. Az ilyen rendszerekre érzéke-

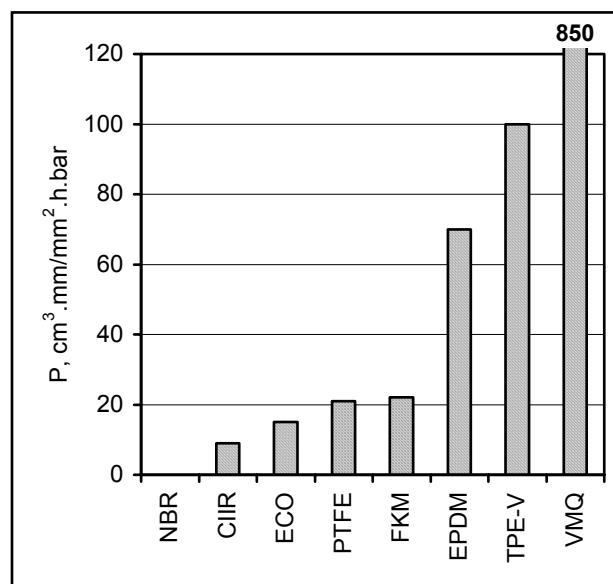
nyebb módszert fejlesztettek ki, amelynek lényege, hogy az átdiffundáló molekulákat tömegspektrométerrel mutatják ki argon gázáramban. A módszer előnye, hogy egy anyagkeverék (pl. üzemanyag) komponenseire egyenként, egy mérésben is meg lehet határozni a permeációs együtthatókat. Ezzel a berendezéssel már  $>0,01 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  áteresztőképességű rendszerek is vizsgálhatók.

## Az alapanyagok tulajdonságainak hatása az áteresztőképességre

Az elasztomerek áteresztőképességét meghatározó főbb tényezők a következők:

- a polimer típusa
- a hőmérséklet
- a használt töltőanyag típusa és mennyisége,
- az áteresztendő közeg.

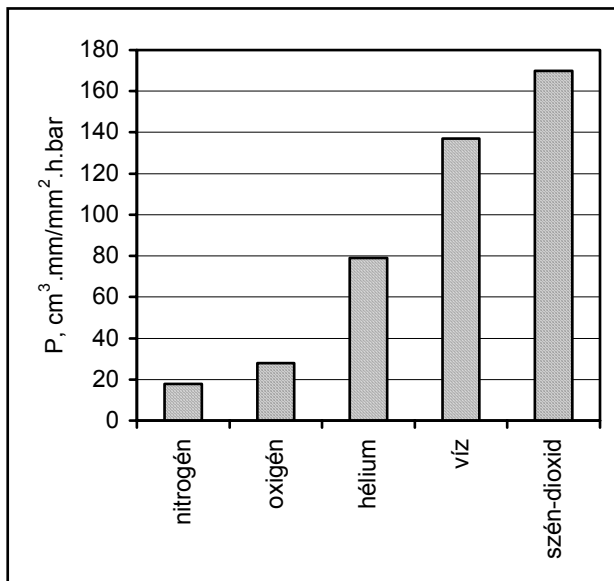
Ezekre a tényezőkre mutat néhány példát a 3–6. ábra. Az elasztomerek rövid jele és kémiai neve az 1. táblázatban található.



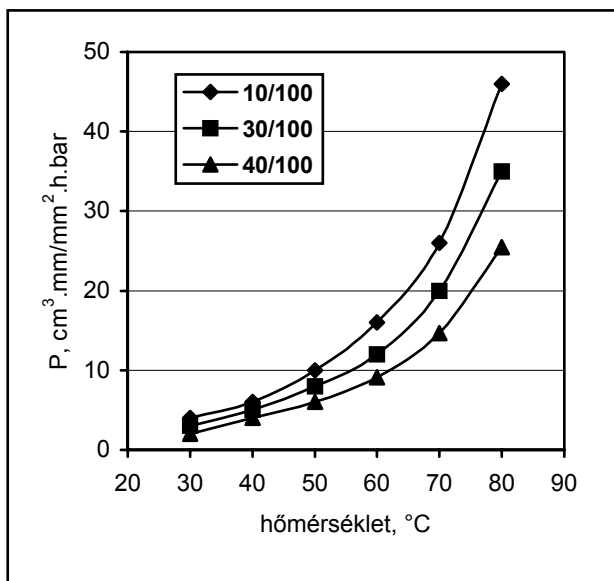
3. ábra Az alappolimer hatása az áteresztőképességre  
(Vizsgált gáz: nitrogén, hőmérséklet: 80 °C)

