

Elasztomerek szélsőséges körülmények között

Az elasztomereket egyre szigorúbb, szélsőséges körülmények között alkalmazzák. Egyik ilyen alkalmazási terület a gépkocsik motortere, ahol növekszik a beépítés sűrűsége, emiatt a gumifélékből előállított tömítések, tömlők, vezetékek egyre magasabb hőmérsékletnek vannak kitéve, amelyen nem csak funkciójukat kell betölteni, hanem hosszú élettartamot is elvárnak tőlük. Az elasztomergyártók újabb és újabb típusokkal igyekeznek az igényeket kielégíteni. Egy másik extrém körülmények között dolgozó iparág az olajkitermelés, ahol a tömítéseknek nagyon magas nyomást, hőmérsékletet és vegyi hatást kell elviselniük. A hirtelen nyomáscsökkenés hatására a tömítések tönkremehetnek, ami üzemzavart és balesetet okozhat. Kutatások folynak annak felderítésére, hogy mi is történik egy hirtelen nyomáseséskor, és milyen okok vezethetnek ilyenkor a tömítés töréséhez.

Tárgyszavak: gépkocsigyártás; motortér; tömítés; tömlő; élettartam; hőállóság; akrilátelasztomer; olajipar; kompresszió/dekompresszió; vizsgálati módszer; HNBR; FKM.

Akrilátelasztomerek a gépkocsi motorterében

A gépkocsik egyre tömörebb motorterében az egyre fokozódó teljesítmény miatt egyre magasabb a hőmérséklet, emiatt az autógyártók az eddigieknél hőállóbb és a magas hőmérsékleten is hosszú élettartamú elasztomerekből szeretnék készíteni az ide beépített tömítéseket és tömlőket. A japán központú **Zeon** csoport, amelynek Japánban, Észak-Amerikában és Európában is van vállalata, az új évszázad elejétől már korábban is gyártott akrilátelasztomereinek (ACM elasztomerek) új, hőállóbb változatait (a *HT-ACM* elasztomerek márkaneve: *Nipol AR 12*, *Nipol AR 14*, *Nipol AR 22*) forgalmazza. Ezeket legkorábban a **Volkswagen** kezdte alkalmazni gépkocsijaiban. Az *ACM AR 12* kitűnő hőállóságú elasztomer, amely alacsony hőmérsékleten sem veszti el rugalmasságát. Az *ACM AR 14* hidegállósága még jobb. Az *ACR AR 22* hasonló az *ACM 12*-höz, de nagyobb a szakítószilárdsága.

Az akrilátelasztomereket különböző akrilátmonomerekből polimerizálják olyan csekély mennyiségű, funkciós csoportot tartalmazó komonomer jelenlétében, amely lehetővé teszi a térhálósítást (vulkanizálást). Leggyakoribb akrilátmonomerek az

- *etil-akrilát, EA*, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_3$,
- *n-butil-akrilát, BA*, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$,
- *2-metoxi-etil-akrilát, MEA*, $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_3$.

A kereskedelmi forgalomban kapható akrilátelasztomerek legtöbbje EA-alapú vagy a három alaptípus keveréke. A komonomer funkciós csoportja lehet epoxi-, klór- vagy duális klór/karboxilcsoport.

Az új HT-ACM elasztomerek első változatait fröccsöntésre szánták, és elsősorban fojtások, tömítések gyártására ajánlották. Már ezekből is sikerült azonban hőálló tömlőket extrudálni. A fröccsöntéshez és az extrudáláshoz ugyanazt a térhálósító rendszert alkalmazták. Az ezekből az elasztomerekből készített keverékek vulkanizációs ideje 4 perc volt, amit az extrudáláshoz túl rövidnek találtak. Emiatt ki kellett fejleszteni a ACM elasztomerek második generációját. Ennek eredménye az *ACM AR 12, 14, 22* és a még fejlesztés alatt álló *ACM-E*.

Az elasztomerek új generációjából az ACM AR 12 és 14 maradó összenyomódását és kompressziós feszültségrelaxációját hasonlították össze (utóbbit levegőben és olajban is) korábbi ACM elasztomerek, *AEM-G* és *ACM-GLS-etilén-akrilát* elasztomerek hasonló tulajdonságaival. Az elasztomerekből készített keverékek keménysége egyformán 60 Shore A volt. Az összehasonlításához használt régebbi típusok között volt az *ACM-72LS* és az *ACM-72HF*, amelyben klór a funkciós csoport, az *ACM-4065* (duális klór/karboxil funkciós csoport) és az *ACM-42W*, ill. *ACM-53L* (epoxics csoport).

