

Elasztomerek mechanikai paramétereinek változása erővezérelt fáradásvizsgálat alatt

Vezér Szilárd Tamás¹, Major Zoltán²

¹Kompozitor Kft., 2220 Vecsés, Széchenyi utca 60.

²Institute of Polymer Product Engineering, Johannes Kepler University Linz, 4040 Linz, Altenbergerstrasse 69, Ausztria

Termoplasztikus poliuretán (TPU) és hidrogénezett akrilnitril-butadién kaucsuk (HNBR) elasztomerek károsodáshalmozódásának jellemzésére egytengelyű, erővezérelt fáradásvizsgálatokat végeztünk. A mért hiszterézis görbék elemzése eltérő fáradási viselkedést mutatott. Amíg a HNBR esetében a nyúlásnak és az alakváltozási energiának a feszültségtől és ciklusszámtól függő változása összefügg az élettartammal, addig a dinamikus és a szekáns modulusz nem alkalmas a károsodáshalmozódás leírására. Ezzel szemben a dinamikus modulusz használható a fáradási élettartam indikátoraként TPU anyag esetében.

BEVEZETÉS

A gumyszerű anyagok fáradási viselkedésének ismertetése a mai napig kiemelt kutatási terület. A témakörben megjelent számos publikáció ellenére a jelentős idő- és eszközigény, valamint a pillanatnyi állapottól és a környezettől erősen függő anyagjellemzők gyors változása miatt, a ciklikusan terhelte anyagok károsodáshalmozódásának pontos leírása a mai napig hiányos.

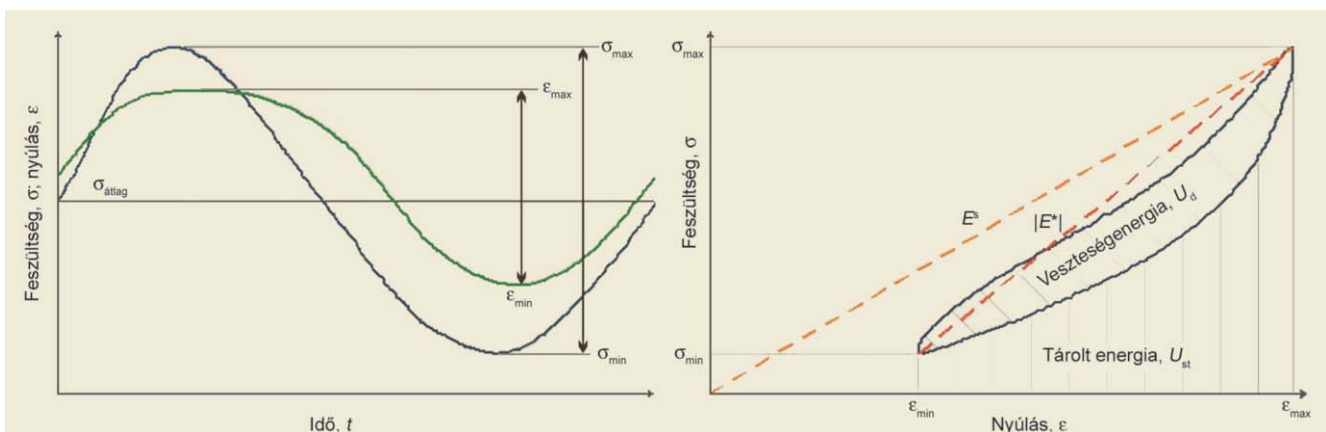
Általánosan három eljárást alkalmaznak az elasztomer anyagok fáradási ellenálló-képességének meghatározására [1]. Amíg az első kettő az élettartamot egy meghatározott terheléshez tartozó tönkremeneteli ciklusszámmal (N_f) jellemzi, a harmadik módszer a repedésterjedési sebességet (da/dn) és a törésmechanikai paramétereket vizsgálja. Jelen tanulmányban a feszültség alapú szisztémákkal foglalkozunk.

A legelterjedtebb eljárás, a Wöhler kifáradási határ meghatározása a terhelés függvényében ad becslést az élettartamra [2]. A végtelen ciklusszámhoz tartozó feszültség-szint-tartomány leírása mára a fárasztóvizsgálatok alapjává vált. A lineáris és nemlineáris károsodáshalmozódási elméletek mellett megjelent a kétfélepcsős teória, ahol különvlik a repedés

kialakulásához vezető és a repedésterjedés alatti anyagfáradás [3]. *Bui-Quoc* hibrid elméletében pedig már az anyagban meglévő repedések igénybevétel alatti növekedése okozza a folyamatos szilárdság csökkenést [4].