*A polimer típusa döntő hatással van az áteresztőképességre. Itt lényegében a polimerlánc mozgékonyasága a döntő, mert minél mozgékonyabb a lánc, annál könnyebben jutnak át az anyagon a gáz- és folyadékmolekulák. A láncmozgékonyaság határozza meg az üvegesedési hőmérsékletet is: minél kisebb a mozgékonyaság, annál magasabb az üvegesedési hőmérséklet, ami alatt már*

nem lehet elasztomerként használni a tömítőanyagot. Nem csoda tehát, hogy összefüggés van az üvegesedési hőmérséklet és az átteresztőképesség között (7. ábra).



4. ábra  
Az áthatoló anyag hatása az átteresztőképességre (alapanyag: NBR, hőmérséklet: 80 °C)

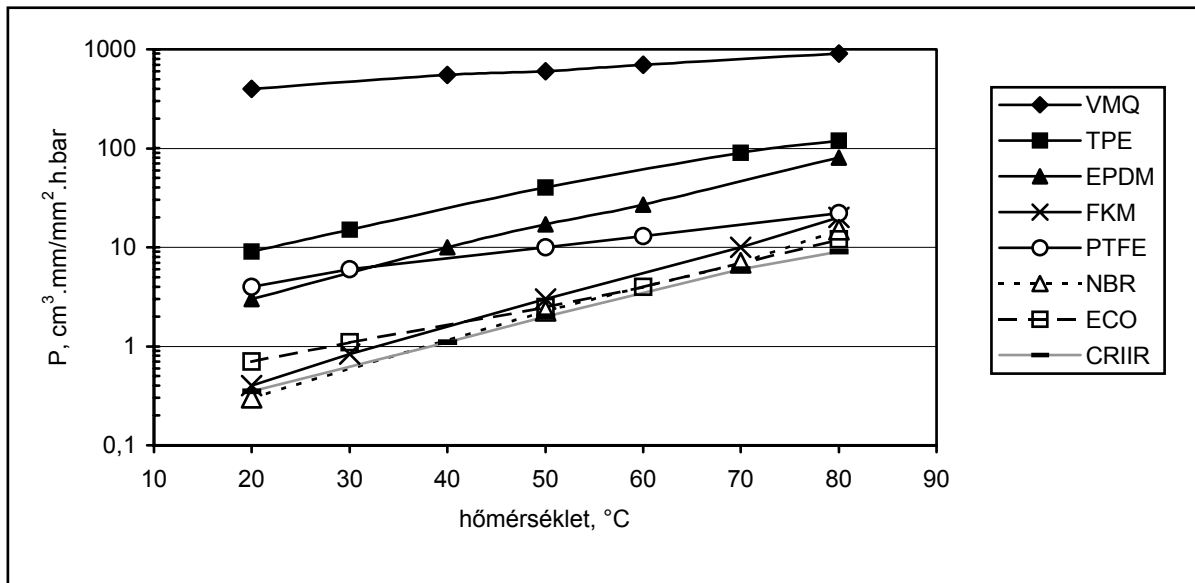


5. ábra  
A töltőanyag arányának hatása az átteresztőképességre a hőmérséklet függvényében (Alapanyag: HNBR, 10...40 rész töltőanyag 100 rész alappolimerre, hőmérséklet: 80 °C)

