RADIÁLIS TENGELYTÖMÍTÉSEK KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS VIZSGÁLATA

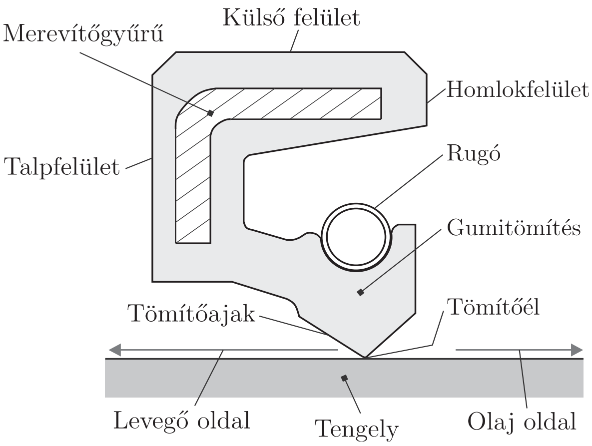
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF RADIAL SHAFT SEALS

Fazekas Bálint[1], tanársegéd, fazekas.balint@gt3.bme.hu
Goda Tibor[1], DSc, egyetemi tanár, goda.tibor@gt3.bme.hu
[1]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék

ABSTRACT
This paper deals with the mechanical investigation of an FKM rubber-based radial shaft seal. One of the most important technical parameters is the radial force that was measured experimentally and simulated using a 2D axisymmetric finite element model. The hyper-viscoelastic model parameters of the rubber were determined based on dynamical and quasi-static tests. The radial force values measured at 6 and 25 °C were compared to the simulated ones, and very good agreement was found in every case studied.

BEVEZETÉS

A radiális tengelytömítés az egyik leggyakrabban alkalmazott védőtömítések egyike, köszönhetően az egyszerű és kompakt felépítésének, a kiforrott gyártástechnológiának, valamint a működése közben fellépő kedvező súrlódási viszonyoknak. Feladata, hogy megakadályozza az egymással közvetlenül érintkező térrészek közötti közvetlen kenőanyag (pl. olaj) áramlást és szivárgást, valamint, hogy a berendezések egyes részeit védje a külső hatásoktól (pl. por, nedvesség) [1]. A radiális tengelytömítések az érintkező, forgó, dinamikus tömítések csoportjába sorolható. Az 1. ábra egy ilyen tömítés felépítését szemlélteti, feltüntetve a főbb szerkezeti elemeket [2].



1. ábra. A radiális tengelytömítés keresztmetszetének sematikus ábrázolása.

A gumitömítések leggyakoribb alapanyagai a akrilnitril-butadién kaucsuk (NBR), a poliuretán (PU) és a fluoroelasztomer (FKM).

A radiális tengelytömítések működése közben fellépő radiális erő mérése és numerikus módszerekkel történő előrejelzése a tömítések tervezése és fejlesztése során elengedhetetlen, hiszen ez az erőkomponens közvetlenül kapcsolatban áll a tömítések tönkremenetelével (pl. szivárgás) és a kopásával. Ha értéke túl kicsi, akkor a tömítés nem tudja kompenzálni a tengely forgásából és esetleges excentricitásából származó rezgéseket, vagy a tengely köralaktól való makroeltéréseit (pl. hullámosság), ami szivárgáshoz vezet. Ezzel szemben, ha túl nagy a radiális erő értéke, akkor jelentősen csökkenhet a tömítés élettartama, hiszen a súrlódásból adódó nyomaték miatt jelentős kopás és végső soron öregedés lép fel a gumitömítés szerkezetében, ráadásul a tengely felületén is jelentőssé válhat a kopás. Éppen ezért a radiális tengelytömítések leggyakoribb tönkremeneteli oka a túl nagy előfeszítésből adódó kontakt nyomásra vezethető vissza [3].