Griffith törésmechanikai elméletéből fejlesztette ki *Rivlin* és *Thomas* az elasztomerek fáradásos repedésterjedés vizsgálatának alapjait, amelyet később többen finomítottak [5]. Az alakváltozási energiasűrűség (amely a feszültség-nyúlás görbe integrálja) és a próbatest keresztmetszetéből számolható törési energiát *Greensmith* már a fáradási viselkedés jellemzésére használta [6]. Később számos károsodási kritérium született az energia modellekből, amelyek által a fárasztó vizsgálatok során mért hiszterézis görbék tanulmányozása az eredmények elemzésének fontos eszközévé vált [7–9].

A feszültség alapú teóriák, az anyag terheléstörténetének segítségével, egy mechanikai jellemző függvényeként próbálják meghatározni a fáradási határt [10]. A ciklusonként mért nyúlás maximumát (ϵ_{\max}), a feszültség maximumát (σ_{\max}), a szekáns moduluszt (E^s) és a dinamikus moduluszt ($|E^*|$) több esetben is sikeresen alkalmazták a károsodás leírására polimer anyagok esetében. A feszültség-nyúlás diagram terhelési



1. ábra. A hiszterézis-elemzés során használt mennyiségek ábrázolása feszültség-nyúlás diagramban

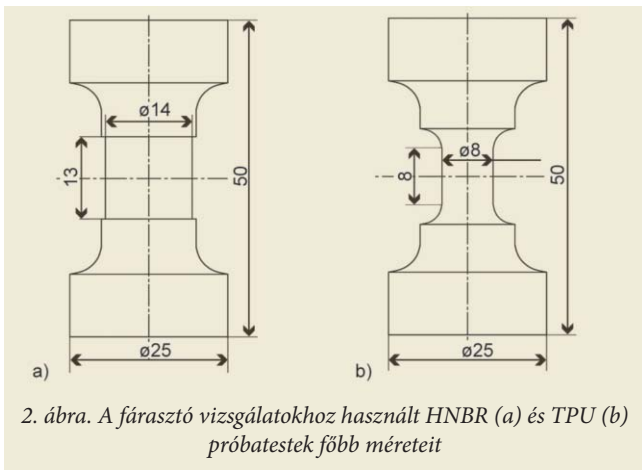
görbéje alatti területből számolt alakváltozási energiasűrűség (U_t), valamint ennek két összetevője, a tárolt (U_{st}) és a veszteségenergia (U_d) szintén széles körben használt érték a károsodáshalmozódás bemutatására [11–13]. Az 1. ábrán leolvasható az egyes jellemzők jelentéstartalma.

A cikkben bemutatásra kerülő erővezérelt fárasztásvizsgálatok célja, hogy két kiválasztott elastomer kifáradási határainak meghatározásán túlmutatóan, a károsodáshalmozódásuk karakterisztikáját is leírjuk az ismertetett mechanikai jellemzők segítségével.

KÍSÉRLETEK

A VIZSGÁLT ANYAGOK

A kör keresztmetszetű, súlyzó alakú próbatesteket a projektben részt vevő SKF ECONOMOS GMBH (Judenburg, Ausztria) gyártotta le számunkra két különböző anyagtulajdonságokkal rendelkező elastomerből. A hidrogénezett akrilnitril-butadién kaucsuk (HNBR) és a termoplasztikus poliuretán (TPU) anyagú próbatestek vizsgált átmérője 14 mm és 8 mm volt (2. ábra).

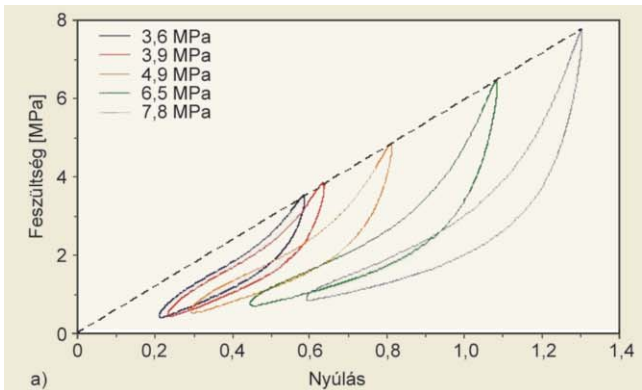


2. ábra. A fárasztó vizsgálatokhoz használt HNBR (a) és TPU (b) próbatestek főbb méreteit

MÉRÉSEK

A fárasztóvizsgálatokat egy szervo-hidraulikus szakítógépen (MTS-858 Tabletop, MTS SYSTEMS GMBH, Németország) végeztük el az 1. táblázatban ismertetett paraméterekkel.

