

Elasztomerek fárasztóvizsgálata

Zoltán Major¹ – Christian Feichter² – Reinhold W. Lang³

Bevezetés

A gumikból és hőre lágyuló elasztomerekből készült alkatrészek döntő többségben dinamikus, időben változó, ciklikus terhelésre vannak igénybe véve. Gyakorlati alkalmazásuk a megbízhatóan üzemelő, hosszú élettartamú szerkezetekben szükségessé teszi a ciklikus terhelés alatti tulajdonságaik ismeretét. Ez egyrészt a dinamikus merevség, valamint a feszültség és a nyúlás közötti fáziskülönbség frekvencia, hőmérséklet és terhelésamplitúdó függésének az ismeretét, másrészt a kifáradási tulajdonságok, illetve az ezt leíró anyagjellemzők meghatározását és ismeretét igényli.

Jelen vizsgálatorozat célja egy, az elasztomerek specifikus tulajdonságait figyelembe vevő vizsgálati módszer kifejlesztése, majd a kidolgozott módszerrel különféle elasztomer anyagok fáradási tulajdonságainak a meghatározása volt.

Az elasztomerek fárasztóvizsgálata többféle módszerrel is lehetséges. A bemetszetlen vagy bemetszett próbatestekkel meghatározható a Wöhler-görbe, ám e módszer elasztomer anyagokhoz való alkalmazásának korlátai is ismertek az irodalomból (Gent (ed.), 1992; Mars és Fatemi, 2002 [1 és 2]).

Az élesen bemetszett (pl. borotvapengével) és alkalmasan választott próbatest geometriával törésmechanikai elveken alapuló fáradásos repedésterjedési vizsgálati módszer (FCP) is alkalmazható. A cikkben elasztomerek törésmechanikai elven alapuló fárasztóvizsgálata kifejlesztésének és alkalmazásának az eredményeit és problémáit mutatjuk be.

Az elasztomerek vizsgálatához már az ötvenes évek eleje/középe óta használják a törésmechanikát (Rivlin és Thomas, 1953). Ez év szeptemberében rendezték meg Hartfordban (UK) Money és Rivlin emlékére az 50 éves jubileumi konferenciát, ahol az elmúlt 50 év eredményei mellett az előadók bemutatták a jelenleg alkalmazott koncepciók és módszerek hiányosságait és a lehetséges új megoldásokat is.

Az irodalomban nagy számban található az elasztomerek fáradásával, a fáradásos repedésterjedéssel, az ezt befolyásoló tényezők elemzésével foglalkozó munkákat. A módszer alapjait a 60-as években – egy adott vizsgálattechnikai háttér mellett – dolgozták ki és a későbbiekben finomították (Rivlin és Thomas, 1955, Gent, Lindley és Thomas 1964, Gent (ed.), 1992; Eisele, Kelbch és Engels, 1992; Hocine, Abdelaziz és Mesmacque, 1998; Legorju-jago és Bathias, 2002). A módszer lényege az alábbiakban foglalható össze.

Az ún. tearing energy, T (törési energia) definíciója szerint

$$T = - \left(\frac{\partial U_{ext} - U}{\partial A} \right) \geq T_c \quad (1)$$

Igy tehát ismerni kell a fajlagos energia vagy alakváltozási energiasűrűség változását a próbatest maradó keresztmetszete (A) függvényében. Az alakváltozási energiasűrűség a vizsgált próbatest feszültség-nyúlás görbéjének integrálásával meghatározható. A bemetszett próbatest repedéshosszát a vizsgálat során folyamatosan regisztrálni kell. A két mérés kombinációjával a T energia értéke – különböző próbatestek esetén – az alábbi általános összefüggéssel számítható:

$$T = 2kWc \quad (2)$$

ahol $k(a)$ egy, a repedéshossztól függő geometriai tényező, W az alakváltozási energiasűrűség és c a repedéshossz értéke.

Az elasztomerek sok tekintetben speciális, a többi szerkezeti anyagtól eltérő viselkedést mutató anyagok. A mechanikai tulajdonságok közül a legjelentősebbek: a nagy nyúlások (200-tól 600%-ig), a nemlineáris viskoelasztikus viselkedés a teljes nyúlástartományban és a nagy hiszterézis. A feszültség alapú mérőszámok így nem használhatók gumik esetén.

Gumik fárasztóvizsgálatát rendszerint nyúlásvezérléssel végezzük el, egyrészt, mert a lágy, nemlineáris próbatestekkel a vizsgálóberendezések döntő többségénél nem lehet a stabil erővezérlést megvalósítani, másrészt ekkor a külső erők munkája zérus (U_{ext}) és az (1) egyenlet a következő alakra egyszerűsödik:

$$-\left(\frac{\partial U}{\partial A} \right) = T \quad (3)$$

További komplikációt jelent a terhelés alatti lágyulás (Mullins-hatás), és az, hogy ciklikus terhelés során megváltozik a csillapítás mértéke (Payne-hatás). Ugyanakkor megállapítható, hogy az elasztomerek bár igen nagy alakváltozások után, de végső soron ridegen törnek, azaz a kohéziós zóna mérete igen kicsi.