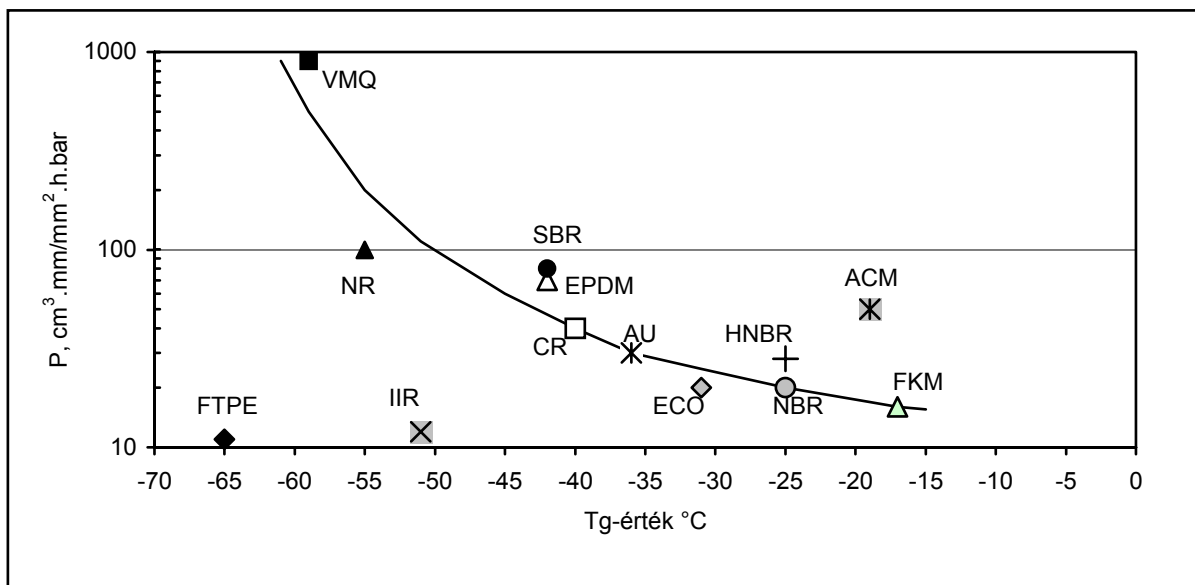
A permeációs együttható hőmérsékletfüggése is anyagonként változik. Inert gáz esetében általában az Arrhenius függvény alkalmazható:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right),$$

ahol  $E_A$  aktiválási energia (amely függ az elasztomer típusától),  
 $R$  gázállandó,  
 $T$  abszolút hőmérséklet.



6. ábra A hőmérséklet hatása a különböző alapanyagok átteresztőképességére (áthatoló gáz: nitrogén)



7. ábra Az üvegesedési hőmérséklet ( $T_g$ -érték) és az átteresztőképesség összefüggése

Nagy hatása lehet az alkalmazott töltőanyagoknak is, hiszen azok gyakorlatilag átjárhatatlanok a gázmolekulák számára. A permeabilitás csökken a töltött elasztomerekben, mert a gázmolekulák csak az elasztomermátrixban oldódnak – ezért megnő a diffúziós út – és mivel csökken a mátrix mennyisége, kevesebb gáz oldódik fel. Gömb alakú részecskék esetében a következő

összefüggés áll fenn a permeációs együttható és a töltőanyag térfogattörtje ( $\Phi_t$ ) valamint a polimer térfogattörtje ( $\Phi_p$ ) között:

$$P_{\text{tölt}} = P \frac{\Phi_p}{1 + 0,5\Phi_t}$$

1. táblázat

A tömítőanyagok polimerkomponensének rövid jele és kémiai elnevezése

Rövid jel	Kémiai elnevezés
ACM	akrilkaucsuk
AU	poliészter-uretán kaucsuk
CR	kloroprénkaucsuk
ECO	etilén-oxid-epiklórhidrin kaucsuk
EPDM	etilén-propilén-dién terpolimer
FKM	fluorkaucsuk
PTFE	poli(tetrafluor-etilén)
HNBR	hidrogénezett nitrilkaucsuk
IIR	butilkaucsuk (izobutilén és kevés izoprén kopolimerje)
NBR	nitrilkaucsuk (butadién + akrilnitril kopolimerje)
NR	természetes izoprénkaucsuk
SBR	sztírol-butadién kaucsuk
TPE	termoplasztikus elasztomer
TPE-V	természetes elasztomer vulkanizátum
VMQ	vinil-szilán kaucsuk

Természetesen a *diffundáló gáz minősége is befolyásolja az áteresztés mértékét*. A 4. ábrán jól látható, hogy a molekulaméret növekedésével csökken a permeációs együttható. Ez alól csak a szén-dioxid jelent kivételt, mert az nagyon jól oldódik az elasztomerekben.