Az anyagvizsgálatok során logaritmikusan növekvő időközönként mentettük el az egy-egy ciklushoz tartozó idő, elmozdulás és erő értékeket, majd a végső tönkremenetel előtti



1. táblázat.

Vizsgálati paraméterek

Vezérlés módja:	Erő
Hőmérséklet:	23 °C
Frekvencia:	1 Hz
Feszültség arány ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$):	0,1
Maximális terhelés:	1200 N - HNBR 1500 N - TPU
Maximális ciklusszám:	$4,32 \cdot 10^5$ - HNBR $8,64 \cdot 10^4$ - TPU

utolsó 10 fel- és leterhelési görbe adatát. Ezekből az adatokból, a károsodáshalmozódás vizsgálatához a következő mechanikai jellemzőket számoltuk ki ciklusonként egy LabVIEW-ban (NATIONAL INSTRUMENTS, San Antonio, TX, USA) írt kiértékelő program segítségével:

$$E^s = \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_{max}} \tag{1}$$

$$|E^*| = \left[\frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}} \right] \tag{2}$$

$$U_t = \int_{\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} \sigma d\epsilon \tag{3}$$

ahol E^s a szekáns modulusz, $|E^*|$ a dinamikus modulusz, ϵ_{max} (ϵ_{min}) és σ_{max} (σ_{min}) az egy cikluson belüli maximális (minimális) nyúlás- és feszültségérték, U_t pedig az alakváltozási energiasűrűség.

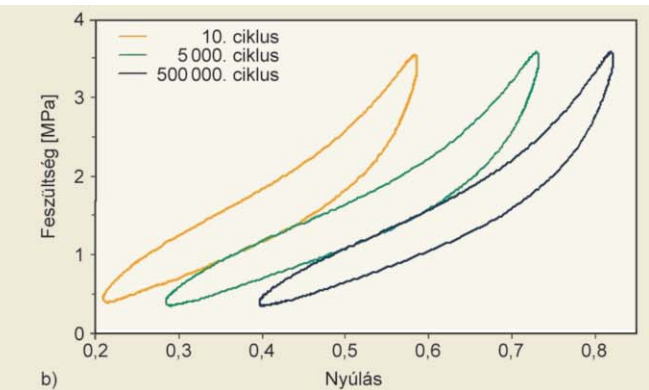
EREDMÉNYEK

HNBR HISZTERÉZIS-ELEMZÉS

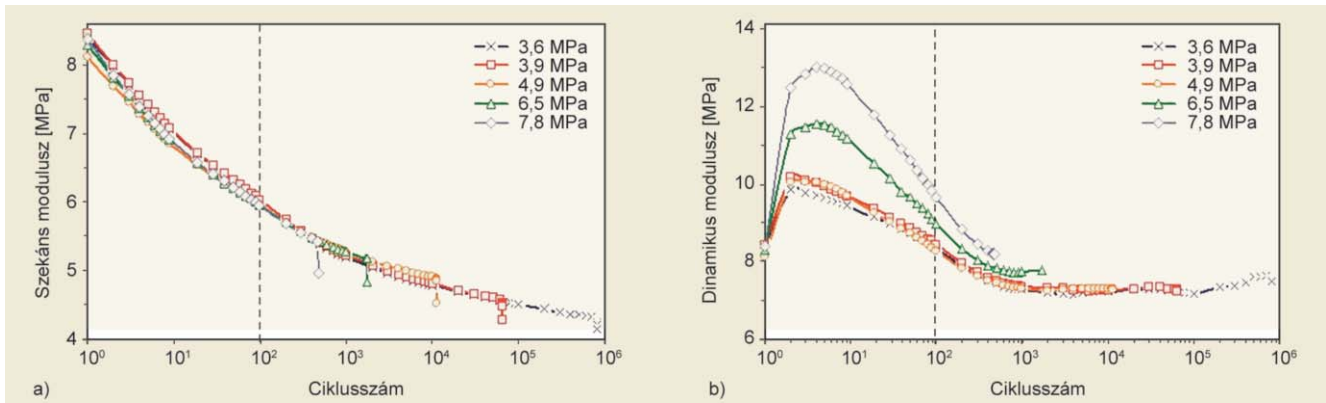
A HNBR vizsgálatok jellegzetes hiszterézis görbéi láthatóak a 3. ábrán. Az „S” alakú görbék jól ábrázolják az anyag egyedi viselkedését, ahogyan a terheléstől, valamint az időtől függetlenül szinte teljesen megegyező adatokat kapunk a fárasztás során.

