

# Záróbeszámoló

Az egymáson elmozduló terhelésátadó szerkezeti elemek élettartamát és tönkremenetelét alapvetően befolyásolja a kopás, ezért az érintkezési, hőtani és a kopási viszonyok feltárása és előre jelzése fontos része az alkatrészek tervezésének. Napjainkban a műszaki polimerek egyre nagyobb teret hódítanak a gépészeti alkalmazásokban, és számos egyéb területen is.

## 1. Az anyagi viselkedés jellemzése

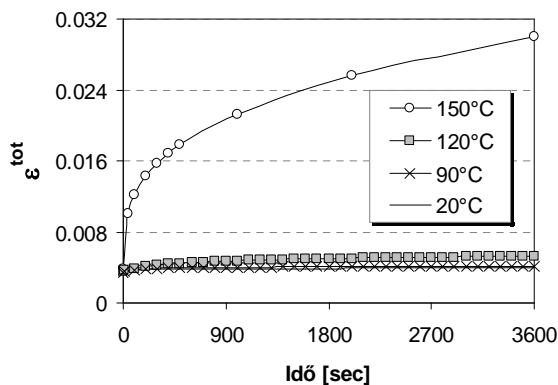
Először összefoglaljuk az érintkezési, hőtani és kopási viselkedés megbízható jellemzéséhez szükséges anyagjellemzőket.

### 1.1 Viszkoelasztikus anyagmodell hőmérsékletfüggő anyagjellemzőkkel

A polimerek alkalmazhatóságát nehezíti, hogy mechanikai és környezeti hatásokkal szemben jelentős érzékenységet mutatnak. Tulajdonságaik időtartam függősége miatt a fémek méretezéséhez használt alapösszefüggések közvetlenül nem használhatóak. Mechanikai kényszer mellett viselkedésük alapján a polimerek viszkoelasztikus anyagnak tekinthetők. A polimer anyagok időfüggő viselkedésének jellegzetességei a kúszás (az igénybevételi feszültség szintje konstans,  $\sigma = \text{konst.}$ ) és a feszültség relaxáció (az igénybevételi alakváltozás szintje konstans,  $\varepsilon = \text{konst.}$ ).

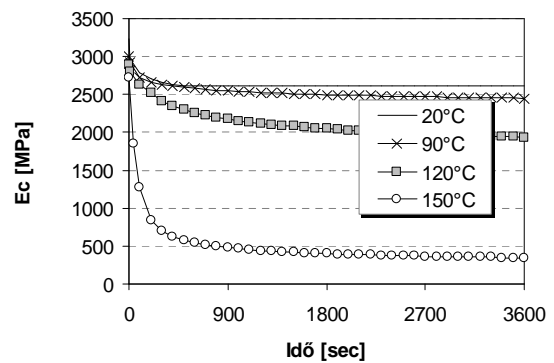
A polimerek alakváltozási tulajdonságait jelentősen befolyásolhatják az idő mellett a különböző környezeti hatások, mint a hőmérséklet, nedvességtartalom, feszültség, rezgések, stb. Vizsgálataink kapcsán a hőmérséklet hatása volt az, amire külön hangsúlyt fektettünk. A már korábban említett folyamatokat (feszültség relaxáció, kúszás) a hőmérséklet változása igen erőteljesen befolyásolja, magasabb hőmérsékleten a kúszás és relaxáció folyamata felgyorsul.

A vizsgálatainkban felhasznált egyik anyag a PEEK<sup>TM</sup> (poliéter-éterketon) (Vicatex® PLC) részben kristályos, lineáris aromás polimer, mely széles körben elfogadott, mint a jelenleg elérhető egyik legnagyobb teljesítőképességű termoplasztikus anyag. A PEEK polimer és kompozitjai jól meghatározott üvegesedési hőmérséklettel rendelkeznek (143°C), olvadáspontja 343°C. Tartós üzemi hőmérséklete akár 260°C is lehet. A PEEK-nek kitűnő szilárdsági, sűrűdési és kopási jellemzői vannak. Kiemelkedő kopásállóságot mutat a nyomás, a sebesség, a hőmérséklet és az ellenfelület érdességének széles tartományán. A PEEK anyag kúszási jellemzőinek meghatározásához méréseket végeztünk különböző hőmérsékleteken. Az alakváltozás (1. ábra) és a kúszási modulusok összehasonlító diagramján (2. ábra) jól látszik, hogy a kúszás jelensége az üvegesedési hőmérséklet alatt nem számottevő. A  $T_g$  alatt (kb. 150°C) az alakváltozás  $\varepsilon$  mértéke 0,004-0,006 tartományban mozog (ld. 20, 90, 120 °C-os görbék). Ezzel szemben a 150 °C-os hőmérsékleten ennek közel tízszeresét is eléri az alakváltozás mértéke  $t=1h$  múlva (1. ábra).



1. ábra.