## Az áteresztőképesség csökkentése bevonatokkal

*Bizonyos törvényi szabályok (pl. a zéró emisszió) vagy új alkalmazási területek (pl. ahol egyszerre van szükség kis áteresztőképességre és alacsony hőmérsékleten lehetséges alkalmazásra) új tömítési elvek kidolgozását teszik szükségessé. Megoldást jelenthet a többrétegű tömítés vagy a tömítésre készített funkcionális bevonat.*

Egyes esetekben a felületet lakkozzák – ezzel lehetővé válik a mechanikai és az átteresztési tulajdonságok egyidejű optimalizálása. *Fémbevonatok, erősen térhálósított felületi rétegek vagy laminált rétegek* [pl. poli(tetrafluor-etilén)] alkalmazásával ugyancsak jelentősen csökkenteni lehet az átteresztőképességet. Olajtömítésekhez pl. gyakran alkalmaznak bevonatokat. Ha az olaj üzemanyaggal keveredik, az rendszerint megnöveli a tömítés átteresztőképességét. Ez a jelenség megnehezíti a zéró emissziós szabvány betartását, ezért ilyen esetben célszerű a tömítést funkcionális bevonattal ellátni. *Fémbevonattal annyira lecsökken a tömítés átteresztőképessége, hogy még a gázkromatográfiában alkalmazott, igen érzékeny lángionizációs detektorral sem lehet kimutatni a vivőgázban a szerves komponensek jelenlétét.*

A funkcionális bevonatok alkalmazása javasolható akkor is, ha kis átteresztőképességű, de alacsony hőmérsékleten is rugalmas elasztomerből készült tömítésre van szükség. A funkcionális bevonatok alkalmazása jelentősen kibővítheti az elasztomertömítések alkalmazási területét.

## **A végeelem-módszer alkalmazása tömítések tervezésénél**

A gyógyszer- és élelmiszeriparban alkalmazott tömítéseknek sokféle vegyszernek kell ellenállniuk, beleértve erős lúgokat és savakat, amelyeket a berendezések tisztításához használnak. A nyomás- és hőmérsékletviszonyok, valamint a statikus és dinamikus terhelések mind más-más anyagokat, ill. formákat kívánnak. A higiéniai alkalmazásokban különleges tervezési követelmények lépnek fel az elszennyeződés, a baktériumfertőzések elkerülése érdekében.

A tervezéskor ma is sokszor az empirikus „próba-hiba” módszert alkalmazzák. A tervező gyakran kész (néha hibás) rajzot kap, amelyhez kiválasztja a szerinte legjobb anyagot, elkészül a prototípus rajza, majd ehhez szerszámot gyártanak. A prototípust a vevő kipróbálja, majd egy iteratív folyamatban a tervező és az alkalmazó együtt igyekeznek javítani a tömítés tulajdonságait. Ez több szerszám előállításával és főként sok idővel jár – gyakran hetekbe telik egy új tömítés kialakítása.

*A végeelemes-módszer (FE) alkalmazása lényegesen lerövidíti a fejlesztés idejét, hetekről akár napokra.* A műszaki rajzok (vagy még inkább CAD-fájlok) birtokában az FE program kétdimenziós reprezentációt készít a tömítendő résről, amelyre automatikusan végeelemes hálót fektet, és elvégzi annak nemlineáris analízisét. A tervező a számítógépen kipróbálhatja a különféle tömítőprofilokat, vizsgálhatja a gumi keménységének a hatását. Az eredményeket grafikus felületen tanulmányozhatja keresztmetszetek, nyomás-görbék stb. formájában. A szimulált viselkedéssel bonyolult alakok is vizsgálhatók, amelyekre a tömítőerő számítása manuálisan vagy intuitív módszerekkel majdnem lehetetlen lenne. A szimulációs program a tömítőerőt a nyomás



függvényében ábrázolja. A program pirossal jelöli azokat a területeket, ahol nagy valószínűséggel lehet számítani a tömítés tönkremenetelére. Ezek az ábrák segítik a tervezőt az olyan keresztmetszet kialakításában, amelyben a feszültségek egyenletesen oszlanak el, és nem egy-egy helyen koncentrálnak. Így akár fél óra alatt fel lehet vázolni egy új tömítést és „mi volna-ha” szituációkkal meg lehet vizsgálni annak viselkedését különböző feltételek között. A számítógépes vizsgálat a fájlok cseréje révén meggyorsítja és intenzívebbé teszi a fejlesztő és az alkalmazó együttműködését is.