A szekáns és a dinamikus modulusz a fárasztás maximális feszültségétől függetlenül, azonos görbe mentén változik, így a károsodáshalmozódás egyedi leírására nem alkalmasak (4. ábra).

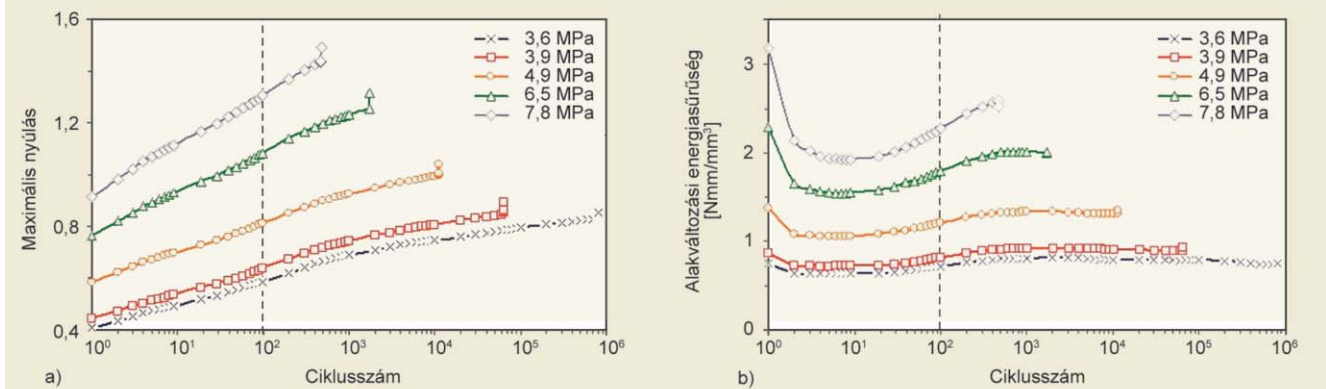
A lág, nemlineáris próbatestekkel rendkívül nehézkes időigényes stabil erővezérlést megvalósítani. Komplikációt



3. ábra. A HNBR anyag hiszterézis görbéinek a fárasztóvizsgálat alatt használt maximális feszültségtől (a) és ciklusszámtól való függése (b)



4. ábra. A HNBR szekáns (a) és dinamikus modulusának (b) változása a ciklusszám függvényében



5. ábra. A HNBR maximális nyúlása (a) és alakváltozási energiájának változása (b) a ciklusszám függvényében

jelent a terhelés alatti lágyulás (Mullins-hatás), és az, hogy ciklikus terhelés során megváltozik a csillapítás mértéke (Payne-hatás). A tesztberendezésen beállított vezérlés 100 ciklus után tudta stabilan tartani a vizsgálat paramétereit, a diagramokon ezt külön szaggatott vonal jelzi. Az ábrázolt, különböző maximális feszültséghez tartozó görbék, a végleges tönkremenetel előtti utolsó ciklusig mutatják be az anyag mechanikai jellemzőinek változását.