Kísérletek

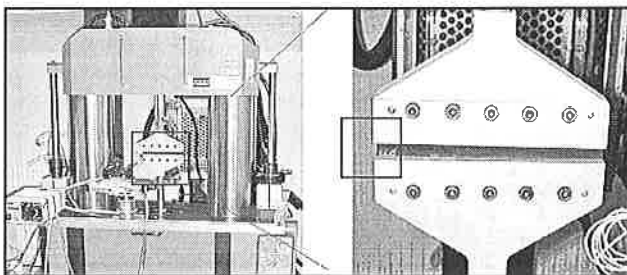
A vizsgált anyagok

A vizsgálatokhoz öt különböző gumianyagot használtunk, mégpedig: természetes gumit (NR), sztírol-butadién alapú gumit (SBR), etilén-propilén-dién alapú elasztomert (EPDM), illetve ezek keverékét és fluor alapú gumit (FR), továbbá két termoplasztikus elasztomert (hőre lágyuló poliuretán (TPU)), amelyeket a projektben résztvevő cégek bocsátottak rendelkezésünkre.

Próbatestek és a vizsgálati elrendezés

A vizsgálatokat egy olyan MTS 831.59 típusú szervohidraulikus anyagvizsgáló gépen végeztük el, ami a gumivizsgálatoknál felmerülő szinte valamennyi követelményt kielégíti. Ilyen követelmények, pl. a vizsgálorendszer nagy merevsége, a vizsgálati frekvencia és a hőmérséklet változtathatósága széles tartományban, a szabályozórendszer elegendő rugalmassága a nagy dugattyú elmozdulások esetén is a kívánt terhelés pontos megvalósításához és a nagy pontosságú erőmérés viszonylag kis erők esetén is. A vizsgálóberendezés a TestStar II Classic elektronika és szoftver bázisán rendelkezik egy elasztomer test package nevű programcsomaggal, aminek egyik eleme a fárasztóvizsgálatok elvégzését támogató Tearing EnergyR 790.38 szoftver. Az 1. ábrán a vizsgálóberendezés és a befogó látható.

Az ún. pure shear elnevezésű (PS) próbatestet választottuk ki a vizsgálatokhoz. A repedés egyenes vonalú terjedésének biztosítása érdekében egy enyhe kikönyvítést helyeztünk el a próbatest közepén (faint waste, a továbbiakban így a rövidítés FWPS). A bemetszést a



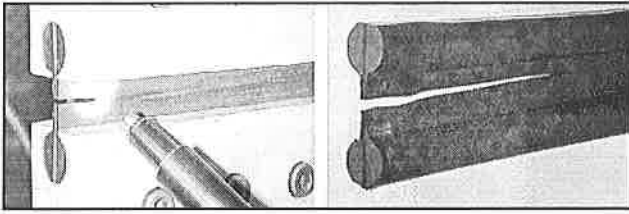
1. ábra. A vizsgálórendszer felépítése a befogóval

¹ Major Zoltán, egyetemi asszisztens a Leobeni Egyetem Institut für Werkstoffkunde und -prüfung der Kunststoffe tanszékén és projektvezető a PCCL-nél.

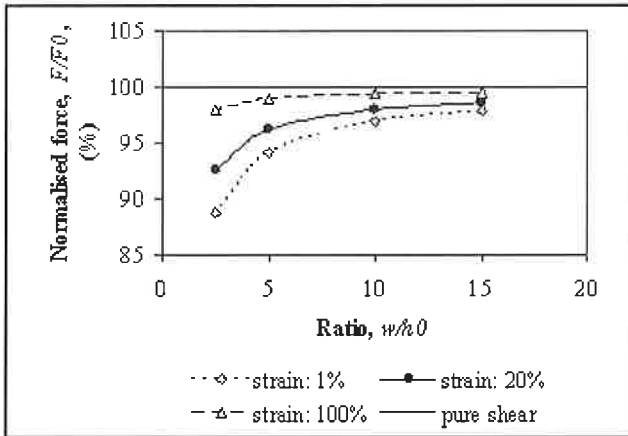
² Christian Feichter, tudományos munkatárs a PCCL-nél és a témában készíti a doktori értekezését.

³ Reinhold W. Lang, a Leobeni Egyetem Institut für Werkstoffkunde und -prüfung der Kunststoffe tanszék vezetője és a PCCL igazgatója.

befogóra rögzített készülékben elhelyezett bortvapengével készítettük. A bemetszett és a fáradt repedést tartalmazó próbatest képe látható a 2. ábrán. A 3. ábrán a tiszta nyírás (pure shear) feszültségállapot függése látható a próbatest w hosszának és h_0 magasságának az arányától különböző nyúlások esetén (Yeoh, 2001).