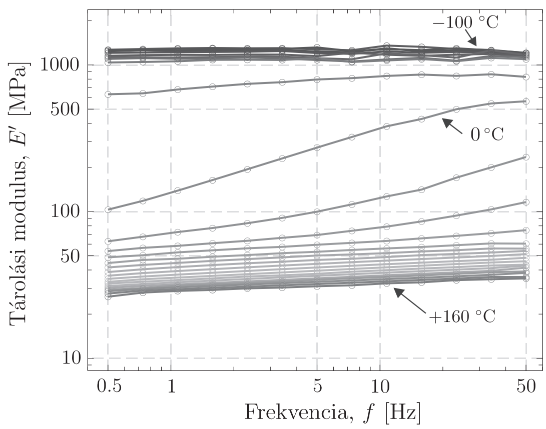
A radiális erő a szorítórugó merevségéből, illetve a túlfedés (a tengely és az tömítőél közötti átmérőkülönbség) okozta deformációból származik. A rugó beépítésének célja, hogy kompenzálja a tömítőajak feszültségrelaxációja miatti nyomáscsökkenést, valamint, hogy biztosítsa a nyomás állandó értékét a tömítés élettartama alatt. Emellett, a szorítórugó lehetőséget biztosít a tengelytömítés viselkedésének szabályozására, hiszen a rugó hossza, átmérője, merevsége jelentősen befolyásolja a fellépő radiális erő értékét [4]. Így a rugóerő megfelelő megválasztásával elérhető, hogy a lehető legalacsonyabb súrlódási nyomaték jelenjen meg a tömítés működése közben. Ha rendelkezésünkre áll egy olyan numerikus modell, amely megfelelő pontossággal és megbízhatóan képes a radiális tengelytömítés viselkedését numerikusan előrejelezni különböző körülmények között (pl. eltérő hőmérsékleten, szorítórugóval vagy anélkül, öregített gumik esetén), akkor a tömítések fejlesztése hatékonyabbá tehető, optimalizálni lehet a radiális erő nagyságát, valamint a tömítés élettartamát és kopását is van lehetőség számolni [5].

A fenti megállapításokkal összhangban a jelen kutatás célja egy kereskedelmi forgalomban kapható, FKM gumi alapú radiális tengelytömítés kísérleti és numerikus vizsgálata kvázi-statikus terhelés esetén. Ehhez a radiális tengelytömítés szerelése közben és után fellépő radiális erőt mérjük az idő függvényében, két különböző hőmérsékleten (6 és 25 °C). A méréseket szorítórugóval és anélkül is elvégezzük, így fontos eredményeket kaphatunk a rugó és az átfedés radiális erő mértékére gyakorolt hatásáról. Emellett, célunk egy olyan kétdimenziós, tengelyszimmetrikus végeselem modellt fejleszteni, amely képes a radiális erőt, a kontakt zóna nagyságát, a nyomásviszonyokokat, valamint a kopás mértékét megbízhatóan modellezni. A végeselem modellben az FKM gumi anyagmodellezése során a hiper-viszkoelasztikus megközelítés, kiegészítve a hőmérséklet-idő ekvivalencia elvével kerül alkalmazásra, amely képes a gumi nemlineárisan rugalmas viselkedése mellett az idő- és hőmérsékletfüggő viselkedést is figyelembe venni. Az anyagmodell kalibrálásához kvázi-statikus és dinamikus igénybevétel mellett anyagvizsgálati méréseket végeztünk. Végül a különböző környezeti beállítások mellett mért radiális erő értékeket összevetettük a végeselem modellel számolt eredményekkel.

2. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

2.1. Anyagvizsgálati mérések

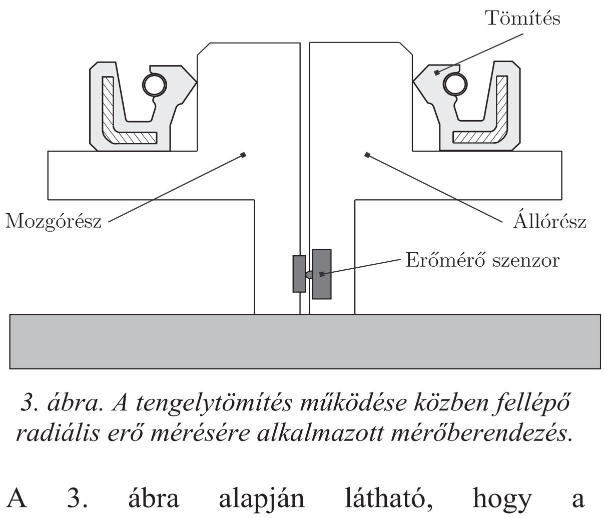
A tömítés alapjául szolgáló FKM gumi mechanikai viselkedésének megismerése, illetve az anyagmodellben szereplő modellparaméterek meghatározása érdekében egytengelyű nyomó igénybevételi mód mellett, -30%-os mérnöki alakváltozási szintig, szobahőmérsékleten, 0,0025 1/s alakváltozási sebességen anyagvizsgálati méréseket végeztünk. Továbbá, szintén egytengelyű nyomó igénybevételi mód mellett dinamikus mechanikai termikus analízis (DMTA) segítségével -100 és 160 °C közötti hőmérséklettartományban, 0,5–50 Hz közötti frekvenciatartományban is végeztünk mérést. A kvázi statikus és a dinamikus mérésekhez egyaránt 10 mm átmérőjű, 2 mm vastagságú hengeres próbatest került alkalmazásra. Megjegyzendő, hogy ez a próbatest geometria nem ideális a nagy átmérő-magasság arány miatt, ezért jelentős lehet nyomás során a súrlódásból adódó hordósodás. Éppen ezért a kvázi statikus mérés esetén a próbatest és a nyomófejek felületei között szilikon olaj került alkalmazásra, így csökkentve a súrlódás mértékét és elősegítve a homogén feszültségeloszlást. Ilyen jellegű felületkezelés a DMTA során nem történt. A dinamikus vizsgálat során, a -100 és 160 °C közötti hőmérséklettartományban 10 °C-os hőmérséklet ugrásokkal mért tárolási modulus értékeket a frekvencia függvényében a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Az FKM gumi tárolási modulus értékei a gerjesztési frekvencia függvényében -100 és 160 C° közötti hőmérséklettartományban.

2.1. Szerkezeti mérések

A radiális tengelytömítést reprezentáló végeselem modell validációja érdekében szerkezeti méréseket végeztünk a vizsgált FKM gumi alapú radiális tengelytömítéseken 6 és 25 °C-os hőmérsékleteken. A mérések során a tömítés tengelyre történő szerelése közben és után fellépő radiális erőértékek kerültek rögzítésre az idő függvényében. A mérőeszköz elvi felépítését a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A tengelytömítés működése közben fellépő radiális erő mérésére alkalmazott mérőberendezés.

A 3. ábra alapján látható, hogy a mérőberendezés két félből áll, egy álló- és egy mozgórészből. A mozgórészen elhelyezkedő elmozdulás alapú erőmérő szenzor detektálja a tömítés tengelyre való szerelése közben és után fellépő erőértékeket az idő függvényében. A kívánt hőmérsékleteket (6 és 25 °C) egy fűtő/hűtőkamra biztosította. Emellett a mérési környezet úgy került kialakításra, hogy széles hőmérséklettartományban is lehessen méréseket elvégezni (az erőmérő szenzor csak 0 és 40 °C közötti tartományban üzemeltethető), ami temperált olaj mérőberendezésen keresztül történő áramoltatásával valósítható meg. Ezzel a módszerrel akár 100 °C-os tengelyhőmérséklet is elérhető. A mérések során az adott hőmérsékleten 3-3 tömítést vizsgáltunk, szorítórugóval és szorítórugó nélkül. A végeselem modell validációjához a kapott mérési eredmények átlaga került felhasználásra.

2. ALKALMAZOTT ANYAGMODELL

2.1. Hiperelasztikus modell

Az FKM gumi nemlineárisan rugalmas, időfüggetlen viselkedését a Mooney–Rivlin-féle hiperelasztikus anyagmodellel került leírásra, a deformáció során bekövetkező térfogatváltozás elhanyagolása (összenyomhatatlanság) mellett A modellhez tartozó alakváltozási energiasűrűség függvény (W) az alábbi alakban adható meg

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3), \tag{1}$$

ahol C_{10} és C_{01} anyagparaméterek, valamint I_1 és I_2 az első és második skalár invariáns. Az (1) egyenlet alapján a mérnöki feszültségválasz (P_0) az alábbi alakban adható meg

$$P_0 = \frac{2}{\lambda^3}\left(\lambda^3 - 1\right)\left(\lambda C_{10} + C_{01}\right), \tag{2}$$

ahol λ a nyúlás. Továbbá a kezdeti nyíró rugalmassági modulus G_0 az alábbi módon számolható