Tömlőextrudáláshoz különböző összetételű keverékeket próbáltak ki, és ezeket különböző hőmérsékleten a különböző országokban rendszeresített referenciafolyadékokkal vizsgálták.

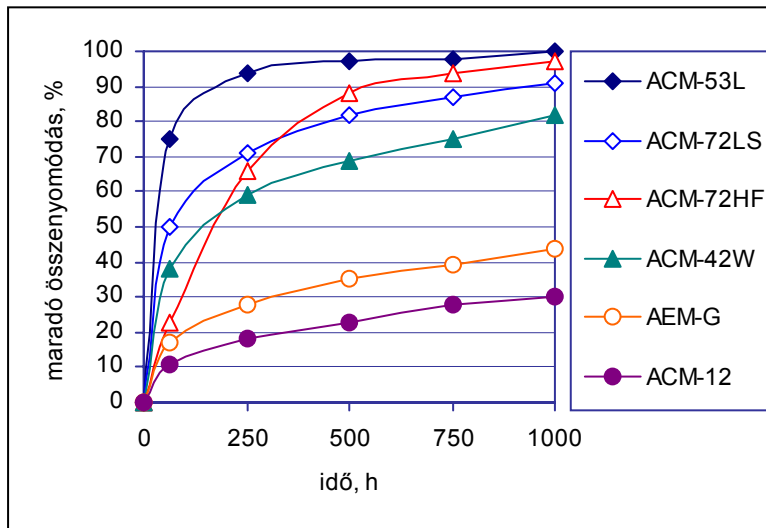
A keverékkészítéskor az adalékokból előzetesen belső keverőben mesterkeveréket készítettek, majd ezt hideg hengerszéken dolgozták össze az elasztomerrel. A térhálósítót a hengerlés végső szakaszában adták az anyaghoz. Vizsgálati próbatestek céljára 180 °C-on 10 percig lapokat sajtoltak, amelyeket 175 °C-os levegőcirkulációs szárítószekrényben négy óra hosszat utóvulkanizáltak. A maradó összenyomódás mérésére szánt lapokat 190 °C-on 6 percig sajtolták; az utóvulkanizálás azonos volt a többi lapéval.

A keverékek *Mooney viszkozitását* 102 és 125 °C-on ASTM D1646, *vulkanizációs jellemzőit* 180 °C-on ASTM D2084/ISO 3417, a *húzószilárdságot, szakadási nyúlást* ASTM D412/ISO 37, a *Shore A keménységet* ASTM D2240 szabvány szerint mérték. A levegőben végzett *hőöregítés utáni fizikai tulajdonságokat* ASTM D573/ISO 188, a *hidegállóságot* ASTM 1053, a *retrakciós hőmérsékletet* (TR-10 teszt, az az alacsony hőmérséklet, amelyen a 100%-ra megnyújtott próbatest szabadon 10%-kal alakul vissza) ASTM D1329 szabvány szerint határozták meg. A *maradó összenyomódást* az ASTM D395 szabványon kívül a VW házi módszerével (PV3307/VDA 675218) is vizsgálták. A *folyadékban bekövetkező öregedés* vizsgálatához az ASTM D471 szabvány előírásait alkalmazták.

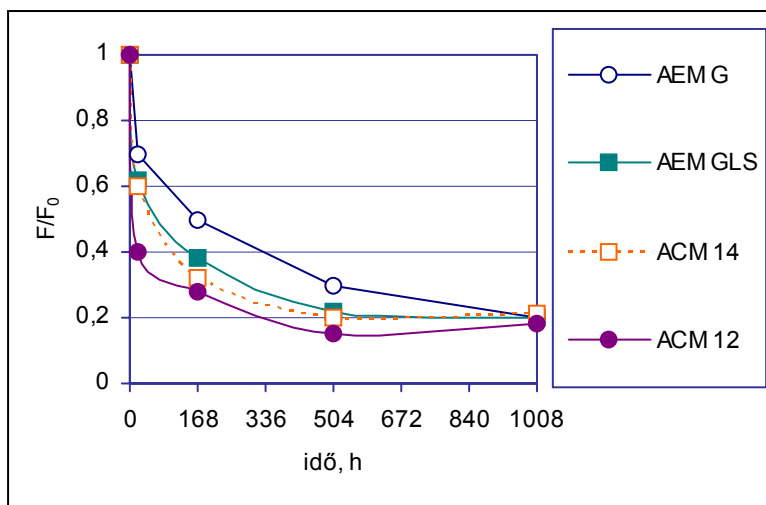
A tömítések vizsgálata

Tömítésekhez korábban használt receptúrákhoz hasonló összetételű keverékeket készítettek az új HT-ACM elasztomerekből és a korábban felsorolt régebbi típusokból.

