



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

TÉZISFÜZET

**POLIMEREK, POLIMER KOMPOZITOK TARTÓS IDEJŰ KÚSZÁSI
VISELKEDÉSÉNEK ELEMZÉSE**

CÍMŰ TÉMAKÖRBŐL ÍRTA:

BAKONYI PÉTER
OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

PROF. DR. VAS LÁSZLÓ MIHÁLY
CÍMZETES EGYETEMI TANÁR

KONZULENS:

DR. NAGY PÉTER
EGYETEMI DOCENS

BUDAPEST
2013.

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetők

1. Bevezetés

A polimereket és polimer kompozit szerkezeti anyagokat különféle ipari alkalmazásokban egyre szélesebb körben használják. A polimerek mechanikai tulajdonságai szerkezetükön kívül a különböző környezeti változótól is erősen függhetnek, például a hőmérséklettől, a páratartalomtól, és ami még fontosabb, az időtől. Más anyagokkal, például a fémekkel ellentétben a hőre lágyuló polimerek még alacsony hőmérsékleteknél is jelentős kúszást és feszültségrelaxációt mutatnak, ami a tervező munkáját igen nehezíti. A kúszás a polimer anyag azon időfüggő, folyamatosan növekvő alakváltozás-válasza, amellyel az időben állandó feszültségterhelésre reagál.

A polimer és polimer kompozit alkatrészeket általában nem a terhelésfüggő tönkremenetelre, azaz a feszültségcsúcsból bekövetkező szakadásra, illetve törésre, hanem maximálisan megengedett deformációra szokás méretezni. A kúszás a szakítószilárdságnál és a folyáshatárnál kisebb feszültséget eredményező hosszú idejű terhelés hatására következik be, és magasabb hőmérsékleten, az olvadáspont felé tartva fokozódik. Az állandó, vagy ismétlődő terhelésnek kitett alkatrészek élettartama – amennyiben rendeltetésük ellátása szempontjából fontos a mérettartás – nem csak tényleges tönkremenetellel, hanem a növekvő deformáció okozta funkcióvesztéssel is véget érhet. Ha az alkatrész csak rövid ideig van kitéve a maximálisan megengedett deformációt elérő, vagy azt akár csak megközelítő hatásnak, nagy valószínűséggel hosszú ideig megbízhatóan képes lesz ellátni feladatát, ha azonban tartós terhelés éri, az anyag hosszú idejű viselkedéséről rendelkezésre álló kevés, és bizonytalan pontosságú információ miatt megfelelően nagy biztonsági tényezővel (anyagtöbblettel) kell tervezni. Például a centrifugális erő, mint terhelőerő miatt a nagysebességű, esetleg emelt hőmérsékleten üzemelő ventilátorlapát deformálódik, kúszik. A ventilátorház és a lapát éle közötti hézag – a lapát nyúlása miatti – eltűnésével a lapát és a fal között súrlódás lép fel, ami a motor leégéséhez, lapáttöréshez vezethet. A jelenség ellen a lapátok – egy adott üzemóra eltelté után történő – cseréjével lehet fellépni. A pontos tervezéshez egyúttal szükségesek a tönkremeneteli, illetve a tönkremenetelt előjelző információk is.

A kúszási viselkedés egyes anyagokra való kimérése, a folyamat feltérképezése nagyban segíti a tervezőt, hogy a megfelelő mennyiségű információ birtokában a biztonsági tényezőt és így az anyagfelesleget is csökkentse. A polimerek kúszási viselkedésének meghatározásáról szóló szabvány (MSZ EN ISO 899) két részből áll: az első rész a húzó-, a második rész a hajlító igénybevételből származó kúszási jelenségek vizsgálata során

alkalmazott próbatestekről, vizsgálati környezetről és módszerekről rendelkezik. Bár a kúszásmérések eszközeit, próbatesteit és fontosabb vizsgálati paramétereit szabványok határozzák meg, a hőre lágyuló polimerek, hőre keményedő gyanták és kompozitok hosszú idejű viselkedéséről kifejezetten kevés adat áll rendelkezésre, mert ezek a mérések a hagyományos mechanikai méréseknél sokkal idő- és költségigényesebbek.

Az alkatrész hosszútávú viselkedésének kimérése a piaci bevezetést késleltetné, így az ipar igényeire válaszul rövidebb idejű kúszásvizsgálatokra épülő, alap anyagmodelleket használó, vagy a hasonló hatások elvét figyelembe vevő módszerek használatával, mestergörbék felvételével becslik a kúszási viselkedést.

2. Szakirodalom elemzése, az értekezés célja

A kúszási viselkedés leírására a szakirodalomban elterjedten használják egyrészt a rövid idejű kúszásvizsgálatok segítségével meghatározott, a mért anyagtulajdonságokon alapuló, idealizált anyagmodellekből – úgymint a Hooke-törvényt követő ideálisan rugalmas, vagy a Newton-törvényt követő ideálisan viszkózus elem – összeállított három, négy vagy több paraméteres rendszereket, valamint a hasonló hatások elvét (hőmérséklet-idő, terhelés-idő, stb.) figyelembe vevő mestergörbe szerkesztő eljárásokat. A viszkoelasztikus anyagviselkedés leírható az idealizált anyagmodelleken túl még Sherby-Dorn és Larson-Miller közelítés segítségével. A hasonló hatásokon alapuló mestergörbék létrehozhatók Arrhenius-függvény, Williams-Landel-Ferry egyenlet, illetve ezek kombinációjára épülő módszerekkel is a logaritmikus időtengely ($\lg a_T$) menti eltolással, illetve a sűrűség hőmérsékletfüggését figyelembe vevő ($\lg b_T$) ordináta eltolási tényező használatával.