## **A gyenge helyek kiküszöbölése FE programokkal**

Egy üzemben nagy viszkozitású folyadékok továbbításához gyorscsatlósú szelepeket használtak, és ezeknél tömítetlenséget észleltek. Egy belső rugókkal ellátott poli(tetrafluor-etilén) (PTFE) tömítést alkalmaztak, amivel kelően rugalmassá tették a rendszert. A hibás konstrukció miatt azonban kopás lépett fel, ami hibás szelepműködést eredményezett. A tömítés FE vizsgálata kimutatta, hogy a fémrugót célszerűbb egy másik perfluorelasztomerből készíteni, és akkor kisebb a súrlódás a szerkezet belseje és felülete között.

A végeselemes számítások jól beilleszthetők a tervezési és a gyártási folyamatba. A számításnál kapott IGES fájlokat közvetlenül be lehet táplálni a gyártóberendezésekbe. Ez jelentősen meggyorsítja a szerszámgyártást is.

**Dr. Bánhegyi György**

Beck, K., Kreiselmaier, R., stb.: Permeation durch elastomere Dichtungwerkstoffe, Grundlagen – Werkstoffeigenschaften – Entwicklungstrends. = Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, 56. k. 12. sz. 2003. p. 657–660.

Holt, D.: Schneller zum besseren Produkt. = Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, 56. k. 12. sz. 2003. p. 636–637.

## **Röviden...**

### **A müncheni repülőtér áttetsző teteje**

A müncheni repülőtér várócsarnokának teteje fluorpolimerrel (Dyneon) bevont üvegszálalás áttetsző etilén/tetrafluor-etilén (ETFE) membránból készült. Az alapfólia (gyártja Koch Membranen, Rimsting) a fény 95%-át engedi át, a felvitt borítóréteggel ez az érték 10%-ra csökken. A bevonat magas felületi feszültsége következtében taszítja a szennyezést, így a természetes esőzés elegendő a tisztántartásához. A kifeszített membrán 90 m-es távolságot hidal át, és úgy néz ki, mint egy „felfújtt párnákból álló rácsozat”.

*(European Plastics News, 31. k. 1. sz. 2004. p. 34.)*

## **Az extruderhenger felületi keményítése**

A Berstorff cégnél a ZE UTX jelű kétcsigás extruderek hengerének felületi keménységét indukciós eljárással növelik. Ez a módszer gazdaságosabb, mint a hagyományos kopásálló bélés készítése. További előny, hogy megnő a henger élettartama, és mivel csökken a távolság az anyag és a hűtőfurat között, pontosabbá válik a hőmérséklet-szabályozás. Az örvényáramot generáló induktor, hasonlóan a furathoz, nyolcas alakú. Bizonyos mélységekig helyi melegedés lép fel. A folyamat végén szabályozott hűtést alkalmaznak. Az Ultra Torque (UTX) extrudertípusból a ZE 40A-tól a ZE75A-ig terjedő mérettartományba eső extruderek készülhetnek az újfajta hengerrel.

Az együttforgó csigás ZE40A-ZE150A UTX extrudereket szárítatlan PET (max. 5000 ppm, azaz 0,5% nedvességtartalmú) feldolgozására ajánlják. A cég szerint a PET feldolgozáshoz az egycsigásnál alkalmasabbak a kétcsigás extruderek, mert megtakarítható az anyag szárítása és nem csökken a belső viszkozitása sem. Ez azt jelenti, hogy a polimer nem kristályosodik át, nem agglomerálódik, és könnyebben adagolható a segédanyagok és töltőanyagok is.

*(European Plastics News, 31. k. 1. sz. 2004. p. 39.)*

## **PEEK és fluorpolimer kötése egymással**

A Precision Polymer Engineering cég fluorpolimer és PEEK egyesítésére dolgozott ki egy új eljárást, amellyel az eddigieknél háromszor erősebb kötést lehet létrehozni. Az elasztomerek tapadását a PEEK-hez általában savas maratással vagy plazmakezeléssel növelik, a kezelt felületeket epoxigyantával ragasztják össze. Az ilyen módon elérhető kötési szilárdság kb. 1400 N, míg az új felületkezeléssel 4000 N-nál nagyobb értéket is kaptak. Az elvégzett laboratóriumi vizsgálatok szerint a felületek szétválása előtt a PEEK meggyúlik. A termelékenység emelése mellett (rövidebb holtidő) a nagyobb kötési szilárdság révén a kötés élettartama is meghosszabbodik.

*(European Plastics News, 31. k. 1. sz. 2004. p. 34.)*