

RADIÁLIS TENGELYTÖMÍTÉS ÉRINTKEZÉSI VISELKEDÉSE

CONTACT BEHAVIOUR OF A RADIAL SHAFT SEAL

Márton Zoltán MSc hallgató*; Dr. Váradi Károly MTA doktora, egyetemi tanár*
Daniel Frölich tudományos kutató**; Dr. Bernd Sauer professzor**

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék
** Kaiserslauterni Műszaki Egyetem, Gépelemek és Hajtástechnika Tanszék

ABSTRACT. In present paper the contact pressure distribution and the contact force of a radial shaft seal were investigated using the finite element method. The study was worked out in cooperation with the Technical University of Kaiserslautern, from where the task description and measurement results were available.

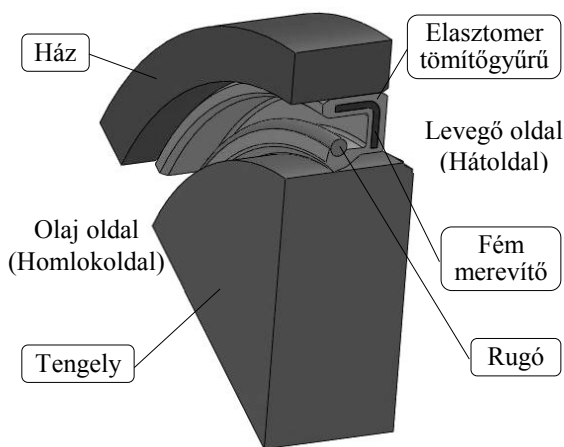
The contact behaviour of the shaft and the sealing ring was investigated in three cases: in case of a new sealing profile at room temperature and at operating temperature, and in case of a worn sealing profile at operating temperature. From the results of the models the effect of the temperature and the wear on the sealing pressure distribution and the sealing force were determined.

1. BEVEZETÉS

Az elasztomer anyagú, radiális ajakos tömítés az iparban az egyik legszélesebb körben használt gépelem forgó berendezések tömítésére. Elsődleges funkciója a kenőanyag elszivárgásának, valamint a külső szennyezőanyagok tömített térrészbe jutásának megakadályozása. A tengely és a radiális tömítőgyűrű közötti kezdeti radiális átfedés, a tömítőgyűrűbe szerelt feszítőrugó, illetve a tömítőgyűrű profiljának kialakítása döntő szerepet játszik a megfelelő tömítettség elérésében. A tengely és a tömítőgyűrű között kialakuló radiális erő, valamint a két alkatrész között a forgás során fellépő súrlódás következtében az érintkezési felületen felszabaduló hővel is számolnunk kell. A tömítőgyűrű – tengely kapcsolatban fellépő érintkezési és hőtani viselkedés már régóta vizsgálatok tárgyát képezi [2-7] az érintkezési erővel szorosan összefüggő súrlódásból adódó hőfejlődés és a magas hőmérsékletek következtében létrejövő tömítés tönkremenetelek miatt.

Az 1. ábra a vizsgált radiális tömítőgyűrűt mutatja beépített helyzetben. A tömítőelem lezárja a tömítetlenségi utakat az érintkező forgó tengelyen és a ház nyugvó érintkező felületein. A tengelyen az érintkező, súrlódó felületek között a kellő mértékű tömítettséget a rugalmas túlfedéssel illesztett tömítőél szolgáltatja. A tömítőélt két kúpos felület alakítja ki. A két

kúpos felület tengellyel bezárt szögének különbözőnek kell lennie. Az olaj oldali (homlokoldali) szög mindig nagyobb, mint a levegő oldali (hátoldali) szög. A feszítőrugó a tömítés olaj oldali részén található és minden esetben kis mértékben el van tolva a tömítőéltől a levegő oldal felé. A tömítőajak kialakításának köszönhetően aszimmetrikus érintkezési nyomás eloszlás alakul ki az érintkezési hossz mentén. Az érintkezési nyomásnak a tömítés olaj felőli oldalán van a maximuma és a nyomáseloszlás gradiense is nagyobb az olaj felőli oldalon. Az érintkezési nyomás eloszlás említett alakja segíti elő forgó tengely esetén a tömítettséget létrehozó hidrodinamikai tömítőmechanizmus kialakulását.