A mestergörbéken és a heurisztikus összefüggéseken alapuló hosszútávú kúszásbecslések egyrészt csak az adott, kis terhelésre vonatkoznak, másrészt nem adnak információt a tönkremeneteli deformációra, illetve élettartamra vonatkozólag, így csak korlátozott mértékben segíthetik a tervezőket, hogy egy adott terméket az erőhatások és a környezet ismeretében teljes élettartamra méretezzenek, és becslést tudjanak adni az alkatrész várható tönkremeneteli idejére is.

Az alkalmazott technoklíma szemlélet szerint, mialatt az alkatrész a gyártása és használata során végigéli az életét, magába gyűjti az őt ért hatásokat. A szakító vizsgálatok során a próbatest, úgymond, felgyorsult módon éli le az életét, azaz gyűjti össze és tárolja az őt érő hatásokat. Ésszerű feltevésnek tűnik, hogy ez a mérés sok információt adhat az anyagi és a mechanikai viselkedéssel kapcsolatos különféle terhelési módokról is, sőt a rövidtávú vizsgálatok eredményeiből – megfelelő transzformációkkal – következtetni lehet a hosszútávú

viselkedésre. A Vas és Nagy által kidolgozott módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése polipropilén minták elsősorban deformációvezérelt szakító- és igen rövidtávú (20-30 perc) feszültségrelaxációs vizsgálatai alapján történt. Ugyanakkor nem dolgozták ki a vonatkozó, terhelési szinttől függő változótranszformációk és paramétereik meghatározási eljárását, nem dolgoztak ki módszert a hosszútávú terhelés során létrejövő tönkremenetel tervezéshez szükséges statisztikai jellemzőinek (eloszlás, szórás, konfidencia intervallum, kvantilisek, stb.) meghatározására sem.

Az egyre összetettebb szimulációs eljárások és módszerek mind több eszközt biztosítanak a tervezőknek a termék, a szerszám, és a gyártás megtervezésétől és szimulációs ellenőrzésétől egészen az anyagviselkedés modellezéséig. A tervezők részéről előbb-utóbb jogosan merül fel az igény, hogy a magasabb terhelésnek kitett, vagy extrém körülmények közt használt termékek életciklusát előre tudják valamilyen valós, egyszerű, de megbízhatóan leírt anyagviselkedésen, modellen alapuló szimulációs eljárással becsülni.

Jelen dolgozat célja a Vas és Nagy által kidolgozott [1, 2], az állandó terhelés melletti hosszútávú mechanikai viselkedést és a várható tönkremenetelt rövidtávú mérések és az ún. lineárisan viszkoelasztikus (LVE) differenciagörbe nemlineáris transzformáltja ($T=(T_1, T_2)$) alapján becslő módszer erővezérelt szakító- és kúszási folyamatot illető széleskörű kísérleti és statisztikai elemzése és a gyakorlati alkalmazhatósághoz szükséges elméleti és kísérleti feladatok elvégzése. A módszer részét alkotó, legkedvezőbb nemlineáris változótranszformációk meghatározása, illetve pontosítása különböző erősítőszál tartalmú anyagokból készült nagyszámú próbatesten végzett szakítóvizsgálatok, illetve középtávú kúszásmérések segítségével, a kúszási tönkremenetel statisztikai becslési módszerének kidolgozása, továbbá a hárompontos hosszútávú hajlító igénybevételű kúszásra való alkalmazás feltételeinek meghatározása.

Kitűzött feladatok:

- Erősítetlen, hőre lágyuló PP-en és különböző száltartalmú, üvegszál erősítésű PP kompozit próbatesteneken nagyszámú, szobahőmérsékletű szakítóvizsgálat és eltérő terhelési szinteken rövidtávú (többórás), húzóigénybevételű kúszásmérés végzése.
- A mérések elemzése:
 - Az átlagos szakítószilárdsági jellemzők, úgymint a szakadási nyúlás és szakítószilárdság, valamint a kezdeti rugalmassági modulus és a száltartalom kapcsolatának elemzése, leírása matematikai formulákkal.

- Az átlagos kúszási szakadási nyúlás számítása LVE differenciagörbéből, valamint ennek végpontjai által adott LVE becslések statisztikai, valószínűség eloszlás alapú leírása és a becsült nyúláshatár meghatározása a száltartalom függvényében.
- Az átlagos simított szobahőmérsékletű szakítógörbék statisztikai alapú közelítése a vizsgált száltartalmak mellett, valamint a kúszási szakadási nyúlásnövekmény meghatározása a felterhelési szinthez tartozó kezdeti nyúlásértékek függvényében.
- Az átlagos kúszásgörbe első LVE közelítésének (LVE differenciagörbe) T_1 transzformációjának és paramétereinek meghatározása, a becsült kúszási szakadási nyúlás száltartalomtól függő közelítése, valamint a kúszási szakadási nyúlás eloszlásfüggvényének vizsgálata, és a statisztikai határgörbék (kvantilisok, konfidencia intervallum) becslése.
- A T_1 transzformációval becsült kúszási szakadási nyúlás és a rövididejű kúszásmérések alapján a hosszútávú kúszásgörbék becsléséhez szükséges T_2 időtranszformációs függvény és paramétereinek meghatározása, valamint a kúszási szakadási idő (élettartam) átlagértékének becslése a kúszásterhelési szint függvényében.
- A fent nevezett anyagokon erővezérelt hárompontos hajlítóvizsgálatok, valamint hajlító igénybevételű rövididejű kúszásvizsgálatok végzése szobahőmérsékleten és az eredmények összevetése a húzó igénybevételű vizsgálatoknál tapasztaltakkal. Céлом továbbá, a húzó igénybevételű kúszási viselkedés leírására kidolgozott módszer használhatóságának bizonyítása hajlító igénybevételű kúszási tulajdonságok becslésére.
- Szakítógépen, illetve DMA készüléken különböző terhelési szinteken, illetve hőmérsékleteken végzett húzó- illetve hajlítóterhelés melletti kúszásmérések alapján a hosszútávú kúszási viselkedést becsülő mestergörbék meghatározása illetve a rövidtávú mérésekből becsült tönkremeneteli deformáció alapján a kúszási élettartam mestergörbe alapú becslése.