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}). \tag{3}$$

2.1. Hiper-viszkoelasztikus modell

A vizsgált gumi jelentős idő- és hőmérsékletfüggő viselkedését a viszko-hiperelasztikus anyagmodell segítségével vesszük figyelembe, amely egy tetszőleges hiperelasztikus modell és a véges alakváltozásokra kiterjesztett, Prony sorozatra épülő lineárisan viszkoelasztikus modell összekapcsolásával definiálható. Az összenyomhatatlan hiper-viszkoelasztikus konstitutív egyenlet egytengelyű igénybevételi mód esetén az alábbi alakban írható fel

$$P(t) = P_0(t) - \tag{4}$$

$$\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}\frac{g_i}{\tau_i(T)}\int_0^t \frac{2\lambda(t) + \lambda^2(t-s)}{\lambda^2(t)\lambda(t-s)} P_0(t-s)\mathrm{e}^{-s/\tau_i(T)}\mathrm{d}s,$$

ahol $P(t)$ a hiper-viszkoelasztikus mérnöki feszültségválasz, míg $P_0(t)$ a hiperelasztikus mérnöki feszültségválasz, amit ebben az esetben a Mooney–Rivlin-féle modell ad meg (lásd (2) egyenlet). Továbbá, g_i és $\tau_i(T)$ az i-edik relatív modulus és a hőmérsékletfüggő relaxációs idő (Prony paraméterek), míg n a Prony tagok (rugó-csillapítóelemek) száma. Az időfüggő relaxációs modulus függvényt a Prony sorozat definiálja

$$G(t) = G_0\left(g_\infty + \sum_{i=1}^{n} g_i \mathrm{e}^{-t/\tau_i(T)}\right), \tag{5}$$

ahol G_0 az üveges állapotban érvényes kezdeti nyíró rugalmassági modulus (lásd (3) egyenlet), míg g_∞ a relaxált relatív modulus, amely az alábbi egyenlet segítségével számolható

$$g_\infty = 1 - \sum_{i=1}^{n} g_i. \tag{6}$$

Továbbá, a relaxációs idő-hőmérséklet kapcsolatot a WLF egyenlet adja meg

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r}, \tag{7}$$

ahol C_1 és C_2 modellparaméterek, míg T_r a választott referenciahőmérséklet. Az egytengelyű igénybevételi mód mellett a konstitutív egyenlet (lásd (4) egyenlet) numerikus feszültségmegoldása az alábbi módon számolható [6]

$$P(t + \Delta t) = P_0(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^{n} H_{1i}(t + \Delta t) + \tag{8}$$

$$+ H_{2i}(t + \Delta t),$$

ahol

$$H_{1i}(t+\Delta t)=\frac{2}{3}g_i\left\lfloor\frac{\lambda(t+\Delta t)}{\lambda(t)}P_0(t)b_i+P_0(t+\Delta t)a_i\right\rfloor$$
$$+\frac{\lambda(t+\Delta t)}{\lambda(t)}H_{1i}(t)c_i,$$

$$H_{2i}(t+\Delta t)=\frac{1}{3}g_i\left\lfloor\frac{\lambda^2(t)}{\lambda^2(t+\Delta t)}P_0(t)b_i+P_0(t+\Delta t)a_i\right\rfloor$$

$$+\frac{\lambda^2(t)}{\lambda^2(t+\Delta t)}H_{2i}c_i. \qquad (9)$$

Továbbá, az a_i, b_i és c_i konstansok

$$c_i=e^{-\Delta t/\tau_i(T)},$$
$$a_i=1-\frac{\tau_i(T)}{\Delta t}(1-c_i), \qquad (10)$$
$$b_i=\frac{\tau_i(T)}{\Delta t}(1-c_i)-c_i.$$