1. ábra. A vizsgált tömítőgyűrű felépítése

A modern radiális tömítőgyűrűknél a tömítőerő értéke egységnyi kerületre vonatkoztatva 0,1-0,15 N/mm [1]. Ennek egy részét a tömítőél elasztikus megnyúlása, másik részét a spirálrugó biztosítja. Üzemi körülmények között ez az erő az elasztomer felmelegedése és relaxációja miatt természetesen lecsökken, ám még akkor is elegendőnek kell lennie a biztos tömítettséghez. A radiális tengelytömítések fejlesztésének egyik fontos célja az, hogy a radiális szorítóerőt, a nagymértékű kopást és melegedést csökkentendő, egy a még megfelelő tömítettség biztosításához elegendő értékre csökkentsék.

2. A TÖMÍTŐGYŰRŰ VÉGESELEMES VIZSGÁLATA

2.1. Kiindulási adatok

A tömítőgyűrű végeeselemes vizsgálata Solidworks Simulation 2011 szoftver segítségével történt. A tengely átmérője, amelyre a vizsgált tömítés felszerelésre került, $D = 78,5$ mm. A tengely és a tömítőgyűrű fém merevítőjének anyaga acél, a szokásos acél anyagtulajdonságokkal. Az elasztomer tömítőgyűrű a valóságban nemlineáris viselkedést mutat, ez a számítási modellekben egy közelítő rugalmassági modulussal jellemezhető lineáris anyagmodellel volt helyettesítve. Így a 75 FKM 585 elasztomer anyag [8] rugalmassági modulusa szobahőmérsékleten $E_{e,sz} = 6,9$ MPa, üzemi hőmérsékleten pedig, amikor az elasztomer 85-100 °C-ra melegszik fel, $E_{e,ü} = 2,7$ MPa. Az elasztomer Poisson-tényezője $\nu_e = 0,49$. A elasztomer tömítőgyűrűbe szerelt feszítőrugó a vele elvégzett mérések szerint nemlineáris viselkedést mutat. Egy bizonyos kritikus húzóerőig a rugó mereven viselkedik, azaz megnyúlása gyakorlatilag zérus, a kritikus húzóerő felett pedig a húzóerő – nyúlás karakterisztika lineáris. A rugó a végeeselem modellekben a modellek egyszerűsítése végett tömör körgyűrűként volt modellezve. A helyettesítő geometria és a valós rugókarakterisztika ismeretében definiálható egy a rugó viselkedését jellemző fiktív feszültség – alakváltozás karakterisztika. Így a rugót helyettesítő körgyűrűnek bilineáris anyag-törvényt definiálva, annak rugalmassági modulusa a kezdeti, merev szakaszon $E_{r,1} = 10^5$ MPa, míg a második, lineáris szakaszon $E_{r,2} = 4$ MPa.

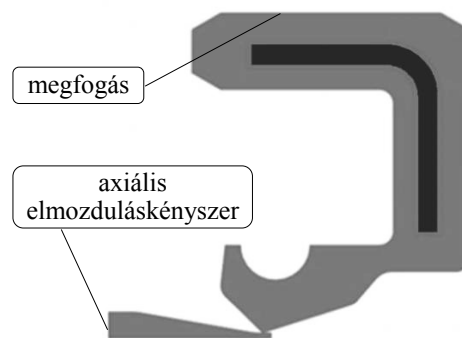
2.2. A végeeselem modellek felépítése

A elvégzett számítások gyakorlatilag a tömítés tengelyre szerelésének folyamatát modellezik 2D-s tengelyszimmetrikus végeeselem szimulációk formájában. Viszont míg a tömítés tengelyre szerelése úgy történik, hogy először a feszítőrugót illesztik bele az elasztomer ennek fogadására kiképzett hornyába (melynek eredményeként nyilvánvalóan a rugó és a tömítőajak is deformálódni fog a merevségüktől függő mértékben és mindkét elem előfeszítve lesz), majd ezt az összeszerelt tömítőgyűrűt tolják fel a tengelyre, ezzel ellentétben az elvégzett végeeselem számítások az egyes lépéseket ettől eltérő sorrendben modellezik.