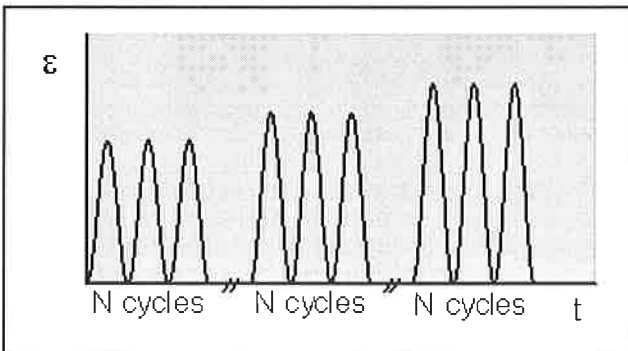


2. ábra. A bemetszett és a fárasztással berepesztett FWPS próbatest



3. ábra. A tiszta nyírás (pure shear) feszültségállapot mértékének függése a próbatest w hosszának és h_0 magasságának az arányától különböző nyúlások esetén (Yeoh, 2001)

A vizsgálatokat minden esetben nyúlásvezérléssel és $R = \epsilon_{min}/\epsilon_{max} = 0$ mellett végeztük. A vizsgálatok során egy adott nyúlásamplitúdóról indulva a terhelést fokozatosan növeltük egy olyan nyúlásamplitúdóig, ahol vagy az anyag (stabilból instabil repedésterjedésbe való átmenet) vagy pedig a vizsgálórendszer (a szabályozás már nem működött) mutatott instabilitást. Egy terhelési szinten 104 ciklus volt a vizsgálat időtartama. Ezt mutatja be a 4. ábra. A szinuszosan változó terhelés vizsgálati frekvenciája 10 Hz volt, valamennyi vizsgálat szobahőmérsékleten (23°C) és 50%-os relatív páratartalom mellett végeztük. A repedés hosszát a repedés követésére alkalmas mérőmikroszkóppal mértük meg. A vizsgálószoftver automatikusan rögzítette az erő-elmozdulás görbéket és számolta a nyúlásokat, feszültségeket, valamint a nyúlási energiasűrűséget. A repedéshossz értékének manuális megadása után a program újra automatikusan számolja a T energiát, a repedésterjedési sebesség, da/dN értékeit és megrajzolja a $da/dN-T$ repedésterjedési diagramot.



4. ábra. A fárasztóvizsgálat elvi vázlata

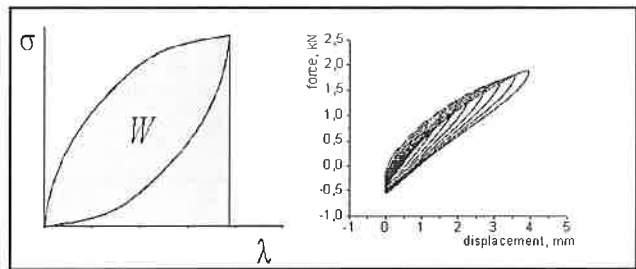
Vizsgálati paraméterek

Időben változó ciklikus terhelés során, különösen a töltőanyaggal erősített elasztomerrendszerek (műszaki alkalmazásokhoz döntően ilyeneket használnak) megváltoztatják feszültség-nyúlás jelleggörbéjüket, kilágyulnak és megváltozik mind a hiszterézis görbe alakja, mind pedig a görbe alatti terület nagysága. Megvizsgáltuk, hogy a becsült maximális nyúlásamplitúdóval való előterhelés alkalmazása hogyan befolyásolja a fáradásos repedésterjedést („non-conditioned” és „preconditioned”).

Miután a gyakorlatban a ciklikus terhelés nemcsak szinuszos (sine), hanem nagyon gyakran pulzáló (pulse) jellegű, ezért a kísérlet-sorozat másik részében egyrészt azt vizsgáltuk, hogy az adott vizsgálógépen vannak-e a pulzáló terhelés megvalósíthatóságának korlátai, másrészt meghatároztuk a pulzáló terhelés kifáradási anyagjellemzőkre gyakorolt hatását három különböző elasztomer anyagon. Az alapjel frekvenciája ekkor is 10 Hz volt 0,2 „pulse ratio” érték mellett.

Az anyagjellemző mérőszámok meghatározása

Az 5. ábrán az elvi és egy terhelési ciklus összes mért hiszterézis görbéje látható.