Ezek maradó összenyomódását levegőben és motorolajban is mérték. A levegőben mért értékeket az 1. ábra mutatja. Mivel mind a régebbi, mind az új HT-ACM típusokban azonosak az alapmonomerek (EA, BA, MEA), az utóbbiak magas hőmérsékleten mutatott sokkal kisebb maradó összenyomódása a térhálósítás eredményének tekinthető. *Úgy tűnik, hogy a maradó összenyomódás és a vulkanizálás hatására létrejött új kémiai szerkezet között összefüggés van.*



1. ábra
A különböző akrilátalapú elastomerkeverékek maradó összenyomódása 175 °C-on az idő függvényében



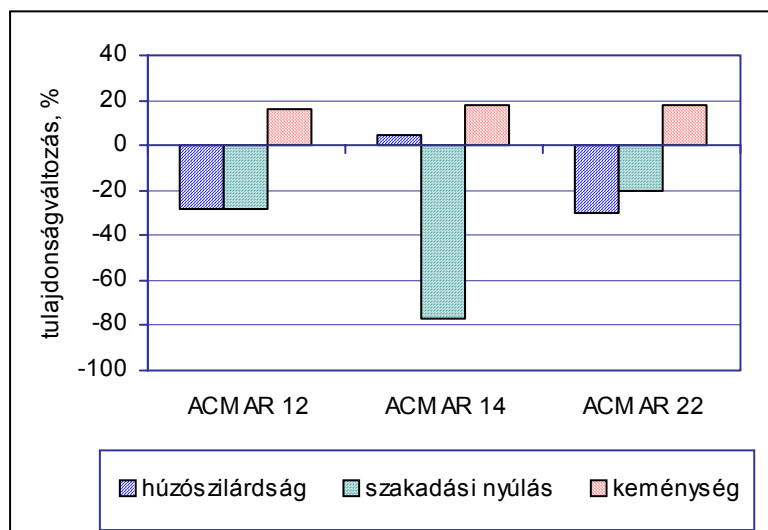
2. ábra
A különböző akrilátalapú elastomerkeverékek nyomófeszültségének relaxációja. (F = a jelzett időben mért nyomóerő, F₀ = az összenyomáshoz szükséges kezdeti erő.)

Mérték a nyomás alatti minta feszültségrelaxációját – az ún. CSR értéket – az idő függvényében, amely a fizikai relaxáció és a feszültség kombinációja. A különböző időben mért nyomóerők és a kezdeti nyomóerő hányadosának (F/F₀) időbeli lefutása nagyon hasonló volt (2. ábra). Ha azonban a 100%-os nyújtásnál fellépő feszültségek abszolút értékének változását hasonlították össze, a két HT-ACM mintánál ez 150 °C-on 1008 óra alatt 10%-kal, az AEM mintáknál kb. 40%-kal nőtt, ami az anyag kemé-

nyedésére utal, ez pedig a tömítéseknél hátrányos tulajdonság. A kisebb keményedés is igazolja a HT-ACM anyagok jobb hőállóságát.

Tömlők

Hogy elkerüljék az anyag bekötését az extruderben, tömlők céljára olyan keverékeket állítottak össze, amelyek térhálósodása 120 °C-on csak 8 percen túl indult meg. A várakozásnak megfelelően az ACM AR 22-vel készített tömlőknek volt a legnagyobb a húzószilárdsága, az ACM AR 12-vel készítetteknek pedig legkisebb a 150 °C-on és 175 °C-on mért maradó összenyomódása. 175 °C-on 504 óras hőregítés után mindhárom tömlőfajta még lényegében kielégítette a gépkocsikba beépíthető különféle tömlőkkel és levegővezetékekkel szembeni követelményeket. A 3. ábrából látható, hogy az ACM AR 12 és 22 alapú tömlők mechanikai tulajdonságai nagyon keveset változtak, az ACM AR 14 alapú tömlők – amelyek hidegállósága –40 °C körül van – szakadási nyúlása azonban erősen csökkent.