A (8)–(10) egyenletek megadják az anyagmodell numerikus feszültségmegoldását, ami alkalmas a modellparaméterek hatékony meghatározására.
Az időfüggő relaxációs modulus függvény (lásd (5) egyenlet) a Fourier transzformáció segítségével frekvenciatartományban is felírható, az alábbi alakban

$$G'(\omega)=G_0\left(g_\infty+\sum_{i=1}^{n}\frac{g_i\tau_i^2(T)\omega^2}{1+\tau_i^2(T)\omega}\right),$$
$$G''(\omega)=G_0\sum_{i=1}^{n}\frac{g_i\tau_i(T)\omega}{1+\tau_i^2(T)\omega^2}, \qquad (11)$$

ahol *G'(ω)* a tárolási, míg *G''(ω)* a veszteségi nyíró modulus. Előbbi az anyagban tárolt rugalmas energiával, míg utóbbi a disszipált energiával arányos.

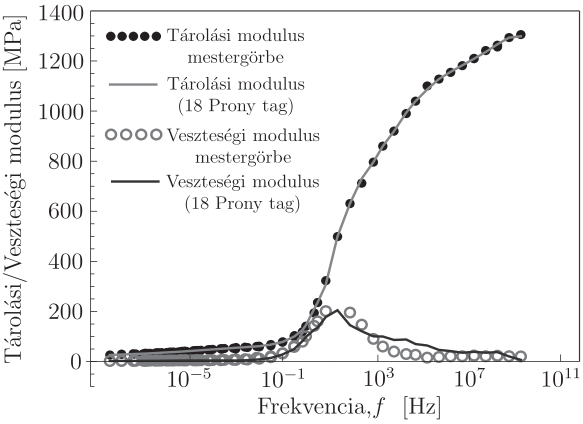
3. ANYAGPARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

A hiper-viszkoelasztikus anyagmodell paramétereit a kvázi-statikus és a dinamikus (DMTA) mérési eredmények alapján (2.1 fejezet) határoztuk meg, amely során a mért és a numerikusan számolt anyagválaszok között bevezetett hibafüggvényt minimalizáltuk. Ehhez első lépésként előállítottuk a tárolási modulus mestergörbét a 2. ábrán látható tárolási modulus-frekvencia izotermák alapján 0 °C-os referenciahőmérséklet választása mellett, illetve meghatároztuk a hőmérsékletfüggő eltolási tényezőket is. Megjegyzendő, hogy a veszteségi modulus mestergörbe előállításához a tárolási modulus mestergörbénél meghatározott eltolási tényezőket használtuk. Az időfüggő viselkedést figyelembe vevő Prony paramétereket a (11) egyenlettel adott összefüggések segítségével határoztuk meg, a tárolási és a veszteségi modulus mestergörbékre történő modellillesztéssel. Az eltolási tényező-hőmérséklet pontpárok alapján pedig a WLF egyenlet konstansait határoztuk meg a (7) egyenlet segítségével. Ezt követően az ismert Prony és WLF egyenlet paramétereivel, valamint a (8)–(10) egyenletek felhasználásával illesztettük a hiper-viszkoelasztikus modellt a kvázi-statikus mérési görbére. Azaz a DMTA során mért anyagválaszt csak az időfüggő paraméterek meghatározására használtuk (g_i, $\tau_i(T)$, $i=1...n$), míg a merevséget a kvázi-statikus mérés alapján határoztuk meg. Ennek oka, hogy a próbatest geometriája, illetve a jelentős súrlódás miatt a DMTA során mért merevség nem megbízható, értéke 3–5-szöröse is lehet a valós merevségnek. Megjegyzendő, hogy jó közelítéssel a súrlódás miatt fellépő mérési hiba függőleges eltolással korrigálható. Ezt a feltételezést szimulációval, valamint 20 és 160 °C között végzett ellenőrző húzó DMTA segítségével igazoltuk, ahol a húzó és a nyomó módban kapott tárolási modulus görbék függőleges eltolással egymással összhangba hozhatók. A modellillesztés után kapott paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A hiper-viszkoelasztikus anyagmodell paraméterei