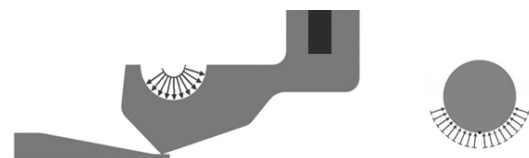
A végeeselem számítás a következőképpen épül fel: Minden egyes számításhoz két végeeselem modell került felhasználásra, a tömítőgyűrű – tengely modell (főmodell) és a rugó

modell (segédmodell). A tömítőgyűrű – tengely modellben a rugó nélküli tömítőgyűrű a külső palástfelületén meg van fogva, ez modellezi a házba beépített helyzetet. Első lépésként az ék alakban végződő tengelyt betoljuk a tömítőgyűrű alá (2. ábra), így kialakul a rugó nélküli érintkezési állapot. Második lépésként az elasztomer gyűrű hornyában működtetjük a rugó által kifejtett feszítőerőt, melynek értéke a rugót tartalmazó végeeselem modell (a segédmodell) segítségével került meghatározásra (3. ábra). Így a második lépés eredményeképpen kialakul az érintkezési állapot a rugóval szerelt esetben.

Így tehát az érintkezési viszonyok meghatározása két, egymástól fizikailag független végeeselem modell segítségével történt (a tengely – tömítőgyűrű, illetve a rugó végeeselem modellje). A tengely – tömítőgyűrű végeeselem modellben a rugót helyettesítő erőrendszer iteratív módon került meghatározásra. Az alap gondolat az erő – ellenerő törvénye, eszerint amekkora erővel a rugó nyomja az elasztomer gyűrűt, ugyanakkora erővel feszíti szét az elasztomer gyűrű a rugót, így ez a két eset két külön modellben is kezelhető. Az iteráció során az előzőekben említett két modellben a terhelő erő nagyságát, illetve annak támadási felületét addig változtattuk (úgy, hogy közben a két modellben az erő nagysága és támadási felületének nagysága megegyezett), amíg a rugó és az elasztomer köríves hornya egy közös érintkezési pozíciót el nem ért. A közös érintkezési pozíció elérését a 2D-s modellek síkjába eső deformációk listázásával, a deformált alakok ábrázolásával és egymásra illesztésével vizsgáltuk.



2. ábra. A tömítőgyűrű – tengely végeeselem modell



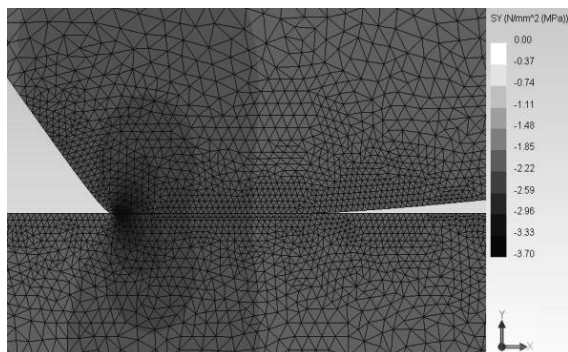
3. ábra. Az alkalmazott erőrendszer a tömítőgyűrű – tengely, valamint a rugó végeeselem modelljében

Az így felépített végeelem modellek segítségével meghatározásra kerültek a tengely és a tömítőgyűrű közötti érintkezési viszonyok új tömítésprofil esetén szobahőmérsékleti és üzemi hőmérsékleti anyagjellemzőkkel, valamint egy ismert, kopott tömítésprofil esetén üzemi hőmérsékleti anyagjellemzőkkel. A modellek felépítésének köszönhetően a tengely és a tömítőgyűrű érintkezési viselkedése az egyes esetekben két állapotban is vizsgálható volt: rugó nélküli (a főmodell első lépésének eredményeként) és rugóval szerelt (a főmodell második lépésének eredményeként) állapotban. Így az is meghatározhatóvá vált, hogy a tömítőerő létrehozásában mekkora részt vállal az elasztomer ajak kezdeti túlfedése és a rugó megnyúlása.