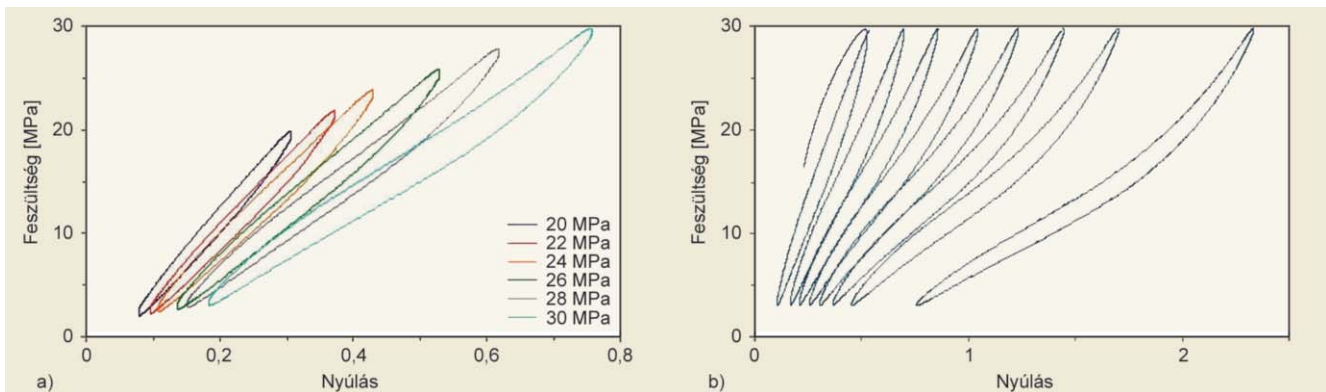
Az 5a. ábrán a maximális nyúlás, az 5b. ábrán pedig az alakváltozási energia ciklusonkénti értékének változása látható. Mindkét jellemző jól ismert és széles körben használt mennyiség a kifáradás előrejelzésére. A vizsgálat során mért nyúlás időtől és terheléstől való függése, az anyag kúszása és az esetlegesen kialakult belső repedések folytán, jól meghatározható.

A végső tönkremenetelt okozó látható repedésterjedés az utolsó ciklusokra korlátozódik.

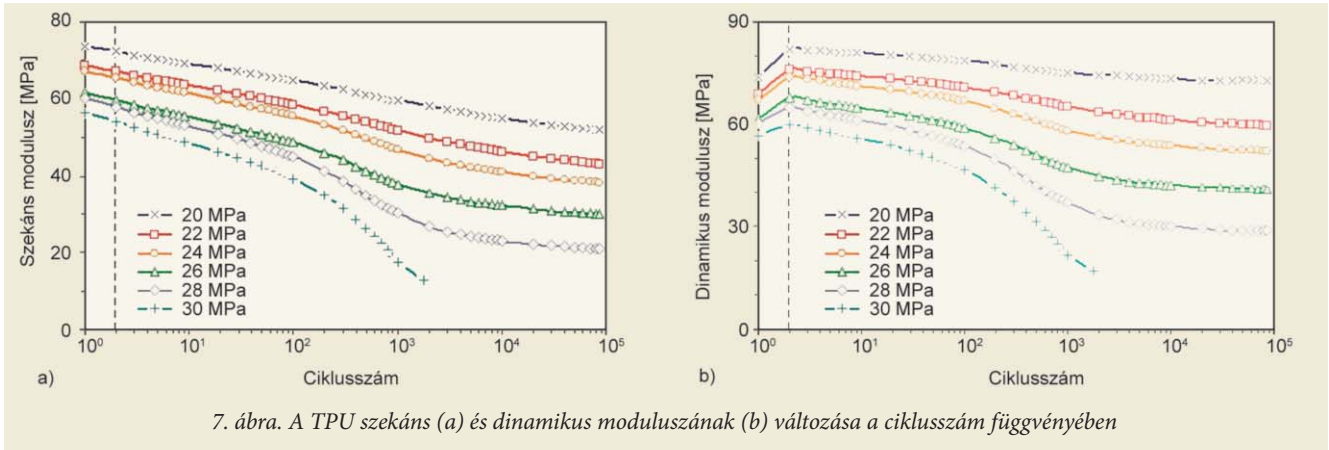
Az alakváltozási energia a ciklusszámtól függetlenül közel azonos értéken marad, így a károsodáshalmozódás követésére nem ad lehetőséget. Feszültségfüggésével ugyanakkor egy Wöhler görbéhez hasonló, ciklusszámhoz tartozó kifáradási határ számolható.

TPU HISZTERÉZIS-ELEMZÉS

A TPU hiszterézis görbéinek, a fárasztó vizsgálat folyamán bekövetkezett változását mutatja a 6. ábra. Az anyagviselkedés teljesen eltér az előbb bemutatott HNBR-től: a fel- és leterhelés feszültség-nyúlás diagramon ábrázolt alakja erősen függ az alkalmazott feszültség nagyságától, illetve a ciklusszámtól.