3. ábra
A HT-ACM típusokból extrudált tömlők mechanikai tulajdonságainak változása 175 °C-on végzett 504 óras hőregítés után

Az ACM AR 12 és 22 alapú tömlők azonban nem elégítették ki az autóipar hidegállósági követelményeit, amely legalább –35 °C-ot kíván meg. Ezért ebből a két elasztomertípusból lágyító (P) hozzáadásával, ill. ACM AR 14 hozzákeverésével készítettek újabb keverékeket és tömlőket, amelyeknek a hidegállósága is kifogástalan volt (1. táblázat).

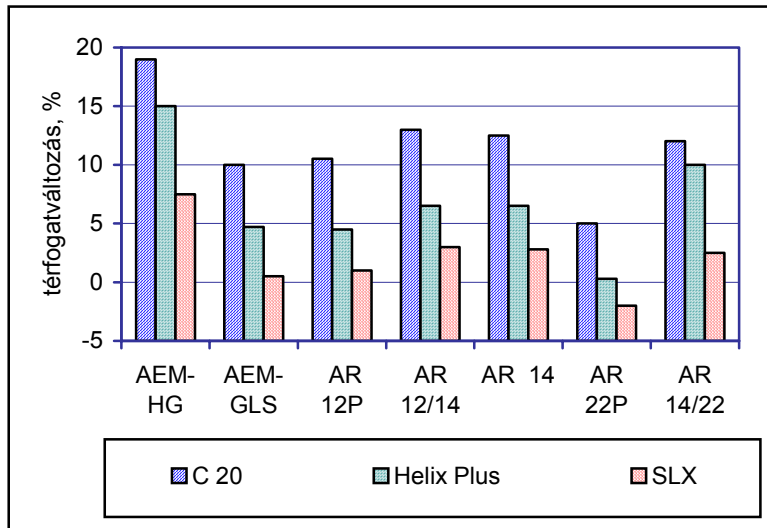
A tömlők hőregítését 150, 162 és 175 °C-on 504, 1008 és 1512 óra hosszat végezték, és az öregedés mértékét a szakadási nyúlással követték nyomon. Egy anyag rugalmasságát levegőben vagy folyadékban végzett öregedéskor gyakran 180°-os meghajlítással ellenőrzik; ha a próbatest eltörik, az anyagot már nem tekintik rugalmasnak. Számos elasztomernél megfigyelték, hogy ha az megőrzi eredeti szakadási nyúlásának 50%-át, akkor kiállja a hajlítási próbát is. Ha a szakadási nyúlás 50% alá csökken, hajlításkor az anyag általában eltörik. A HT-ACM alapú tömlőanyagok öre-

HT-ACM elasztomerekből készített tömlők néhány tulajdonsága

Tulajdonságok	Alapkeverékek			Módosított keverékek			
	AR 12	AR 14	AR 22	AR 12P	AR 12/14	AR 22P	AR 14/22
Mooney viszkozitás, ML (1+4) 100 °C-on	58	63	63	50	61	55	56
Utóvulkanizált minták mechanikai tulajdonságai öregítés előtt:							
Shore A keménység, fokozat	73	75	70	69	76	68	71
Feszültség 100%-os nyújtásnál, MPa	5,7	6,5	4,9	5,0	6,3	4,5	5,5
Húzófeszültség, MPa	11,1	10,7	11,7	10,5	10,8	10,4	11,6
Szakadási nyúlás, %	209	170	216	223	178	236	204
Maradó összenyomódás, % – 1008 h/150 °C	33	47	54	36	48	47	44
– 504 h/175 °C	42	61	51	49	55	50	58
Hidegállóság, TR10, °C	-27	-36	-23	-32	-32	-33	-33
Hidegállóság Gehman szerint, T100, °C	-33	-42	-27	-38	-39	-40	-38

gítése után végzett húzóvizsgálatokban kapott szakadási nyúlásokból az *Arrhenius egyenlet* segítségével kiszámíthatók az 50%-os csökkenésig várható időtartamok, és ilyen módon megbecsülhető az elasztomerek várható élettartama.

A különböző akrilátelasztomerekből készített keverékek vegyszerállóságát gépkocsikban használt többféle folyadékban és motorolajban vizsgálták. A mintákat ezekben 1008 óra hosszat 150 °C-on tárolták, majd mérték a keménység, a szakadási nyúlás és a térfogat változását. Az utóbbit a **BP Cecilia 20 (C20)** referenciaolajában, a **Shell Helix Plus** és a **Castor SLX** motorolajban a 4. ábra mutatja.