3. Felhasznált anyagok és módszerek áttekintése

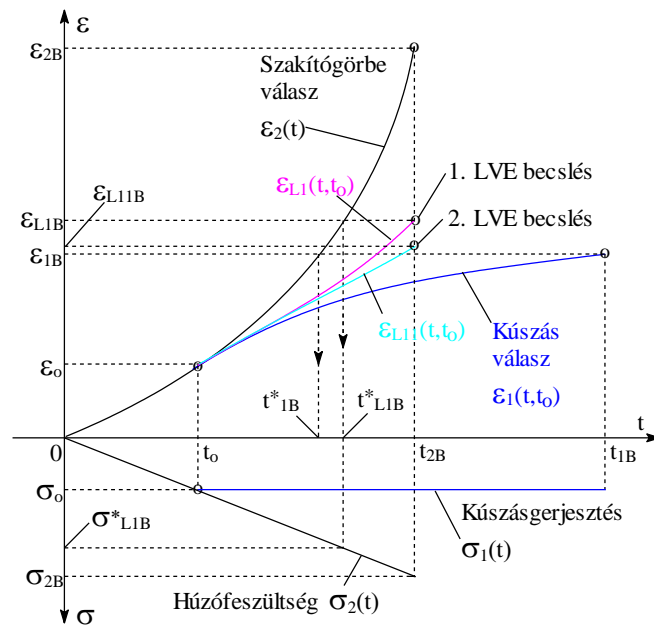
Az erősítetlen, és az üvegszállal erősített hőre lágyuló fröccsöntött kompozit próbatestek mátrixanyagaként a Tiszai Vegyi Kombinát által gyártott, vékonyfalú csomagolóedények, háztartási, konyhai, gyógyászati felszerelések és játékok alapanyagának ajánlott H 949A típusú izotaktikus polipropilén homopolimert alkalmaztam. Erősítőanyagaként a Johns Manville csehországi üzemében 2005-ben gyártott SV EC 13 473

típusú, PP-hez felületkezelt vágott üvegszálat használtam. A mátrix és az erősítőszálak közti kapcsolatot javítandó, az üvegszáltartalom tömegének 2%-át kitevő Orevac CA100 (Arkema, Franciaország) maleinsav-anhidriddel ojtott polipropilént kevertem az extrudált 5, 10, 20, 30 és 40 m% száltartalmú fröccsöntő granulátumba, amelyeket Brabender Plasti-Corder (USA) számítógép vezérlésű extruder berendezésen, 190-210-210-230°C zónahőmérsékletek mellett állítottam elő. Az eltérő termikus előélet elkerülése végett a fröccsöntéshez használt erősítetlen PP granulátumot is extrudáltam, majd ledaráltam az SB Plastics Machinery (Olaszország) berendezésén.

A kúszásvizsgálathoz az ISO 527-2-es szabvány szerinti 1A típusú próbatesteket fröccsöntöttem Arburg Allrounder 320C 500-170 berendezésen, a következő beállítások mellett: a fröccsöntési térfogat (44 cm^3), az átkapcsolási pont (12 cm^3) és a befröccsöntési sebesség ($50 \text{ cm}^3/\text{sec}$) minden töltöttségi szint mellett azonos volt, a fröccsnyomást (700–1000 bar) és az utónyomást (500–700 bar) az üvegszál tartalom növekedésével szükség esetén növeltem. A csiga kerületi sebessége (15 m/perc), a temperált szerszám hőmérséklete (40°C) és az egyes zónákra vonatkozó hőmérsékleti beállítások ($175\text{-}180\text{-}185\text{-}190\text{-}195^\circ\text{C}$) a gyártás folyamán nem lettek megváltoztatva.

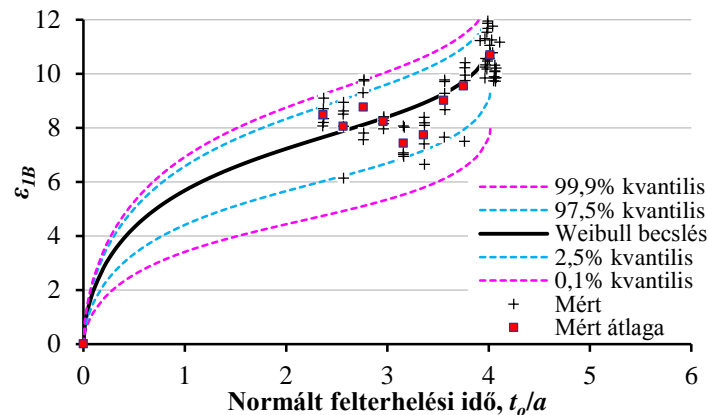
Az előállított erősítetlen és kompozit próbatesteken erővezérelt szakító és hajlítóvizsgálatokat, valamint különböző terhelési szinteken szobahőmérsékletű, illetve azonos terhelési szinten, de különböző vizsgálati hőmérsékleteken kúszásvizsgálatokat végeztem univerzális szakítóberendezés és dinamikus mechanikai analizátor (DMA) segítségével. A kúszásvizsgálati eredményekből a hasonló hatások elvének segítségével hőmérséklet-idő, terhelés-idő szuperpozíció felhasználásával mestergörbékét határoztam meg.