5. ábra. Egy elvi és egy adott terhelési ciklus összes hiszterézis görbéje

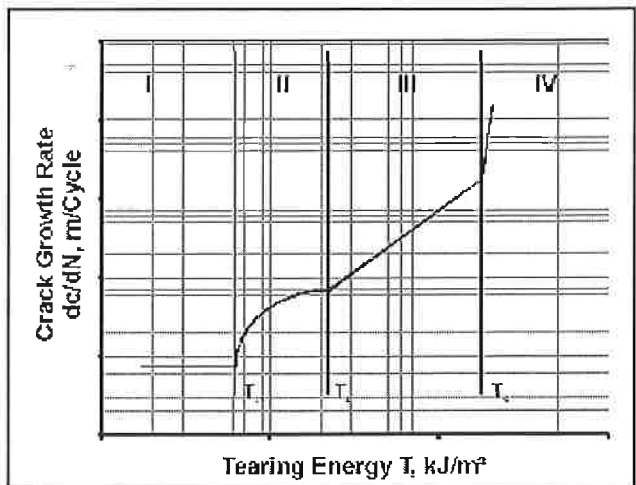
Az alakváltozási energiasűrűség (W), a feszültség (σ) és nyúlás-görbe ($\lambda = 1 + \epsilon$) alatti terület integrálásával határozható meg:

$$W = \int_0^{\lambda_{max}} \sigma(\lambda) d\lambda \tag{4}$$

Általános esetben, mint azt korábban láttuk, a T energia a (2) képletel számítható. A gumiknál a repedés gyakran cikk-cakkban, tehát nem mindig a repedés síkjában terjed, ezért megkülönböztetünk egy a -val jelölt, a repedés síkjában mért repedéshosszat, és egy c -vel jelölt, az összes repedésszegmens hosszát jellemző méretet. A „pure shear” geometria nagy előnye, hogy a T értéke független a repedéshossztól és az alábbi egyszerűsített összefüggéssel számítható:

$$T = Wh \tag{5}$$

ahol h a próbatest magassága.



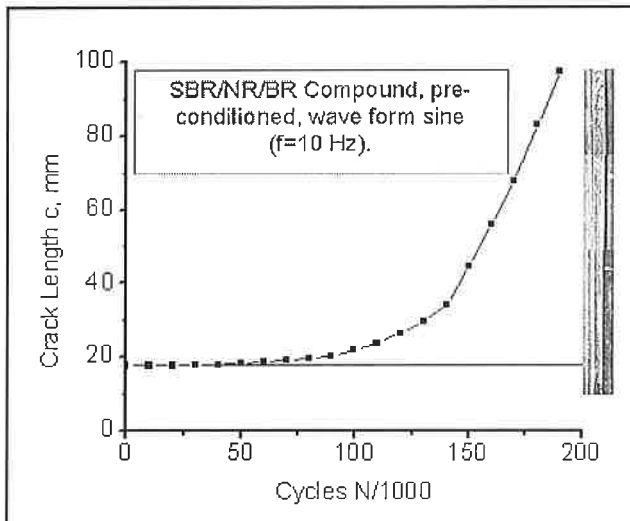
6. ábra. A gumikra jellemző $dc/dN-T$ fáradásos repedésterjedési diagram elvi vázlata

A 6. ábrán gumikra jellemző fáradásos repedésterjedési görbe elvi vázlatát látható, amelyen négy szakaszt különböztethetünk meg. Az első szakaszban a repedés nem vagy csak környezeti hatások (pl. ózon) miatt terjed, a másodikban megindul a repedésterjedés (T_{th}) és kvázi

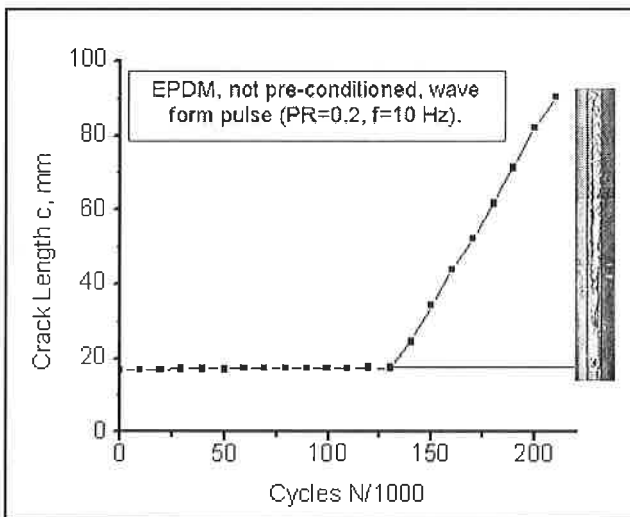
instabilan terjed, majd ezt követi a stabil repedésterjedés szakasza (T_s), ami instabil repedésterjedéssé alakulhat át (T_c).

A vizsgálatsorozat eredményei

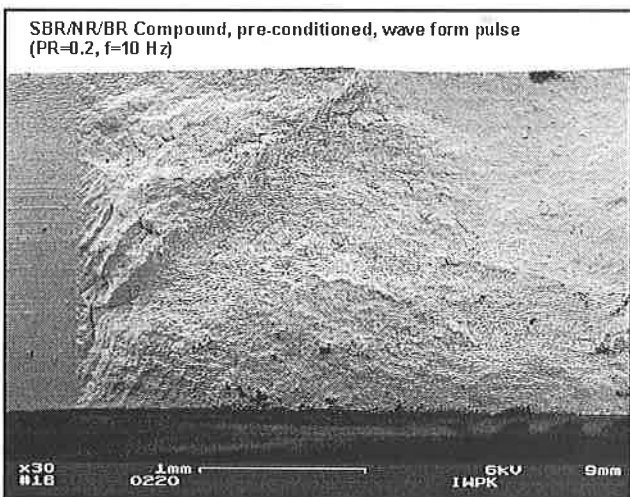
A 7. és 8. ábrán a repedéshossz változása a ciklusszám függvényében követhető nyomon egy SBR/NR/BR keverék és egy EPDM anyag esetén. A repedésterjedés folyamatának részletesebb elemzéséhez a töretfelületet digitális kamerával lefotóztuk (ez látható az ábrák jobb oldalán), majd a repedés csúcs környezetét scanning elektron-