4. ábra
Térfogatváltozás különböző európai vizsgálo- és motorolajokban 150 °C-on 1008 h tárolás után

A legújabb fejlesztés célja, hogy újabb vulkanizációs és védőrendszerrel tovább javítsák a keverékek extrudálhatóságát és növeljék a termékek öregedéállóságát. A fejlesztés alatt lévő ACM-E típusok a Volkswagen cégnél a HT-TDI tömlőkre a *VW TL 526.34* szabványban előírt követelményeket is teljesítik, és ezáltal kitöltik a szokásos ACM elasztomerek és a sokkal drágább fluorpolimerek közötti 150–170 °C-os hőmérséklet-tartomány által alkotott hőállósági „ürt”. A tervek szerint lesz egy lágyabb, 55 Shore A keménységű és egy keményebb, 70 Shore A keménységű tömlőtípus, amelyek tartósan 175/185 °C-on, rövid ideig 190/200 °C-on üzemeltethetők.

Tömítések viselkedése robbanásszerű nyomáseséskor

Az olajkitermelésben sokféle tömitést, membránt, tömlőt alkalmaznak olyan helyen, ahol ezekre igen nagy gáznyomás hat. Ha valamilyen ok miatt a gáznyomás hirtelen leesik (bekövetkezik az ún. explosív dekompresszió, ED), a gumi rideg töréssel megy tönkre. Mivel a jelenség mindig váratlan és nagyon gyors lefolyású, előre nem jelezhető, a bekövetkező jelenségek részleteit sem tudják megfigyelni. Az ED okozta törés bekövetkezése utáni vizsgálatot kétféle szabvány szerint végzik: a *NACE TM192-03* vagy a *NORSOK M-710* szerint. (A **NACE International** 1943-ban alapított mér-

nöki egyesület, amelynek jelenleg 100 országból 17 000 tagja van. Az egyesület célkitűzése, hogy a vegyipartól a vízellátásig és az infrastruktúráig megelőzze a korróziót és az abból származó hibákat. A *NORSOK* a norvégiai szabványok jelzése.) A NACE szabvány szerint a tönkrement tömítést szemrevételezik, majd mechanikai vizsgálatokat végeznek rajta. A *NORSOK szabvány* szerint a vizsgált O-gyűrű négy különböző helyén vett minta keresztmetszetét vizsgálják optikai mikroszkóppal, majd egy ötfokú értékelési rendszer alapján jellemzik a tömítés károsodásának mértékét.

Az explozív dekompresszió vizsgálata két szakaszból áll: a nyomás alatti (kompressziós) szakaszból és a nyomás gyors csökkenésével jellemezhető szakaszból. Amikor a környezetben uralkodó nyomás csökken, nyomáskülönbség lép fel a környezet és a tömítés belső tömege között, felszabadul a deformációs energia, az elasztomer kitágul. Az elasztomermátrix – különösen a töltőanyag és a mátrix közötti határfelületen – nem képes nagyobb térfogatváltozásra, ezért benne pórusok és üregek képződnek, amelyek könnyen összenyílnak, majd repedést alkotnak.

A gáz gyors nyomáscsökkenése közel adiabatikus jellegű, ami gyakran hőmérséklet-csökkenéssel jár. Ennek mértéke és sebessége függ a gáztípustól és a rendszer kezdeti és végső paramétereitől (eredeti nyomás és hőmérséklet, a dekompresszió sebessége, az adott térfogat). Az elasztomerben a nyomásesés által kiváltott jelenségek kialakulásában szerepe van a mechanikai tulajdonságoknak, a gáztranszportnak, a diffúciónak. Az elasztomerben a nagy deformációs sebességek következtében közel adiabatikus felmelegedés figyelhető meg.