Az erővezérelt szakító- és hárompontos hajlítóvizsgálatok szolgáltatják a fejlesztett kúszásbecslési módszer alap információit. Az ezeket közelítő függvénytől t_0 időpillanatban válik el – a felterhelési sebesség ismeretében – az ezen felterhelési idővel jellemezhető kúszásgörbe (1. ábra). A szakítógörbe t_0 felterhelési és t_{2B} tönkremeneteli időpontok közötti szakaszának egyfajta deriváltja adja a kúszásgörbe első lineárisan viszkoelasztikus (LVE) becslését. Ennek T_1 transzformáltja állítja elő a kúszásgörbe második LVE becslését, amely mint egy tömörített kúszásgörbe értelmezhető, és segítségével a kúszási szakadási nyúlás becsülhető. A T_2 transzformált a második LVE becslést az időben megnyújtva becsli a kúszásgörbe hosszútávú deformációs és tönkremeneteli viselkedését.



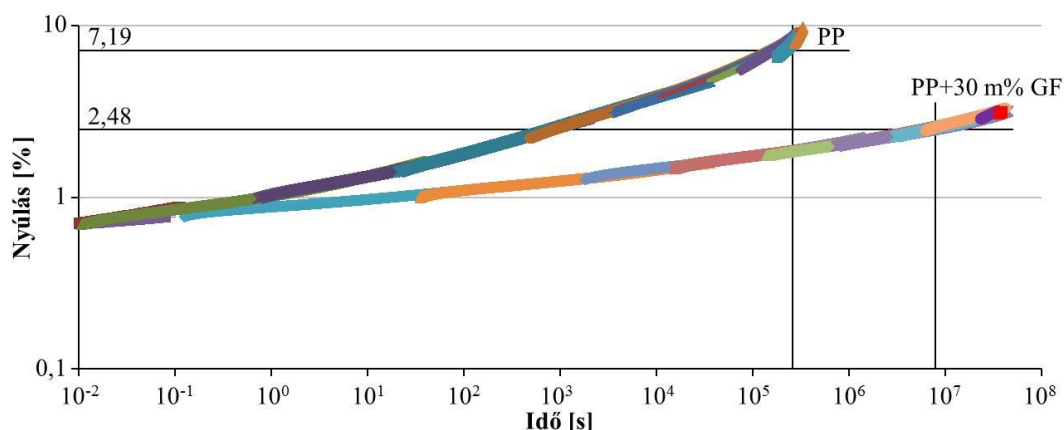
1. ábra. Az alkalmazott kúszásbecslési módszer elvének bemutatása

A kúszási szakadási nyúlás statisztikai jellemzőinek, úgymint a szórásintervallum, az alsó- és felső kvantilisok és konfidencia intervallum tetszőleges kúszásterhelés szintre való meghatározásával (2. ábra) előállítható a kúszásgörbe és a kúszási szakadási nyúlás várható értékének alsó és felső becslése.



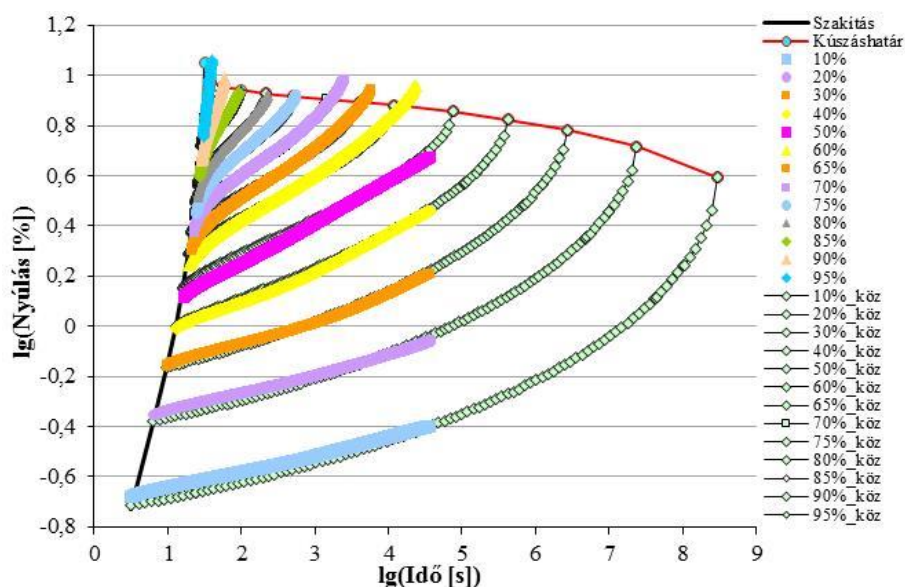
2. ábra. A kúszási szakadási nyúlás rövidtávú kúszásmérések és a Weibull eloszlás alapján becsült kvantilis-, átlagérték- és konfidencia intervallum görbéi

A kidolgozott kúszásbecslési módszer segítségével már egy valamely bevett hasonlósági elv (hőmérséklet-idő vagy terhelési szint-idő) szerint előállított mestergörbe és a második LVE becslés meghatározásával is kiadódik becsült kúszási szakadási nyúlás és a mestergörbe metszéspontjaként a becsült átlagos kúszási szakadási idő (t_{1B} átlaga), azaz az átlagos élettartam (3. ábra).