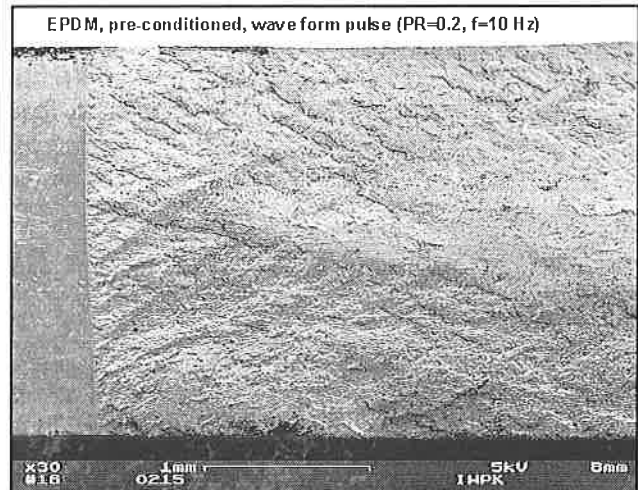
7. ábra. A repedéshossz növekedése a ciklusszám függvényében a szinuszos terhelésű SBR/NR/BR gumikeverékben



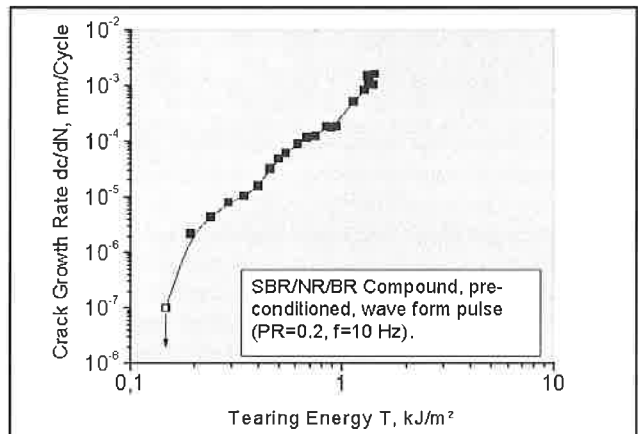
8. ábra. A repedéshossz növekedése a ciklusszám függvényében a pulzáló terhelésű EPDM gumiban



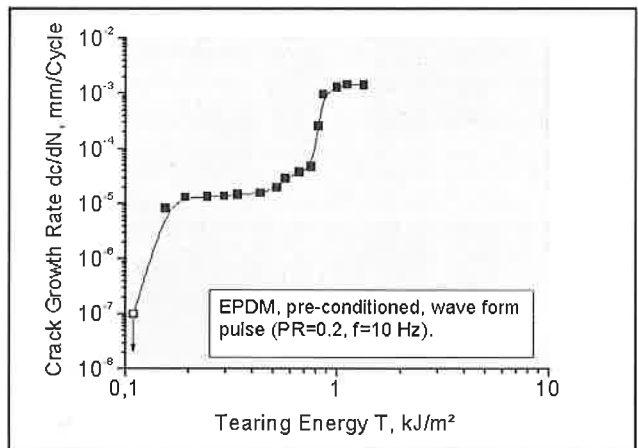
9. ábra. SBR/NR/BR gumikeverékből készült, szinuszos terhelésű fárasztott FWPS próbatest töretfelülete a repedés csúcs környezetében.



10. ábra. EPDM-ből készült, pulzáló terheléssel fárasztott FWPS próbatest töretfelülete a repedés csúcs környezetében.



11. ábra. A szinuszos terhelésű SBR/NR/BR gumikeverék fáradásos repedésterjedési görbéje



12. ábra. A pulzáló terhelésű EPDM gumi fáradásos repedésterjedési görbéje

mikroszkóppal (9. és 10. ábra), a távolabbi részeket pedig egy 3D kép elkészítésére alkalmas mikroszkóp kamerával vizsgáltuk. Ennek az elemzésnek az eredményeit egy következő munkában fogjuk ismertetni. A $c-N$ függvényekből a program meghatározta a repedésterjedési sebesség dc/dN értékeit. A következő ábrákon (11. és 12. ábra) a különböző terhelési módokkal (szinuszos és pulzáló) előterheléssel és e nélkül felvett fáradásos repedésterjedési diagramok láthatók a két vizsgált anyag esetén.