Az explozív dekompresszió vizsgálata

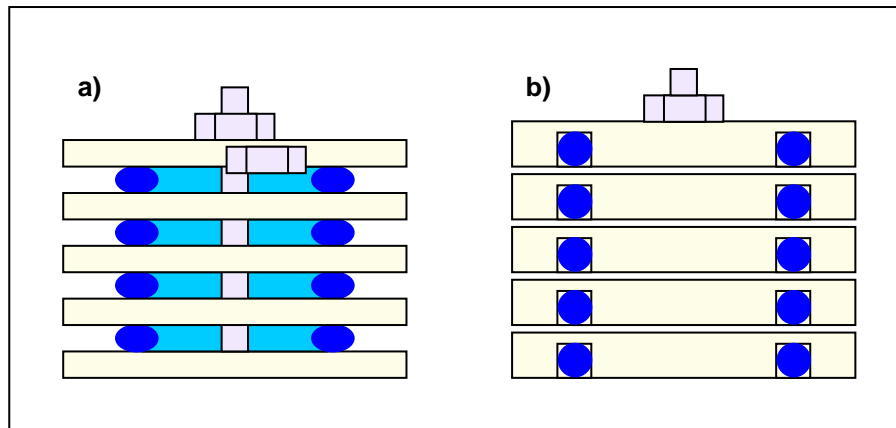
A löbeni **Montan Egyetem** kutatói új vizsgálati módszert fejlesztettek ki az ED megfigyelésére, és ennek segítségével vizsgálták laboratóriumi méretekben a tömör elasztomertestek deformációját, a repedések keletkezését és növekedését különböző deformációs sebességek mellett, a gázáteresztést a nyomás és a hőmérséklet függvényében – és mindezt különböző gázok jelenlétében. A vizsgálatokat az **Economos Austria GmbH**-nél előállított HNBR (hidrogénezett akrilnitril/butadién kaucsuk) és FKM (fluorkaucsuk) O-gyűrűkön végezték. Mindkét kaucsukfajtát gyakran alkalmazták az olajiparban. A vizsgált típusok keménysége Shore A 85 volt.

A vizsgálóberendezés legfontosabb része egy 500 cm³-es autokláv, amelyen a nyomás alatt és a nyomáscsökkenés szakaszában mérhető a nyomás, a hőmérséklet és a tömítések átmérőjének változása (Δh). (Az átmérőváltozást egy CCD-kamerával felvett képek elemzése alapján számították ki.) Az autoklávot vezérelhető fűtőrendszer és adatfeldolgozó rendszer egészítette ki. A nyomás maximuma 350 bar, a hőmérsékleté 200 °C, a nyomáscsökkenés legnagyobb sebessége kb. 25 bar/s. Az autoklávot széndioxid (CO₂), metánnal (CH₄) vagy ezek keverékével lehet megtölteni.

A vizsgálatokban a következő vizsgálati paramétereket variálták:

- gáztípus (CO₂, CH₄ és a kettő 80/20%-os keveréke),
- nyomás (50–280 bar között),
- hőmérséklet (50, 70 és 100 °C),

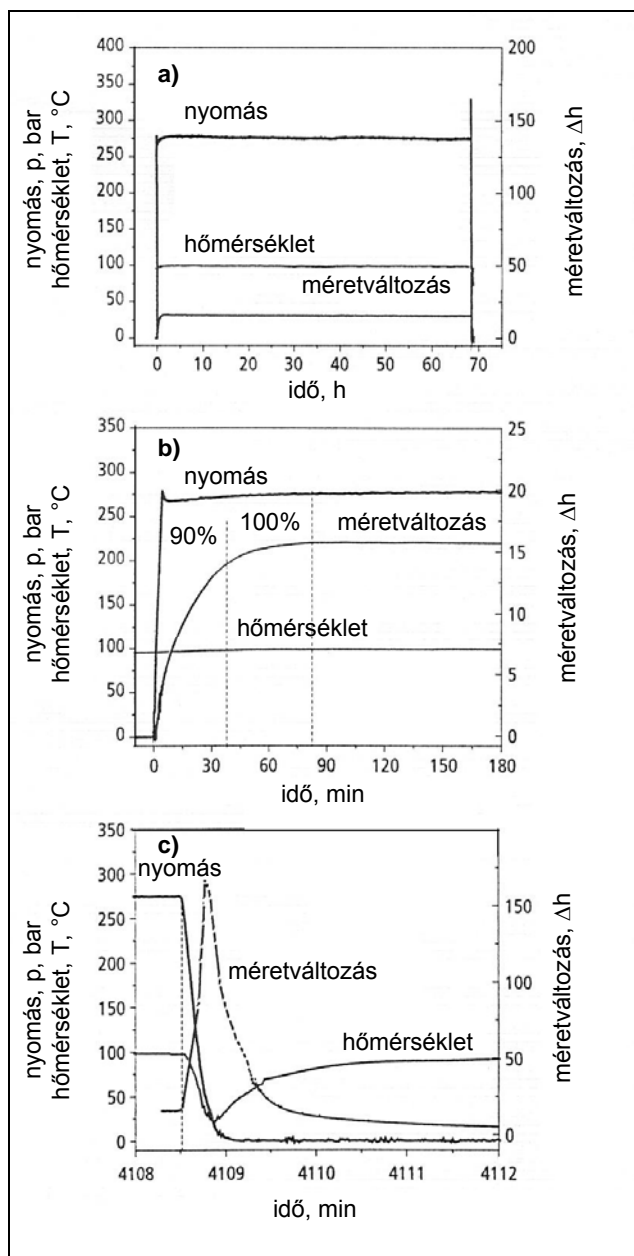
- a dekompresszió névleges sebessége (0,2, 1, 10, 20 bar/s),
- a vizsgálat időtartama (24 h, 72 h),
- a kiterjedés (átmérő méretváltozásának) korlátozása
 - próbatestek korlátozás nélkül (a tömítőgyűrűk szabadon egy lapon fekszenek),
 - 20%-ra korlátozott méretváltozás vájat nélkül (5/a ábra), ill. 10%-ra korlátozott méretváltozás vájatba fektetve (5/b ábra).