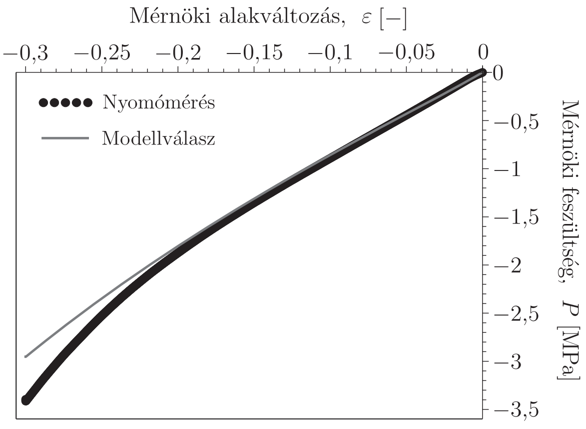
Mooney–Rivlin-féle modell paraméterei			
C_{10} [MPa]		C_{01} [MPa]	
71,76		-22,54	
WLF egyenlet paraméterei			
T_r [°C]	C_1 [-]	C_2 [°C]	
0	12,08	88,96	
Prony paraméterek (n = 18)			
Relatív modulus [-]		**Relaxációs idő [s]**	
g_1	0,049212	τ_1	1,0E-09
g_2	0,040607	τ_2	1,0E-08
g_3	0,039580	τ_3	1,0E-07
g_4	0,067255	τ_4	1,0E-06
g_5	0,101252	τ_5	1,0E-05
g_6	0,105689	τ_6	1,0E-04
g_7	0,125285	τ_7	1,0E-03
g_8	0,278813	τ_8	1,0E-02
g_9	0,115581	τ_9	1,0E-01
g_{10}	0,024020	τ_{10}	1,0E+00
g_{11}	0,007979	τ_{11}	1,0E+01
g_{12}	0,003796	τ_{12}	1,0E+02
g_{13}	0,005133	τ_{13}	1,0E+03
g_{14}	0,005340	τ_{14}	1,0E+04
g_{15}	0,004039	τ_{15}	1,0E+05
g_{16}	0,003165	τ_{16}	1,0E+06
g_{17}	0,002893	τ_{17}	1,0E+07
g_{18}	0,002851	τ_{18}	1,0E+08

Az 1. táblázatban szereplő modell-paraméterekkel definiált hiper-viszkoelasztikus modellválaszt, összevetve a DMTA eredményeivel és az egytengelyű nyomóvizsgálatokkal, a 4. és az 5. ábra mutatja.



4. ábra. A tárolási (E') és veszteségi (E'') modulus mestergörbék és a hozzájuk tartozó hiper-viszkoelasztikus modellválaszok.

A 4. ábrán látható, hogy a hiper-viszkoelasztikus modell megfelelő pontossággal képes a tárolási és a veszteségi modulus mestergörbéket leírni a vizsgált frekvenciatartományban, ugyanakkor 10 Hz felett a veszteségi modulus mestergörbe esetén a modellválasz pontossága csökken.



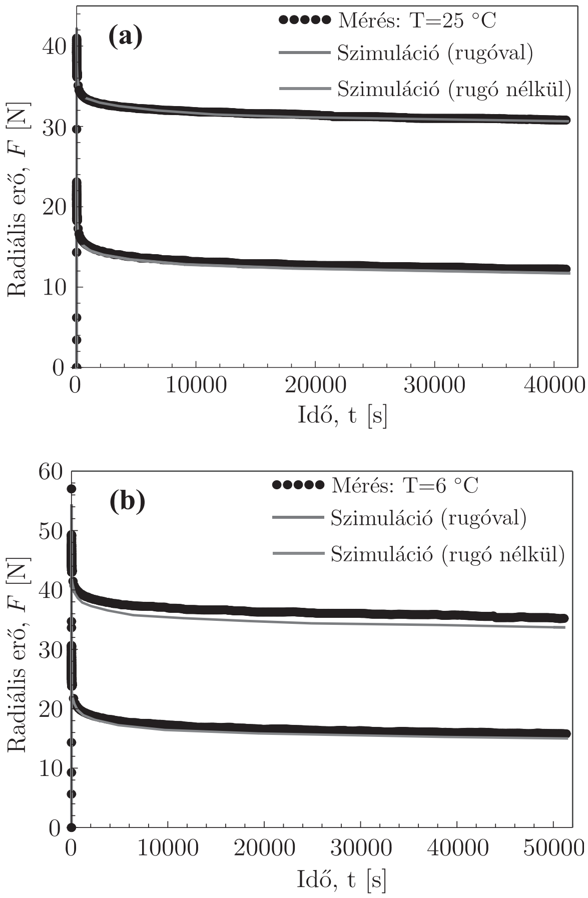
5. ábra. Az egytengelyű nyomómérés ($\dot{\varepsilon}$=0,0025 1/s) és a hozzá tartozó hiper-viszkoelasztikus modellválasz.