A terhelési jelalak hatása a fáradásos repedésterjedésre

Minden anyagnál, függetlenül az előterheléstől, a pulzáló terhelés balra tolta el a diagramot. Tehát a repedés-megindulás kritikus értéke (a T_{th} threshold tearing energy, a T energia küszöbértéke) kisebb pulzáló terhelés esetén. Ugyanakkor elmondható, hogy ez a hatás anyagokként különböző és az előterhelés mértéke ugyancsak befolyásolta a csökkenés mértékét. További elemzést igényel, hogy a pulzáló terhelésnél fellépő nagyobb nyúlássebességek, valamint az emiatt keletkező hiszterézis felmelegedés hogyan befolyásolja a folyamatot. Ugyancsak további elemzést igényel, a mikroszerkezet (homogenitás, többféle alkotórész jelenléte, a töltőanyag fajtája, mennyisége és eloszlása, valamint töltőanyag-mátrix kölcsönhatás) szerepe az egyes terhelési ciklusban bekövetkező és a terhelés alatt halmozódó károsodásban.

Az előterhelés hatása

A ciklikusan előterhelt próbatetek ugyancsak kisebb T_{th} értéket és valamivel meredekebb görbéket mutattak, azaz a repedés gyorsabban terjedt.

A vizsgált anyagok összehasonlítása

A vizsgált anyagok között jelentős különbségek tapasztalhatók. Ez már a vizsgálatok során is a szabályozás beállíthatósága, a repedés-csúcs felismerhetősége illetve kvázi egyenes vonalú repedésterjedés megjelenése közötti különbségekben jelentkezett. A vizsgált anyagok alapos összehasonlítása érdekében bemetszetlen FPWS próbatetekkel meghatároztuk a dinamikus mechanikai anyagjellemzőket (dinamikus merevség, K^* , K' és K'') valamint a fáziskülönbség értékeit, illetve ezek frekvencia-, átlagterhelés- és terhelésamplitúdó-függését is. Megjegyzendő, hogy ezek a mennyiségek a bemetszett próbatest fázisátvárási során is rendelkezésre állnak (a szoftver automatikusan számolja őket) és így a vizsgálatok értékelésébe bevonhatók.

Míg a vizsgálat során az SBR/NR/BR gumikeverékben a repedés viszonylag kis terheléseknél megindult és növekvő sebességgel terjedt, addig az EPDM-ben a repedés később indult meg és egyenletesen terjedt a tönkremenetelig (7. és 8. ábra). A fáradásos repedésterjedési görbe az első anyagnál jó közelítéssel lineáris (a log-log koordinátarendszerben) és a fémekhez hasonlóan hatványfüggvénnyel jól leírható, a másik anyag görbéje 3-4 különböző repedésterjedési folyamatot sejtet (11. és 12. ábra).

Összefoglalás

Mint sok más vizsgálatosorozat esetén, most is szembetaláltuk magunkat azzal a helyzettel, hogy minden egyes megválaszolt kérdés további megválaszolatlan kérdések sokaságát veti fel.

Kiindulási helyzet

Elastomerekből készült alkatrészekben az üzemelés során gyakran észleljük repedések megjelenését, kifáradást, illetve az ebből eredő tönkremenetelt. A következő kérdéseket kell a kutatási program során megválaszolni: a hagyományos vagy a törésmechanikai elven felépített vizsgálatok és elemzések, esetleg ezek valamilyen kombinációja alkalmas-e a fáradási folyamatok jellemzésére az ezeket leíró anyagjellemzők meghatározására? Az anyagok megbízható, precíz és az üzemelés körülményeit is figyelembevevő rangsorolása mellett, milyen módszerekkel és milyen paraméterekkel lehetséges elastomerek fáradásának a modellezése, szimulációja?

Eredmények

Az FWPS próbatest alapvetően alkalmas elastomerek fáradásos repedésterjedési vizsgálatára. A vizsgálatrendszer kielégítően működik

még nagy elmozdulások (15 mm), viszonylag nagy frekvencia esetén (10 Hz) még pulzáló terhelésnél is, és megbízhatóan elvégezhetőek hosszú idejű sorozatmérések is. Az anyagok közötti jelentős különbségek összhangban vannak a gyakorlatban észlelt viselkedéssel, az élettartamban megjelenő különbségekkel.

Problémák

Nagy kérdés a fáradásos repedésterjedési görbe függése a próbatest geometriától, azaz a mért mérőszámok mennyiben tekinthetők anyagjellemzőnek? Melyek a vizsgáló rendszer korlátai erővezérlésnél és növelt vagy alacsonyabb hőmérsékleten? A tearing energy koncepció valóban alkalmas-e finomabb különbségek megjelenítésére is és legalább közelítőleg alkalmas-e a gyakorlatban észlelt károsodási folyamatok jellemzésére?