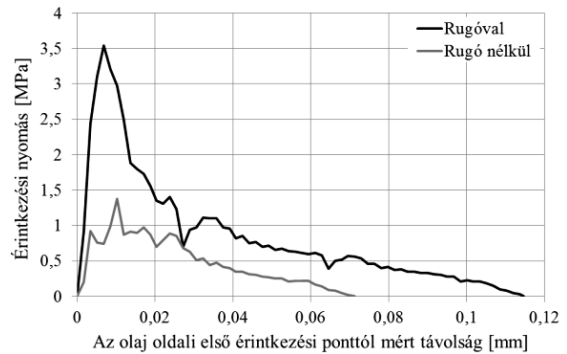
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A szobahőmérsékleti anyagjellemzőkkel elvégzett vizsgálat eredményeként a radiális irányú feszültségeket, azaz az érintkezési tartományban az érintkezési nyomást a 4. ábra szemlélteti a tengely – tömítőgyűrű végeelem modell második lépésének (rugóval szerelt állapot) eredményeként. A tengely tömítőgyűrűvel érintkező éléről lekérdezett érintkezési nyomás értékeket rugóval szerelt, valamint rugó nélküli esetben az 5. ábrán bemutatott diagram foglalja össze.

A tömítőnyomás eloszlás jól mutatja a radiális tengelytömítéseknel szokásos tömítőnyomás eloszlás alakot. A legnagyobb érintkezési nyomás ott alakul ki, ahol legnagyobb mértékben deformálódott az elasztomer tömítőél, ez pedig az érintkezési tartomány olaj felőli oldalán van, ezen felül a nyomáseloszlás gradiense is nagyobb az olaj felőli oldalon. Ezek a tényezők nagyban hozzájárulnak a hidrodinamikai tömítőmechanizmus kialakulásához.

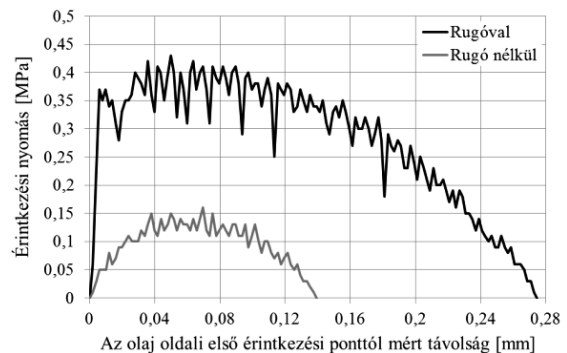


4. ábra. Radiális irányú feszültségek az érintkezési tartományban rugóval szerelt állapotban a szobahőmérsékleti anyagjellemzőkkel végzett vizsgálat esetén



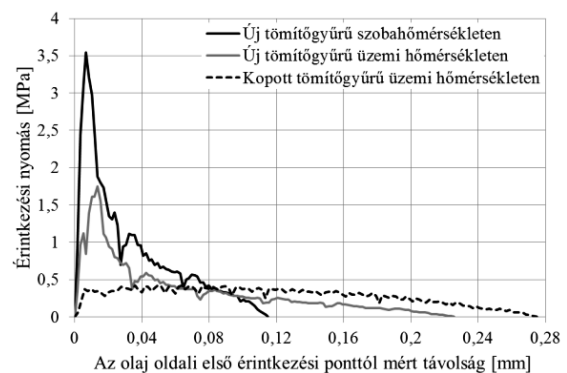
5. ábra. Az érintkezési nyomás eloszlása rugó nélküli, illetve rugóval szerelt állapotban szobahőmérsékleten

A 6. ábra a kopott tömítésprofil esetén üzemi hőmérsékleti anyagjellemzőkkel végzett vizsgálat eredményeként mutatja az érintkezési nyomás értékeit.



6. ábra. Az érintkezési nyomás eloszlása rugó nélküli, illetve rugóval szerelt állapotban üzemi hőmérsékleten a kopott tömítésprofittal végzett vizsgálat esetén

A 7. ábra összefoglalva mutatja a rugóval szerelt radiális tömítőgyűrű érintkezési nyomásának eloszlását a három vizsgált esetben.



7. ábra. Az érintkezési nyomás eloszlása a vizsgált esetekben

Az 1. és 2. táblázat az egyes vizsgált esetekben ismerteti a tömítőerő értékeit, valamint, hogy a tömítőerő értékének mekkora része származik az elasztomer ajak kezdeti túlfedéséből és a rugó megnyúlásából.