5. ábra A kiterjedésükben korlátozott O-gyűrűk elhelyezése a vizsgáloberendezésben. (a: 20%-ra korlátozott átmérőváltozás kompresszió révén; b: 10%-ra korlátozott átmérőváltozás vájatba helyezés révén.)

A kísérletek egy részét 1 kompressziós/dekompressziós ciklussal végezték, más részükben 3-4-5-ször ismételték a ciklusokat azonos paraméterekkel. A dekompresszió után az O-gyűrűk keresztmetszetét optikai mikroszkóp alatt 10-szeres nagyítással vizsgálták és felületüket *NORSOK szabvány* szerint minősítették. Ezenkívül a kísérlet megkezdése előtt és annak befejezése után mérték az O-gyűrűk keménységét, húzószilárdságát, szakadási nyúlását, és dinamikus mechanikai analízisnek is alávetették őket. A kísérletek során mérték a hőmérséklet és nyomás alatt lévő, kiterjedésükben nem korlátozott O-gyűrűk átmérőváltozását (Δh^p) és a dekompressziós szakaszban (Δh^{dp}), a telítési időt (t_s), a maximális dekompressziós sebességet (dp/dt_{max}) és az autokláv terének minimális hőmérsékletét (T_{min}).

A 6. ábrán láthatók egy kompressziós/dekompressziós ciklus alatt felvett görbék. Az *a* kép a teljes, 70 órás ciklus alatt mért nyomás-, hőmérséklet- és méretváltozást mutatja az idő függvényében. A *b* képen a vizsgálat első 180 perce (a nyomás ráadása), a *c* képen a dekompresszió 3 perce látható kinagyítva. A kompressziós fázisban az O-gyűrű maximális átmérőnövekedéséhez tartozó időérték adja a telítési időt (az adott esetben ez kb. 90 perc). A dekompressziós fázisban jól látható az autokláv terében bekövetkező hőmérséklet-csökkenés és az O-gyűrű méreteinek erőteljes és hirtelen megnövekedése majd visszaesése.



6. ábra A paraméterek változása az autoklávban végzett kompressziós/dekompressziós vizsgálat során. (Az O-gyűrűk anyaga FKM, vizsgálati hőmérséklet 100 °C, vizsgálati nyomás CO₂ gázzal 280 bar. *a kép*: a vizsgálat teljes időtartama, *b*: a kompressziós szakasz első 180 perce, *c*: a dekompressziós szakasz első 3 perce.)

Kísérleti eredmények

Szén-dioxid jelenlétében végzett egyciklusos és többciklusos kompressziós/dekompressziós vizsgálatok paramétereit, és az ezeknek kitett HNBR és FKM O-gyűrűk

2. táblázat

Néhány CO₂-vel elvégzett egyszeres és többszörös kompressziós/dekompressziós vizsgálat paramétereit* és a tömítések keresztmetszetének *NORSOK szabvány* szerinti értékelése

Kísérlet-jele	Elasztomer-fajta	t	T	p	t _{dc}	dp/dt	Korlátozás	ΔT_{max}^{dc}	NR
		h	°C	bar	s	bar/s	%	°C	érték
Egyciklusos vizsgálatok									
1	HNBR	24	97	72	60	1,2	20	-17	1100
2	HNBR	24	97	72	60	1,2	-	-17	3111
3	FKM	24	97	72	60	1,2	20	-17	3311
4	FKM	24	97	72	60	1,2	-	-17	1110
Egy- és többciklusos vizsgálatok									
10	HNBR	72	100	72	60	1,2	-		1111
11	FKM	72	100	72	60	1,2	-		1000
12	HNBR	72,24,24	100	72	60	1,2	-		3110
13	FKM	72,24,24	100	72	60	1,2	-		3000
14	HNBR	72,24,24,24,24	100	72	60	1,2	-		3321
15	HNBR	72,24,24,24,24	100	72	60	1,2	20		5443
16	FKM	72,24,24,24,24	100	72	60	1,2	-		3110
17	FKM	72,24,24,24,24	100	72	60	1,2	20		4444