Az 5. ábrán látható, hogy a hiper-viszkoelasztikus modell -20%-os mérnöki alakváltozási szintig nagy pontossággal képes a mért viselkedést leírni, -20% felett a pontosság folyamatosan csökken. Megjegyzendő, hogy a tömítés üzemi működése során ennél magasabb alakváltozások nem jelennek meg.

4. EREDMÉNYEK, KIÉRTÉKELÉS

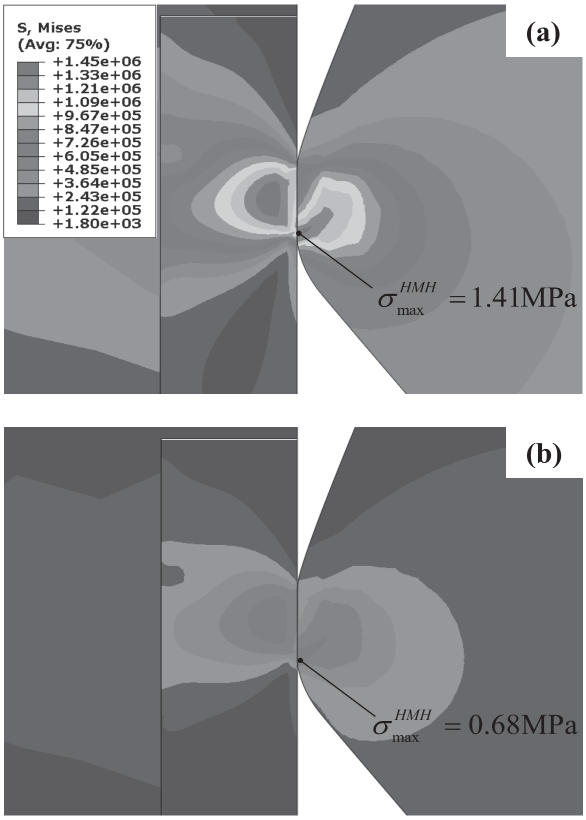
A radiális tengelytömítés numerikus vizsgálata az Abaqus kereskedelmi végeselem szoftverben [7] történt 2 dimenziós tengelyszimmetrikus modell segítségével. A gumi anyagviselkedését az 1. táblázatban szereplő anyagparaméterekkel definiált hiper-viszkoelasztikus modell, míg a tengelyt és a szorítórugót lineárisan rugalmas modell veszi figyelembe. A tengely esetében E=210 GPa (rugalmassági modulus) és ν=0,3 (Poisson's tényező), míg a rugó esetében E=70 GPa és ν=0,3. A tömítés és a tengely között 0,2-es súrlódási tényező értéket definiáltunk. A szimulációt két lépésben oldottuk meg. Az első lépés 0,5 s-ig tartott (szerelés), majd ezt követte a relaxációs szakasz, ahol a tengelyre szerelt tömítésben ébredő radiális erő értékét vizsgáltuk.

A radiális tengelytömítés végeselem modelljének segítségével előrejeleztük a tömítés, vizsgált esetekre vonatkozó viselkedését. A mért és a numerikusan számolt radiális erőértékeket az idő függvényében a 6. (a) és (b) ábrák mutatják. Előbbi 25 °C-, míg utóbbi a 6 °C-on vizsgált eseteket mutatja.



6. ábra. A mért és a numerikusan számolt radiális erő értéke az idő függvényében T=6 °C-on, a gumitömítésben elhelyezkedő rugóval és anélkül.