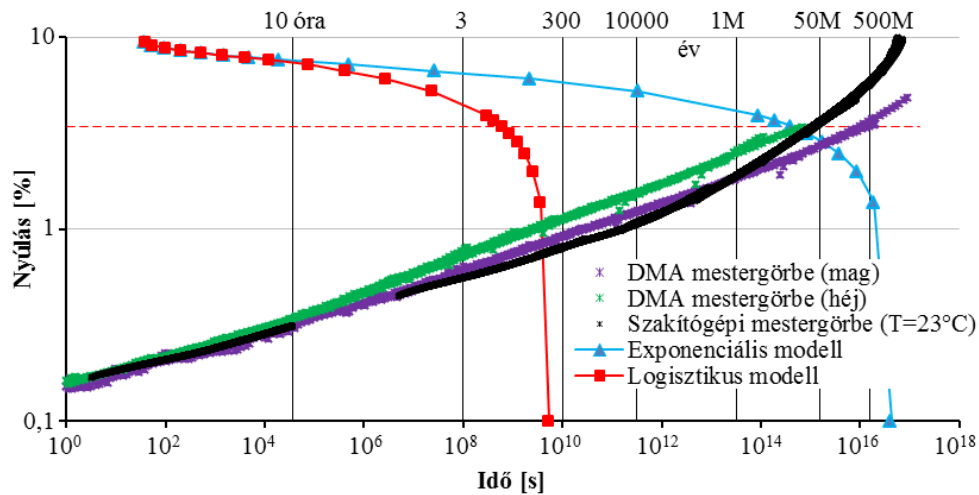
3. ábra. Kúszási élettartam meghatározása a becsült kúszási szakadási nyúlás és a mestergörbék metszéspontjaként (Terhelés: a húzószilárdság 50%-a, Hőmérséklet: 23±1°C)

A T_2 transzformációs függvény és paramétereinek meghatározásával – amely logaritmus-exponenciális formában volt identifikálható – mestergörbék nélkül is becsülhetővé vált a hosszútávú kúszási görbe és a kúszási élettartam (4. ábra).



4. ábra. Hosszútávú kúszásgörbék és a tönkremeneteli határgörbe becslése a T_2 transzformáció és a rövidtávú kúszásgörbék alapján

Ugyanakkor irreális, az öregedést figyelembe nem vevő kúszási élettartam előrejelzések (átlagos élettartam és a terhelés összefüggése exponenciális modell szerint) adódtak, amelyek viszont jó egyezést mutattak a mestergörbék metszéspontjával meghatározott élettartammal (5. ábra). A polimer anyagok mechanikai terhelés nélkül is öregednek, degradálódnak, és pl. a PP élettartama a tapasztalatok szerint legfeljebb 100 éves nagyságrendű [3, 4]. A fizikai és kémiai öregedést figyelembe vevő módosított becsléssel (logisztikus modell) már reális kúszási élettartambecslések adhatók.



5. ábra. Mestergörbék és kúszási élettartam előrejelzések (exponenciális és logisztikus modell) bemutatása

A kidolgozott eljárás egyik gyakorlati jelentősége abban rejlik, hogy a más módszerrel, de ismert terhelési és mérési mód esetén meghatározott mestergörbék segítségével is lehetséges az átlagos kúszási tönkremeneteli deformáció adta szinttel való metszéspont időkoordinátájaként a becsült átlagos élettartam meghatározása. Alkalmazhatóságát tovább javítják a kúszási tönkremeneteli deformációra és élettartamra meghatározható törési statisztikák (pl. szórás, az átlagértékre vonatkozó konfidencia intervallum, illetve kvantilisértékek). Egy a kidolgozott eljárásra alapozott, a háromdimenziós pl. végeeselemes tervezőprogramba épülő kiegészítő program-modullal az alkalmazott terhelés és az üzemi körülmények ismeretében akár még a tervezés fázisában becsülhetővé, sőt tervezhetővé válik a tönkremeneteli deformáció és élettartam. Az elért eredményeket mutatják be a 7 pontban megfogalmazott tézisek.

Hivatkozott irodalom

- [1] Vas L.M., Nagy P.: Investigating the time dependent behavior of thermoplastic polymers under tensile load. *Macromolecular Symposia*, 239, 176-181 (2006).
- [2] Nagy P., Vas L.M.: Relationship between constant strain rate and stress relaxation behavior of polypropylene. *Express Polymer Letters*, 1, 84-91 (2007).
- [3] PipeLife PP-R melegvíz hálózati és fűtési csőrendszer katalógus (2013) http://www.pipelife.hu/media/hu/Katalogusok/PP-R_katalogus.pdf
- [4] ParaLink georács, Turbosider Hungária Kft. (2013) <http://www.tubosider.hu/georacs>