Javaslat további vizsgálatokra

A töretfelületek részletes elemzése segítheti a repedéskeletkezés és -terjedés mikromechanikai folyamatainak pontos meghatározását. Lehetővé teszi annak meghatározását, hogy a különböző alpmátrixok, ezek keverékei (blendjei) töltőanyagokkal erősített változatai melyik típusú mikromechanikai károsodási folyamat megjelenését és lefolyását támogatják (pl. mikrorepedések vagy üregképződés és összenövés). További elemzést igényel a repedéscsúcs alakváltozási állapotának (nyúláseloszlás) és hőmérsékletének (hiszterézis felmelegedés) változása a fázisátvárási vizsgálatok során. Ehhez egyrészt a meglévő mérés technika további fejlesztése (videoextenzométer, termokamera) másrészt a repedésletompulás és az aktív kohéziós zóna egymásra hatásának mechanikai elemzése szükséges.

Abstract

Fatigue test methods development for elastomers. Included in the investigations were 5 various elastomer types used in engineering applications typically. All fatigue tests reported here were run on a high rate servohydraulic test system (MTS 831.59). To validate the proper fracture mechanics characteristic concepts various specimen configuration and geometry (including pure tensile, pure shear loading) were included in the investigations. The methods to be developed and implemented is based on the concept of the tearing energy, T [Young, 2001].

Pure shear specimen configuration revealed more stable, plane crack growth, than tensile specimens. In the former case, the crack length and thus the kinetics of crack growth could be measured more reliably. The *waveform shape* (sine and pulse loading) has been found to strongly influence the fatigue behaviour. A material dependent decrease of the critical tearing energy with increasing crack growth rate was observed with pulse shape loading. The latter effect is associated with the higher loading rate in the pulse than in the sinusoidal waveform. On the contrary, comparing preconditioned specimens and specimens without cyclic *preconditioning*, only small to negligible effects were observed. Furthermore, significant differences were obtained both in fatigue crack initiation and crack propagation behaviour between the *materials* investigated.

Irodalom

- Rivlin, R. S. és Thomas, A.G.: (1953) Rupture of Rubber. I. Characteristic Energy for Tearing. J. of Polym. Sci. 10: 291-318.
- Rivlin, R. S. és Thomas, A.G.: (1955) Journal of Polymer Science, Vol. X. No. 3, 291-318.
- Gent, A. N., Lindley, P. B. és Thomas, A.G.: (1964) J. of Applied Pol. Sci. Vol. 8, 455-466.
- Gent, A.N. (ed.): (1992) Engineering with Rubber, Chapters 6 and 7, Hanser Verlag, Munich
- Eisele, U, Kelbch, S. és Engels, H.-W.: (1992) Kautschuk + Gummi, Kunststoffe 45, Nr.12.
- Hocine, A.A, Abdelaziz, M.N. és Mesmacque, G.: (1998) Int. J of Fracture 94: 321-338.
- Yeoh, O.H.: (2001) Plast. Rub. And Comp. Vol. 30, No. 8, 389-397.
- Young, D.G.: (2001) Fatigue Crack Growth V1, July, Axel Products Inc.

- Mars, W.V. és Fatemi, A.: (2002) Int. J. of Fatigue 24 949-961
 – Mars, W.V. és Fatemi, A.: (2003) Rubber Chem. and Techn. (in press)
 – Legorju-jago, K. és Bathias, C.: (2002) Int. J. of Fatigue, 24, 85-92

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott vizsgálatokat a Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL)-nál végtük, 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.

Acknowledgments

Parts of this project were performed at the Polymer Competence Center Leoben GmbH within the Kplus-programme of the Austrian Ministry of Traffic, Innovation and Technology. The funding within this programme by the Governments of Austria, Styria and Upper Austria is gratefully acknowledged.

A szerző megjegyzése

A PCCL vezetésével a projektben résztvevő osztrák cégek és kutatóintézetek ez évben elnyerték az osztrák Gazdasági és Munkaügyi Minisztérium egyik STRAPAMO (stratégiai projekt az unióhoz csatlakozó kelet- és közép-európai államokkal) projektjét, ami Matelcomp néven fut és a következő résztvevőkkel indul várhatóan még ebben az évben: Polymer Competence Center Leoben GmbH. (mint fő pályázó) Institut für Werkstoffkunde und -prüfung der Kunststoffe, Institut für Allgemeinen Maschinenbau, mindkettő Leobeni Egyetem, Leoben, A,