A PEEK alakváltozás idő diagramja (1 óra)

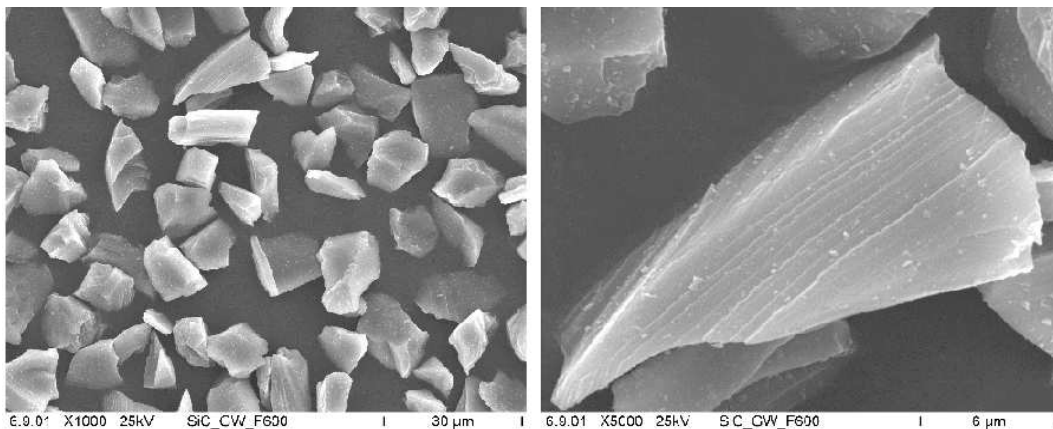


2. ábra.

A PEEK kúszási moduluszainak változása különböző hőmérsékleten

### 1.2 Funkcionálisan rétegzett anyagok (FGM) mechanikai jellemzése

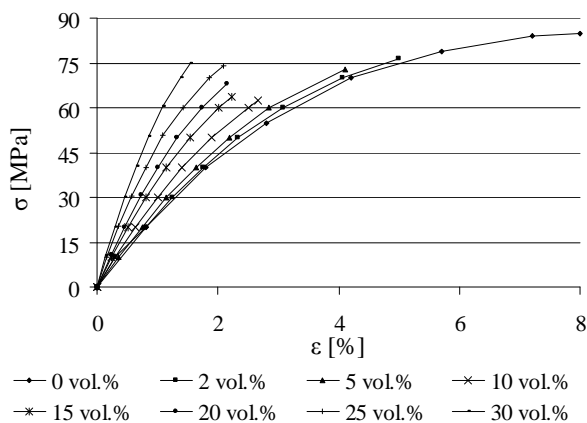
A kutatás célja a funkcionálisan rétegzett gradiens (FG) SiC erősítőrészecskéket tartalmazó epoxi mátrixú kompozitok mechanikai és kopási tulajdonságainak megismerése volt. A rétegzett szerkezetet centrifugálással állítottuk elő a gyanta térhálósodása közben. Az erősítőrészecskék szabálytalan alakúak, durva éllel rendelkeznek (3. ábra).



3. ábra.

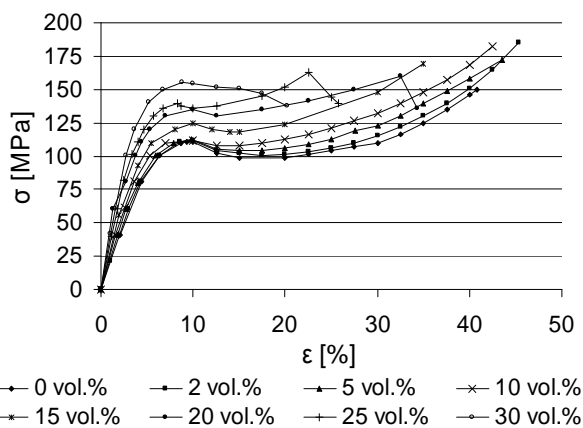
**Elektronmikroszkópos felvétel az erősítőrészecskékről.**

Egyenletes anyageloszlású próbatesteken húzó és nyomóvizsgálatokat végeztünk egy univerzális vizsgálóberendezésen (ZWICK 1485, Germany) 1 mm/min vizsgálati sebességgel.



4. ábra.

Húzó  $\sigma$ - $\varepsilon$  görbék SiC/EP kompozitokra



5. ábra.