4. Tézisek

1. Tézis. Az átlagos szakítószilárdsági jellemzők és a száltartalom kapcsolata

Kimutattam, hogy a vizsgált erősítetlen és üvegszálerősítésű PP anyagok állandó sebességű, húzóerőgerjesztéssel, szobahőmérsékleten végzett húzóvizsgálattal meghatározott átlagos szakítónyúlása ($\bar{\varepsilon}_{2B}$) exponenciális jelleggel csökken, míg átlagos szakítószilárdsága ($\bar{\sigma}_{2B}$) logisztikus görbét követve nő a vizsgált tömeg szerinti (bekeverési) száltartalom $0 \leq \varphi \leq 40$ m% tartományában:

$$\bar{\varepsilon}_{2B}(\varphi) = \varepsilon_{2B0} + \varepsilon_{2B1} \cdot e^{-\frac{\varphi}{b_1}} + \varepsilon_{2B2} \cdot e^{-\frac{\varphi}{b_2}} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_B(\varphi) = \frac{\dot{\sigma}_0 \cdot t_\infty}{1 + (t_\infty/t_0 - 1) \cdot e^{-\varphi/\varphi_0}} \quad (2)$$

ahol $\varphi = \varphi_f$ [m%] a tömeg szerinti száltartalom, míg $\varepsilon_0=2,8\%$; $\varepsilon_{01}=6,367\%$; $\varepsilon_{02}=2\%$; $\varphi_1=2$ m% és $\varphi_2=18,65$ m% a legkisebb négyzetek módszerével illesztett állandók. A vizsgált anyagok esetén a regressziós illesztésből kapott paraméterek értékei a logisztikus illesztés alapján $\dot{\sigma}_0=1,25$ MPa/s, $t_0=32,1$ s, $\varphi_0=15,773$ m%, és $t_\infty=93$ s illesztett állandók és $R^2=0,997$.

Kimutattam továbbá, hogy a fenti anyagok erőgerjesztésű hajlítóvizsgálatával meghatározott átlagos törési lehajlása (\bar{f}_{2B}) ugyancsak az (1), illetve átlagos törőereje (\bar{F}_{2B}) a (2) összefüggéssel írható le. Hajlítás esetén a regressziós paraméterek az (1) összefüggéshez $f_\infty=3,8$ mm; $f_{01}=5,8$ mm; $f_{02}=6,0$ mm; $\varphi_1=3,4$ m%; $\varphi_2=30$ m% és az illesztés jósága $R^2=99,83\%$, illetve a (2)-hoz $\dot{F}_0=20$ N/s; $t_\infty=15,4$ s; $t_0=2,2$ s; $\varphi_0=15,15$ m%, ahol az illesztés jósága $R^2=99,63\%$.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [5-7, 9]

2. Tézis. Az átlagos kúszási szakadási nyúlás LVE becslésének Weibull-alapú leírása

Kimutattam, hogy az átlagos kúszási szakadási nyúlásnak az átlagos szakítógörbéből számított LVE differenciagörbe végpontjai által meghatározott LVE becslése az alábbi, Weibull-eloszlás alapú összefüggéssel közelíthető a vizsgált száltartalom tartományban tetszőleges nyúlásterhelés (t_0) mellett:

$$\bar{\varepsilon}_{L1B}(t_0) = E(\varepsilon_{L1B}(t_0)) = \varepsilon_{L1B\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{t_0}{a}\right)^k} \right), \quad 0 \leq t_0 \leq \bar{t}_{2B} \quad (3)$$

ahol \bar{t}_{2B} az átlagos szakadási idő. Az aszimptotikus nyúláshatár ($\varepsilon_{L1B\infty}$), valamint a skála (a), illetve modulus (k) paraméterek és a száltartalom összefüggése az alábbi formulákkal írható le ($0 \leq \varphi \leq 40$ m%):

$$\varepsilon_{1B\infty}(\varphi) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 e^{-\frac{\varphi}{b_1}} + \varepsilon_2 e^{-\frac{\varphi}{b_2}} \quad (4)$$

$$a(\varphi) = a_\infty e^{-be^{-c\varphi}} \quad (5)$$

$$k(\varphi) = k_0 + (k_\infty - k_0)(1 - e^{-c\varphi}) = k_\infty + (k - k_0)e^{-c\varphi} \quad (6)$$

ahol a vizsgált anyagok esetében $\varepsilon_0=7,2\%$; $\varepsilon_1=3,9\%$; $\varepsilon_2=1,4\%$; $b_1=1,5$ m%; $b_2=20$ m%; $R^2=0,9545$; $a_\infty=189$ s; $b=3,15$; $c=0,125/\text{m}\%$; $R^2=0,9948$; $k_0=0,5875$; $k_\infty=0,718$; $c=0,2/\text{m}\%$; $R^2=0,714$ az illesztett konstansok és az illesztés jósága.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [10, 11]

3. Tézis. Az átlagos szakítógörbék Weibull alapú leírása

Kimutattam, hogy a vizsgált erősítetlen és üvegszálerősítésű PP állandó sebességű húzóerőgerjesztésre, szobahőmérsékleten adott átlagos $\bar{\varepsilon}_2(t)$ nyúlásválasza (szakítógörbéje) az alábbi, Weibull-alapú formulával írható le a terheletlen állapottól a szakadásig terjedő $[0, \bar{t}_{2B}]$ időtartományban:

$$\bar{\varepsilon}_2(t) = \bar{\varepsilon}_{2B} - \varepsilon_{1B\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t}{a}\right)^k} \right), \quad 0 \leq t \leq \bar{t}_{2B} \quad (7)$$

ahol $\varepsilon_{1B\infty} > \bar{\varepsilon}_{2B}$ az aszimptotikus nyúláshatár, az a időállandó (Weibull-skálaparaméter) és k Weibull-modulusparaméter, amelyek a $0 \leq \varphi \leq 40$ m% tartományban rendre a (4)-(6)-al meghatározott értékek.