1. táblázat. A tömítőerő értékei a vizsgált esetekben

	Tömítőerő [N]
Új tömítőgyűrű szobahőmérsékleten	24,61
Új tömítőgyűrű üzemi hőmérsékleten	19,28
Kopott tömítőgyűrű üzemi hőmérsékleten	19,15

2. táblázat. Az elasztomer ajak túlfedéséből, valamint a rugó megnyúlásából származó tömítőerő a vizsgált esetekben

	A tömítőerő hányada	
	az elasztomer ajak túlfedéséből [N]	a rugó megnyúlásából [N]
Új tömítőgyűrű szobahőmérsékleten	8,62	15,99
Új tömítőgyűrű üzemi hőmérsékleten	3,35	15,93
Kopott tömítőgyűrű üzemi hőmérsékleten	3,30	15,85

Az eredmények alapján elmondható, hogy a tömítőgyűrű felmelegedésével az érintkezési nyomás maximális értéke csökken, az érintkezési tartomány hossza pedig növekszik, ami jól magyarázható az elasztomer anyagának lágyulásával.

A tömítőerő csökken a tömítőgyűrű felmelegedésével. A tömítőerő csökkenése nagymértékben az elasztomer megnyúlásából adódó erőkomponens csökkenéséből származik, aminek pedig szintén az elasztomer hőmérséklet növekedés hatására bekövetkező rugalmassági modulus csökkenése az oka.

A tömítőél kopásának hatására az érintkezési nyomás maximuma csökken, míg az érintkezési tartomány szélessége növekszik, valamint az érintkezési nyomás eloszlás sokkal egyenletesebbé válik és eltűnik az olaj oldali kiugró nyomásmaximum.

A tömítőél kopásának hatására a tömítőerő csak minimális mértékben csökken, hiszen a tömítőélből lekopott néhány század milliméter magasságú anyag minimális befolyással van a rugóból és az elasztomer deformációjából származó erőre.

A számítási eredmények, valamint a számítási módszer helyességét igazolja, hogy a kapott tömítőerő értékek jó egyezőséget mutatnak a szakirodalomban [7] található, FKM anyagú tömítésekre különböző hőmérsékleteken, illetve rugóval és rugó nélkül szerelt esetben mérésrel meghatározott és egységnyi kerületre vonatkoztatott tömítőerőből számítható értékekkel.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány egy radiális tömítőgyűrű érintkezési viselkedését vizsgálta a végeelem módszer segítségével. Meghatározásra került a tömítőnyomás eloszlás radiális tengelytömítésknél szokásos, jellegzetes aszimmetrikus alakja és a tömítőerő értéke különböző üzemiállapotokban. Vizsgálat tárgyát képezte a feszítőrugó utóbbi paraméterekre gyakorolt hatása is. A számítások helyességét a számolt tömítőerő értékek szakirodalmi adatokkal való összevetésével igazoltuk.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TAMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

6. IRODALOM

- [1] Müller H.K. – Nau B.S.: www.fachwissen-dichtungstechnik.de, Online-Publikation, 2008
- [2] Kim C.K. – Shim W.J.: Analysis of contact force and thermal behaviour of lip seals, Tribology International, Volume 30, No. 2, pp. 113-119, 1996
- [3] Lee C.Y. – Lin C.S. – Jian R.Q. – Wen C.Y.: Simulation and experimentation on the contact width and pressure distribution of lip seals, Tribology International, Volume 39, pp. 915-920, 2006
- [4] Stakenborg M.J.L. – van Ostayen R.A.J.: Radial lip seals, thermal aspects, Tribology Series, Volume 14, pp. 79-88, 1989
- [5] Stakenborg M.J.L.: On the sealing mechanism of radial lip seals, Tribology International, Volume 21, pp. 335-340, 1988
- [6] Sauer B.: Wear in radial shaft seal rings, Institute of Machine Elements, Gears and Transmissions, Kaiserslautern, 2011
- [7] Engelke T.: Einfluss der Elastomer-Schmierstoff-Kombination auf das Betriebsverhalten von Radialwellendichtringen, Dissertation, Hannover, 2011
- [8] Simrit: Material 75 FKM 585, Anyagtulajdonoság katalógus, 2009