6. ábra. A TPU anyag hiszterézis görbéinek a fárasztóvizsgálat alatt használt maximális erő (a) és ciklusszámtól való függése (b)



TPU esetében mind a szekáns, mind a dinamikus modulus ciklusszámtól és feszültségtől függően hasonlóan változik a fárasztóvizsgálat folyamán (7. ábra). Nagyobb terhelés alacsonyabb modulusz értéket eredményez, amely a mérés időtartama alatt folyamatosan csökken. A próbatest egyedül a 30 MPa maximális feszültség esetén tört el a vizsgálat időtartama alatt, mégpedig ridegen, kimutatható repedésterjedés nélkül. Ennél nagyobb terhelés alkalmazásakor a tönkremenetel pár ciklus alatt bekövetkezett.

A fárasztás során bekövetkezett anyaglágyulás a dinamikus modulusz csökkenéssel jellemezhető, így alkalmas a tönkremenetel bemutatására. A 8a. ábrán látható az $|E^*_{(i)}/E^*_{max}|$ arány adott csökkenéséhez szükséges ciklusszám, a mért pontokból készített matematikai egyenlet segítségével ábrázolt károsodáshalmozódást pedig 8b. ábra mutatja be egy 3 tengelyű diagram segítségével.

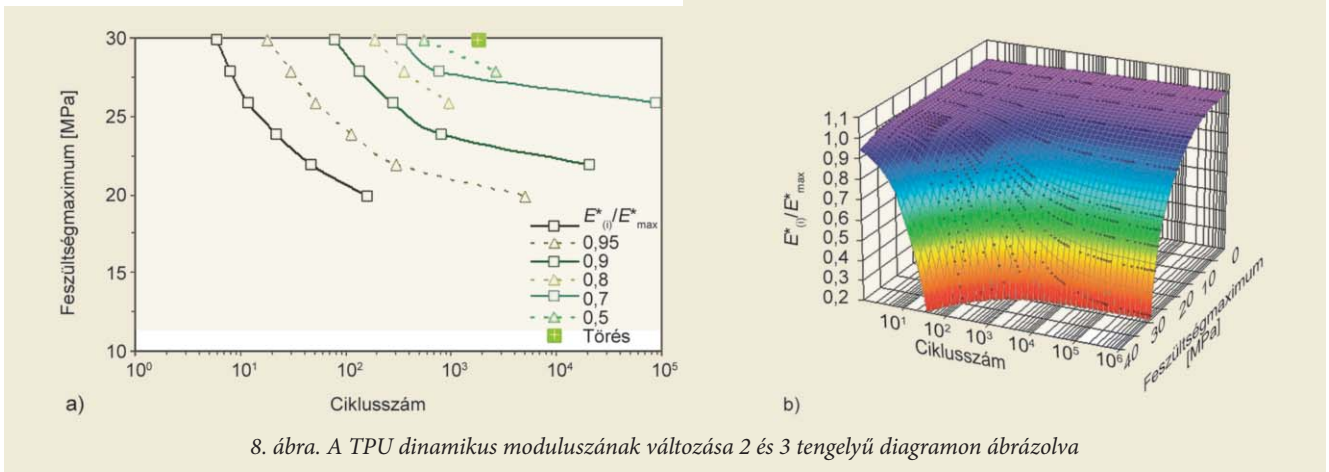
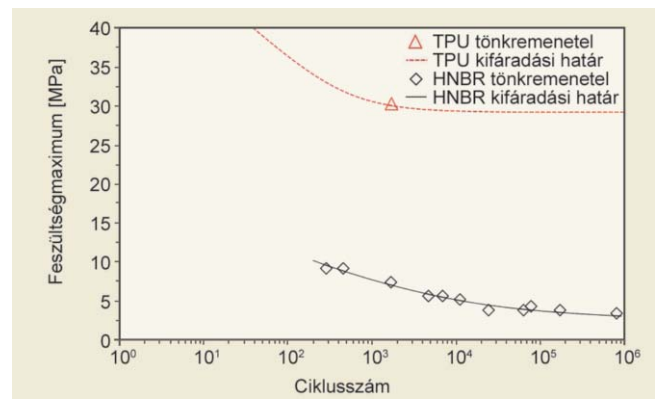
Feltételezve, hogy a károsodás a kezdeti dinamikus modulusz 25%-ánál következik be, TPU esetén a kifáradási határ 28,95 MPa-ra adódik, míg HNBR-nél a mért adatokból 3,73 MPa-re következtethetünk (9. ábra).