Kimutattam, hogy a (7) alapján az átlagos kúszásgörbe, illetve a kúszási szakadásig terjedő nyúlásnövekmény első LVE becslése a következő összefüggésekkel adható meg:

$$\bar{\varepsilon}_{L1}(t, t_0) = \varepsilon_{1B\infty} \left(e^{-\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t}{a}\right)^k} - e^{-\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t+t_0}{a}\right)^k} \right), \quad 0 \leq t, t_0 \leq \bar{t}_{2B} \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_{1B}(t_0) - \varepsilon_0 = \varepsilon_{1B\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{t_0}{a}\right)^k} + e^{-\left(\frac{\bar{t}_{2B}}{a}\right)^k} - e^{-\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t_0}{a}\right)^k} \right), \quad 0 \leq t_0 \leq \bar{t}_{2B} \quad (9)$$

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [10, 11]

4. Tézis. Az átlagos kúszásgörbe és a kúszási szakadási nyúlás T_1 transzformációja

Kimutattam, hogy a vizsgált erősítetlen és üvegszálerősítésű PP esetén a mérhető átlagos kúszási szakadási nyúlás ($\bar{\varepsilon}_{1B}(t_0)$) első LVE közelítése ($\bar{\varepsilon}_{L1B}(t_0)$) alábbi T_1 lineáris transzformáltjával becsülhető, hosszútávú kúszásmérések nélkül, tetszőleges kúszási terhelés (t_0) mellett a $0 \leq \varphi \leq 40\%$ száltartalom tartományban:

$$\bar{\varepsilon}_{1B}(t_0) \approx \bar{\varepsilon}_{L1B}(t_0) = (1 - c)\varepsilon_0 + c\varepsilon_{L1B\infty} \left(1 - e^{-\left(\frac{t_0}{a}\right)^k} \right) \quad (10)$$

ahol $\varepsilon_0 = \bar{\varepsilon}_2(t_0)$ a kezdeti nyúlásterhelés, $\varepsilon_{L1B\infty}$ az aszimptotikus nyúláshatár és c lineáris transzformációs paraméter. A c értéke és a száltartalom összefüggése:

$$c = c_0 + \frac{c_1 \cdot \varphi^n}{1 + b \cdot \varphi^n} \quad (11)$$

ahol $c_0=0,7$; $c_1=0,0243$ (m%)⁻ⁿ; $b=0,0310$ (m%)⁻ⁿ; $n=3/2=1,5$ és $R^2=2,48\%$.

Az átlagos kúszásgörbe ($\bar{\varepsilon}_1(t, t_0)$) második LVE becslését ($\bar{\varepsilon}_{L11}(t, t_0)$) az első becslés ($\bar{\varepsilon}_{L1}(t, t_0)$) T_1 transzformáltja adja, amelynek végpontja az átlagos szakadási nyúlás (10) becslése:

$$\bar{\varepsilon}_{L11}(t, t_0) = T_1(\bar{\varepsilon}_{L1}(t, t_0)) = (1 - c)\varepsilon_0 + c\bar{\varepsilon}_{L1}(t, t_0) \quad (12)$$

Kimutattam továbbá, hogy a (10) görbének $c>1$ esetén maximuma van, azaz a kúszási szakadási nyúlás nagyobb lehet a szakítónyúlásnál s a maximumhely növekvő c -értékek mellett a szakadási nyúlás félértéke felé tolódik, míg $0<c\leq 1$ esetén a görbe szigorúan monoton növekedő.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [10, 11]

5. Tézis. A kúszási szakadási nyúlás statisztikai jellemzői

Kimutattam, hogy a kúszási szakadási nyúlás első LVE becslése a vizsgált száltartalom tartományban tetszőleges kúszásterhelés mellett az alábbi Weibull-eloszlással adható meg ($z>0$ az eloszlásfüggvény változója):

$$Q_{\varepsilon_{L1B}}(z, t_0) = P(\varepsilon_{L1B}(t_0) < z) = 1 - e^{-\left(\frac{z}{z_0}\right)^\beta} \quad (13)$$

ahol a kúszásterheléstől függő z_0 skálaparamétert a várhatóérték határozza meg:

$$z_0(t_0) = \frac{E(\varepsilon_{L1B}(t_0))}{\Gamma(1+1/\beta)} = \frac{\varepsilon_{L1B\infty}}{\Gamma(1+1/\beta)} \left(1 - e^{-(t_0/a)^k}\right) \quad (14)$$

míg a β modulusparaméter a kúszásterheléstől független, csak a száltartalomtól függő érték, amely az alábbi kifejezés inverzeként kapható:

$$V_{L1B} = V(\varepsilon_{L1B}(t_0)) = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/\beta)}{\Gamma^2(1+1/\beta)} - 1} \quad (15)$$

ahol V_{L1B} az ε_{L1B} relatív nyúlása, amely a száltartalomtól az alábbi módon függ:

$$V_{L1B} = v_0 + (v_1 - v_0) \cdot e^{-v_2 \varphi} \quad (16)$$

ahol $v_0=0,028$; $v_1=0,1007$; $v_2=0,37/\text{m}\%$ és $R^2=2,57\%$.