A 6. (a) és (b) ábrák alapján elmondható, hogy a végeselem modell nagy pontossággal képes a mért viselkedést leírni a vizsgált hőmérsékleteken, szorítórugóval és szorítórugó nélkül is. Az is látható, hogy az FKM gumi alapú tömítés jelentős feszültségrelaxációt mutat, valamint a szorítórugó jelentős mértékben hozzájárul a radiális erő értékéhez mindkét hőmérsékleten. A 7. (a) és (b) ábrák a Mises-féle egyenértékű feszültségeloszlást mutatják a tengely és a tömítőajak környezetében az első terhelési lépés végén (t=0,5 s) és t=40000 s-nál, szobahőmérsékleten.



7. ábra. A Mises-féle egyenértékű feszültségeloszlás a tengely és a tömítőajak/tömítőél kontakt környezetében: (a) t=0,5 s (tömítés szerelése után közvetlenül) és t=40000 s időpillanatokban.

A 7. ábra is jól szemlélteti, hogy a gumiban jelentős feszültségrelaxáció jelentkezik, valamint látható, hogy a tömítőél kontaktzónájában lép fel a legnagyobb feszültség, ami a kopást is jelentősen befolyásolja. A kontakt zóna nagysága kb. 12 mikron, ami összhangban van korábbi mérési és tapasztalati értékekkel.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben bemutatásra került egy radiális tengelytömítés viselkedését megbízhatóan előrejelző végeselem modell, amelyben az FKM gumi mechanikai viselkedése a hiper-viszkoelasztikus anyagmodellel került leírásra. A modellparaméterek meghatározása egytengelyű nyomó mód mellett végzett dinamikus mechanikai termikus analízis és kvázi-statikus mérési eredmények alapján történt. A tengelytömítés egyik legfontosabb paraméterének, a radiális erő mérésének céljából egy mérési környezetet építettünk, amellyel pontosan lehet különböző hőmérsékleteken mérni a tömítés tengelyre történő szerelése közben és után fellépő erőértékeket az idő függvényében. A végeselem modell validálása érdekében összehasonlítottuk a mért és a numerikusan számolt radiális erőértékeket. A kapott eredményekből jól látható, hogy a modell 6 és 25 °C-on végzett méréseket is nagy pontossággal képes leírni, szorítórugó és szorítórugó nélküli esetekben is. A mért eredményekből az is igazolódott, hogy a szorítórugó jelentős radiális erőt képes biztosítani.

Fontos kiemelni, hogy ez a tanulmány egy hosszabb távú kutatómunka első lépése, ahol a kidolgozott végeselem modell, illetve az anyagmodellezési módszertan alkalmas egyrészt arra, hogy különböző mértékben öregített gumitömítéseket vizsgáljunk, másrészt, hogy a kopás mértékét megbízhatóan előrejelezzük. Ez különösen fontos, hiszen a szakirodalomban jelenleg elérhető, a gumitömítések kopásának numerikus vizsgálatát célzó tanulmányok többsége elhanyagolja a gumi időfüggő viselkedését.

6. IRODALOM

[1] Flitney, R.K., Brown, M.W., Seals and Sealing Handbook, fifth ed., Elsevier, Oxford, 2007.

[2] Jia, X., , Guo, F., Huang, L., Wang, L., Gao, Z., Wang, Y. 2014. Effects of the radial force on the static contact properties and sealing performance of a radial lip seal. Sci. China Technol. Sci. 57, 1175–1182.

[3] Jennewein, B., Frölich, D. 2012. Simulation of the radial force of radial shaft seal rings at different temperatures and aging conditions. In: Proceedings of 17th International Sealing Conference, Stuttgart, Germany.

[4] Obayashi, S. 1998. Analysis to Reduce the Sliding Friction of Power Steering Rod Seals, SAE Technical Paper, 980583.

[5] Rutuja, S. J., David, C. R., Hany G. 2018. Nonlinear Finite Element Analysis of Radial Lip Seals. ASME Int. Mech. Eng.Cong. and Expos., Florida, USA.

[6] Fazekas, B., Goda, T.J., 2018. Determination of the hyper-viscoelastic model parameters of open-cell polymer foams and rubber-like materials with high accuracy. Mater. Des. 156, 596–608.

[7] Abaqus, Ver. 6.19-3, Dassault Systemes, 2019.