t = a kísérlet időtartama, T = hőmérséklet az autokláv terében, p = nyomás, t_{dc} = a dekompresszió időtartama, dp/dt = a dekompresszió sebessége, ΔT_{max}^{dc} = legnagyobb hőmérséklet-csökkenés a dekompresszió alatt, NR = *NORSOK* szerinti mérőszám

keresztmetszetének *NORSOK szabvány* szerinti minősítő értékeit tartalmazza a 2. táblázat. Mindkét vizsgálatsorozatban voltak olyan kísérletek, amelyekben a tömítések kiterjedését a korábban részletezett módon korlátozták. Az egyciklusos vizsgálat után az O-gyűrűk között voltak kevésbé károsodottak (1000-es NR-érték) és közepesen károsodottak (3000-es NR érték). A többszörös ciklus után mindkét elasztomerfajta NR-értékei nőttek.

A HNBR O-gyűrűk eredeti és kompresszió/dekompresszió utáni feszültségnyúlás görbéi nagyon hasonlóak voltak, az FKM gyűrűk szakadási nyúlása ezzel szemben általában csökkent.

Az új vizsgálóberendezéssel megfigyelhető és mérhető jelenségeket és tulajdonságokat a 6. ábrán korábban bemutattuk. Ez az ábra egy FKM O-gyűrű CO₂ atmoszférában 280 bar nyomással, 100 °C-on kapott görbéit tartalmazza. Ugyanezt az O-gyűrűt 140 bar nyomás alatt, egyébként azonos körülmények között is vizsgálták. 280 bar nyomás alatt a gyűrű kiterjedése (Δh^p , az átmérő növekedése) 16%, 140 bar nyomás alatt 8% volt, azaz úgy tűnik, hogy a méretváltozás arányosan változik a nyomással.

A dekompressziós fázisban a nyomáscsökkenés sebessége nem állandó, az első 1–5 másodpercben gyorsulás, majd lassulás lép fel. Az autokláv hőmérséklet-csökkenése némi késéssel követi a nyomáscsökkenést, a minimum a nyomásesés sebességének már mérséklődő szakaszában mérhető. A 120 bar-os kísérletben az autokláv eredeti 100 °C-os hőmérséklete $T_{\min} = 25$ °C-ra hűlt le (75 °C-os csökkenés). A 140 bar-os kísérletben T_{\min} 50 °C volt. A gyűrű dekompresszió alatti átmérőnövekedése (Δh^{dp}) a 280 bar-os kísérletben 165%, a 140 bar-os kísérletben 65% volt.

A CO₂ és a CH₄ gáz jelenlétében végzett kísérletekben (FKM, 100 °C, 280 bar) 90 perces, ill. 250 perces telítési időt (t_s) mértek. CH₄ atmoszférában Δh^p mindössze 2%, Δh^{dp} 60%, T_{\min} 55 °C volt.

A HNBR-ből készített O-gyűrűk ugyanilyen körülmények között mért jellemzői: $t_s = 75$ perc, $\Delta h^p = 5\%$, $T_m = 30$ °C, $\Delta h^{dp} = 30\text{--}32\%$.

A vizsgálatokat hibaelemzéssel egészítették ki. A magas NR-értéket kapott mintákat pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatnak vetették alá, és a felvételeken azonosítani tudták azokat a hibahelyeket, amelyekből mikrorepedések indulhattak ki. Az egyik esetben ez a lágy elasztomerfázisba beágyazott nagy idegen részecske volt, a másik esetben egy üregből indult ki a repedés, amely az elasztomerfázis és egy töltőanyag-részecske határfelületénél alakult ki.

Összeállította: Pál Károlyné

Abraham, P.; Heider, W.: Fortschritte bei hoch temperaturständigen ACM-Elastomeren. = Gummi Fasern Kunststoffe (GAK), 58. k. 12. sz. 2005. p. 766–774.

Major, Z.; Lefere, K. stb.: Prüfungs- und Versagensanalyse für die explosive Dekompression elastomerer Dichtungen. = Gummi Fasern Kunststoffe (GAK), 59. k. 11. sz. 2006. p. 685–694.