Kimutattam továbbá, hogy a mérhető kúszási szakadási nyúlás eloszlásfüggvénye az $\varepsilon_{L11B}(t_0)$ második LVE becslés T_1 transzformáció felhasználásával kapható háromparaméteres Weibull eloszlásával írható le ($(z \geq (1 - c) \cdot \varepsilon_0)$, az eloszlásfüggvény változója):

$$Q_{\varepsilon_{1B}}(z) = P(\varepsilon_{1B}(t_0) < z) \approx P(\varepsilon_{L11B}(t_0) < z) = 1 - e^{-\left(\frac{z-(1-c)\cdot\varepsilon_0}{c\cdot z_0(t_0)}\right)^\beta} \quad (17)$$

Kimutattam, hogy a (17) háromparaméteres Weibull-eloszlás alapján az egyedi kúszási szakadási nyúlásértékekre szórásintervallum, alsó- (0,1%) és felső (99,9%) kvantilis határgörbék, valamint az átlagértékre adott valószínűségi szinthez tartozó konfidencia intervallum határgörbék szerkeszthetők, amelyek segítségével tervezhetővé válik a vonatkozó termék hosszútávú deformációs viselkedése és tönkremenetele.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [10, 11]

6. Tézis: *A kúszási élettartam meghatározása*

Kimutattam, hogy a szakítóvizsgálati időértékeket megfelelő kúszási időértékekbe képező T_2 transzformáció az alábbi, invertálható logaritmikus-exponenciális transzformációs függvénnyel (h) valósítható meg:

$$\begin{aligned} t_2 = h(t_1) &= t_0 + (\bar{t}_{2B} - t_0) \left[\frac{\lg(t_1/t_0)}{\lg(\bar{t}_{1B}/t_0)} \right]^\gamma \\ t_1 = h^{-1}(t_2) &= t_0 \left[\frac{\bar{t}_{1B}}{t_0} \right]^{\left(\frac{t_2 - t_0}{\bar{t}_{2B} - t_0} \right)^{1/\gamma}} \end{aligned} \quad (18)$$

ahol a \bar{t}_{1B} és $\gamma > 0$ az adott kúszásterheléshez tartozó átlagos kúszási élettartam és kitevő. A \bar{t}_{1B} átlagos élettartam és a t_0 felterhelési idő kapcsolata az alábbi logisztikus görbével közelíthető:

$$\bar{t}_{1B} = \bar{t}_{2B} \frac{(1+\delta)e^{\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t_0}{t_D}\right)^{d_1}}}{1+\delta e^{\left(\frac{\bar{t}_{2B}-t_0}{t_D}\right)^{d_2}}} \quad (19)$$

ahol a $0 < t_D$ [s] skálaparaméter, a $0 < \delta < 1$ logisztikus hatásparaméter és a kitevőkre $1 < d_2 < d_1$ áll fenn.

Kimutattam, hogy egy adott nyúlásterhelés mellett meghatározott kúszási mestergörbe, vagy a kúszásgörbe második LVE becslésének a nemlineáris T_2 időtranszformációval előállított becslése, valamint a kúszási szakadási nyúlás (10)-el becsült átlagértékével, mint a kúszási nyúlás határszintjével kapható metszéspontja segítségével becsülhető a kúszási élettartam, és a kúszási szakadási nyúlás konfidencia intervallum határai hasonló alkalmazásával alsó és felső becslés tehető.

7. Tézis. *Átlagos hajlítószilárdsági és hajlítókészési jellemzők*

Kimutattam, hogy az erőgerjesztéssel végzett hárompontos hajlítóvizsgálatok és hajlító igénybevételű kúszásvizsgálatok eredményei az átlagos viselkedés szempontjából a húzóterhelés esetére kidolgozotthoz hasonló elméleti és gyakorlati módszerekkel kezelhetők, és a várható tönkremeneteli jellemzők lényegi változtatás nélkül, hasonló módon becsülhetők. A tézishoz kapcsolódó publikációk: [6, 8]

5. A tézisekhez kapcsolódó fontosabb irodalmak listája

- [5] **Bakonyi P.**, Vas L.M., Nagy P.: Comparison of long term creep behavior of PP and its glass fiber reinforced composite in Proceedings of ECCM 14, 14th European Conference on Composite Materials, Budapest, Magyarország (2010).
- [6] **Bakonyi P.**, Vas L. M.: Üvegszállal erősített polipropilén kompozitok kúszási tulajdonságainak jellemzése. Műanyag és Gumi, 49, 348-353 (2012).
- [7] **Bakonyi P.**, Vas L. M.: Analysis of the creep behavior of polypropylene and glass fiber reinforced polypropylene composites. Materials Science Forum, 729, 302-307 (2013).
- [8] **Bakonyi P.**, Vas L. M.: Glass fiber content dependent flexural creep behavior of polypropylene composite in Proceedings of 4th ITMC International Conference, Roubaix, France, 171-176 (2013).
- [9] Vas L.M., **Bakonyi P.**, Nagy P.: Investigation of the Creep Behavior of PP and its Estimation from Constant Force Rate Tensile Measurements. in Proceedings of GÉPÉSZET 2008, 6th Conference on Mechanical Engineering, Budapest, (2008).
- [10] Vas L. M., **Bakonyi P.**: Estimating the creep failure strain of PP at different load levels based on short term tests and Weibull characterization. Express Polymer Letters, 6, 987-996 (2012).
- [11] Vas L. M., **Bakonyi P.**: Creep Failure Strain Estimation of GF/PP Composites based on short term tests and Weibull characterization. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 32, 34-41 (2013).