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjaink számos elasztomerből és azok kompozitjaiból készült alkatrésze van ciklikus terhelésnek kitéve (tömítések, légzugók, szíjak). Fáradási folyamataik jellemzésére többféle károsodáshalmozódást leíró elmélet született, amelyek közül egy, a ciklikus terhelés hiszterézis görbéinek vizsgálata alkalmas a

károsodás jellemzésére és az anyag kifáradási határának meghatározására. Ezt a módszertant követve vizsgáltuk meg két anyag mechanikai paramétereinek változását nagy ciklusszámú, egytengelyű, erővezérelt fárasztóvizsgálatok alatt.

A látható repedésterjedés az utolsó pár ciklusra koncentráldott HNBR esetében. Hiszterézis görbéinek elemzése során egyedül a maximális nyúlást találtuk alkalmas paraméternek az anyagban bekövetkezett károsodás jellemzésére. A TPU anyag esetében csak a legnagyobb terhelésnél vizsgált próbatest tört el az adott ciklusszám alatt, mégpedig észlelhető repedésterjedés nélkül, ridegen. A hiszterézis-elemzés során a kifáradási határt matematikai modell segítségével határoztuk meg a dinamikus modulusból.



A vizsgált elasztomerek erővezérelt, egytengelyű fáradásvizsgálata megmutatta, hogy mennyire széles skálán viselkednek ezen anyagok ciklikus terhelés hatására. Károsodáshalmozódásuk leírására különösen nehéz egy általánosan használható eljárás megalkotása.

A cikkben bemutatott vizsgálatokat a Polymer Competence Center Leoben GmbH-nál (Leoben, Ausztria) végeztük, amely az osztrák Közlekedési, Innovációs és Technológiai Minisztérium Kplus programja keretében alakult meg 2002-ben. Külön köszönet ezért mind az osztrák szövetségi kormánynak, mind a stájerországi és felső-ausztriai tartományi kormányzatoknak, valamint a kutatásban résztvevő partnerünknek, az SKF Ecomos GmbH-nak (Judenburg, Ausztria).

IRODALOM

- [1] Bauman, J. T.; Verlag, C. H.: Fatigue, stress, and strain of rubber components, Hanser Gardner Publications, Németország, (2008).
- [2] Wöhler, A.: Wöhler's experiments on the strength of metals, Engineering, 4, 160–161 (1867).
- [3] Grover, H. J.: An observation concerning the cycle ratio in cumulative damage in Symposium on Fatigue of Aircraft Structures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 120–124 (1960).
- [4] Bui-Quoc, T.: High-temperature fatigue-life estimation: extension of an unified theory, Experimental Mechanics, 15, 219–225 (1975).
- [5] Rivlin, R. S.; Thomas, A. G.: Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy of Tearing, Journal of Polymer Science, 10, 3, 291–318 (1953).
- [6] Greensmith, H. W.: Rupture of Rubber. X. The Change in Stored Energy on Making a Small Cut in a Test Piece Held in Simple Extension, Journal of Applied Polymer Science, 7, 993–1002 (1963).
- [7] Fatemi, A.; Yang, I.: Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state art for homogeneous materials, Internal Journal of Fatigue, 20, 9–34 (1998).
- [8] Kim, W.D., Lee, H.J, Kim, J.Y., Koh, S.K.: Fatigue life estimation of an engine rubber mount, International Journal of Fatigue 26, 553-560 (2004).
- [9] Lazzarin, P.; Livieri, P.; Berto, F.; Zappalorto M.: Local strain energy density and fatigue strength of welded joints under uniaxial and multiaxial loading, Engineering Fracture Mechanics, 75, 1875–1889 (2008).
- [10] Mars, W. V., Fatemi, A.: A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber, International Journal of Fatigue, 24, 94–961 (2002).
- [11] Beatty, J. R.: Fatigue of rubber, Rubber Chemistry and Technology, 37, 1341–1364 (1964).
- [12] Hwang, W. B.; Han, K. S.: Fatigue of Composite Materials – Damage Model and Life Prediction in Composite Materials – Fatigue and Fracture – ASTM STP 1012, (Lagace, P. A. ed.), Vol. 2, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 87–102 (1989).
- [13] Pinter, G.; Ladstätter, E.; Billinger, W.; Lang, R. W.: Characterization of the tensile fatigue behaviour of RTM-laminates by isocyclic stress-strain-diagrams, Internal Journal of Fatigue, 28, 1277–1783 (2006).