Semperit GmbH, Wimpassing, A (gumiipar),
 Economos GmbH, Judenburg, A (műanyag- és gumifeldolgozás, tömítéstechnika),
 Erwin Mach GmbH, Hirm; A (gumifeldolgozás),
 ISOVOLTA AG, Werndorf, A (kompozit- és alapanyaggyártás),
 FACC AG, Ried im Innkreis, A (kompozitgyártás és szerkezeti elemek előállítása a repülőgépgyártáshoz),
 Bay Zoltán Logisztikai Intézet, Miskolc, H (magyar társ pályázó),
 Mechanikai Tanszék, Miskolci Egyetem, Miskolc, H
 Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, H
 Phoenix Rubber Co. (EMERGE Taurus), Budapest, H (gumiipar),
 Fux Rt., Miskolc, H (huzalgyártás),
 Budaplast Rt, Budapest, H (műanyag-feldolgozás, kompozit anyagok gyártása),
 SEM Center; Ljubljana, Slo (szlovén társ pályázó),
 Institut for Mechanics of Polymers and Composites, University of Ljubljana, Ljubljana, Slo.
 GoodYear Engineered Products Europe d.d., Kranj, Slo, (gumiipar),
 Plama Pur d.d., Podgrad, Slo (műanyag-feldolgozás, tömítéstechnika),
 Alpina d.d., Ziri, Slo (sportszergyártás, kompozit anyagok előállítása),
 Gorenje d.d., Velenje, Slo (háztartásigépgyártás, műanyag-feldolgozás).

A projekt célja a társországok cégei és kutatóhelyei közötti együttműködés kialakítása, kétoldali projekt létrehozása egy adott termék, technológia vagy mérési, vizsgálati eljárás kidolgozására, valamint közös európai projekt(ek) előkészítése.

Interlaminar mode I and mode II fracture toughness and intralaminar damage of textile composites

Dan Mihai Constantinescu** – Mircea Găvan** – Nicolae Constantin* – Hans Christian Goetting#

Összefoglalás

Textil kompozitok rétegek közötti törési szívósságának kísérleti meghatározása I. és II. terhelési módban

Az egy irányban rétegzett kompozitok rétegek közötti törési szívósságát a G_c kritikus energiatartalom sebességgel fejezik ki [(1) egyenlet].

A törésmechanikai vizsgálatokat – az ASTM és ESIS ajánlásainak megfelelően – az I. terhelési módban az ún. DCB kettős konzolos próbatestekkel, míg a II. terhelési módban az ún. ENF végein bemetszett három ponton hajlított próbatestekkel végezték (2. és 3. ábra). A próbatesteket rendezetlen és szőtt üvegszálakkal erősített poliészter illetve epoxigyanta kompozitból, valamint poliészter bőrből és rendezetlen üvegszál-szövetből rétegzett, poliuretánhab magú szendvics anyagból készítették, míg a mesterséges kezdő repedést (bemetszést) 10 μ m vastag műanyag fólia beágyazásával létesítették. A vizsgálatokat univerzális gépen, kezdetben, 10 mm repedésnövekmény eléréséig, 0,5 mm/min, majd 1 mm/min terhelési sebességgel végezték. Az erő-elmozdulás diagramot in situ adatgyűjtő rendszerrel rögzítették. A réteges elválás kezdetét a diagramon az iránytangens megváltozása jelzi. A G_c értékét az összetartozó erő és elmozdulás adatokból határozták meg.

Az I. terhelési módban végzett vizsgálatok a különböző anyagmintákra várt eltérő viselkedést igazolták. Jellemző erő-elmozdulás diagramokat a 4. és 5. ábra szemléltet. A stabil repedésterjedést és az R-görbékét még részletesen elemezni kell. A II. terhelési módban végzett vizsgálatoknál némelykor mutatkozott a repedés keletkezése és némi terjedése, más esetekben viszont csak nagy lehajlást követően, de a repedés terjedése nélkül (6. és 7. ábra). Vagyis, az ENF próbatestben gyakran nehéz a repedést megindítani. Úgy tűnik, hogy a négypontos hajlítási vizsgálat ígéretesebb.

A szendvics próbatestekben tapasztalt rétegen belüli károsodás (9. és 10. ábra) összetett jelenség, amely több kísérleti megfigyelést, gondos elemzést és numerikus modellezést igényel. A DCB próbatest érdekes szívóssági viselkedése (8. ábra) a helyi nemlineáris törési és károsodási mechanizmusnak tulajdonítható.

Introduction

The fracture behaviour of high performance composite laminates is a complex issue, involving both intralaminar damage mechanisms (e.g. matrix cracking, fibre cracking) and interlaminar damage (delamination). Some progress has been made lately in the development of analytical tools for the prediction of intralaminar damage growth, but similar tools for delamination characterisation are still not available. Without a better understanding of progressive failure, the fracture criteria and predictive capabilities will be limited. Delamination is one of the predominant forms of failure in laminated composites due to the lack of reinforcement in the thickness direction. The analysis of delamination is commonly divided into the study of initiation and the monitoring of the propagation of an already initiated defect. Delamination initiation is usually based on analysis of stresses in conjunction with a characteristic distance. This distance

*Professor, ** Senior Lecturer – Department of Strength of Materials, University Politehnica of Bucharest, Splaiul Independenței 313, 060032 Bucharest, Romania

Dipl. Phys. – DLR Institute of Structural Mechanics, Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig, Germany

+ Corresponding author: Dan Mihai Constantinescu,
 e-mail: dancon1@form.resist.pub.ro