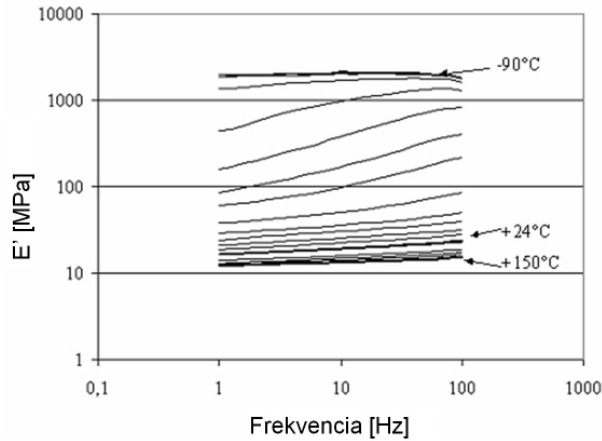
Nyomó  $\sigma$ - $\varepsilon$  görbék SiC/EP kompozit

A 4. és 5. ábra a SiC/EP kompozitok húzó és nyomóvizsgálatainak  $\sigma$ - $\varepsilon$  görbéit mutatja. Mind a tiszta gyanta, mind a SiC/EP kompozit, jóval nagyobb alakváltozást visel el nyomó igénybevételre, mint húzásra.

### 1.3 Elasztomer anyagok jellemzése

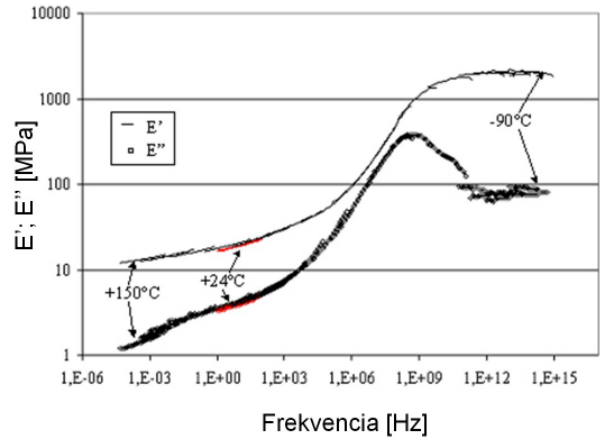
A gumi időfüggő anyagi viselkedésének meghatározásához DMTA vagy feszültség-relaxációs mérés szükséges. A DMTA mérés során a próbatestet adott frekvenciatartományban, változó frekvenciájú, szinuszosan változó dinamikus terhelésnek tesszük ki, úgy hogy közben hőmérsékletsőprést hajtunk végre. Az általunk mért frekvenciatartomány 1 és 100 Hz közé esett, úgy hogy a hőmérséklet  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig változott,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os lépésközzel. A mérésre a kaiserslauterni Kompozit Anyagok Intézetében (Kaiserslautern, IVW) került sor a GABO Eplexor 100 N DMTA mérő berendezésen.

A DMTA mérés eredménye az anyag komplex rugalmassági modulusa ( $E^*$ ), a tárolási modulusa ( $E'$ ), a veszteségi modulusa ( $E''$ ), és a veszteségi tényezője ( $\tan(\delta)$ ). A mért görbéket vízszintesen – a WLF (Williams–Landel–Ferry) hőmérséklet idő ekvivalencia elvet követve – összetolhatjuk úgy, hogy a görbék közül egyet referencia görbeként kijelölünk és a többi görbét ehhez képest toljuk el úgy, hogy egy folytonos görbét, mestergörbét kapjunk (6. ábra és 7. ábra). Ez a mestergörbe széles frekvenciatartományban képes ezek után jellemezni a vizsgált anyagot a kiválasztott referencia hőmérsékleten.



6. ábra.

A különböző hőmérsékleteken lemert tárolási modulus ( $E'$ ) a frekvencia függvényében



7. ábra.

A mért tárolási és veszteségi modulusból  $24^\circ\text{C}$  referencia hőmérsékletre megszerkesztett tárolási modulus és veszteség modulus mestergörbék

A mestergörbére rugókból és csillapítás tagokból álló általánosított Maxwell modell illeszthető. A Maxwell modell segítségével lehetőség nyílik a végeselemes modellben az anyag viszkoelasztikus viselkedésének kezelésére. A ViscoData software az anyag mért tárolási modulusára ráilleszti a rugómodellt jellemző görbét, és közben meghatározza a rugómodellt leíró energia ( $e$ ) és csillapítás ( $\tau$ ) paramétereket. A ViscoData software-vel leírt általánosított Maxwell modell relaxációs modulusa (1); tárolási modulusa (2); veszteségi modulusa (3) és veszteségi tényezője (4) a következő összefüggésekkel számítható:

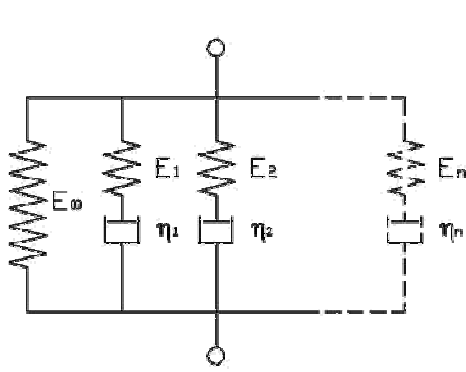
$$E(t; T_g) = E_\infty + \sum_{i=1}^n (E_i) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

$$E'(\omega, T_g) = E_o \left[ 1 - \sum_{i=1}^N e_i \frac{1}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (2)$$

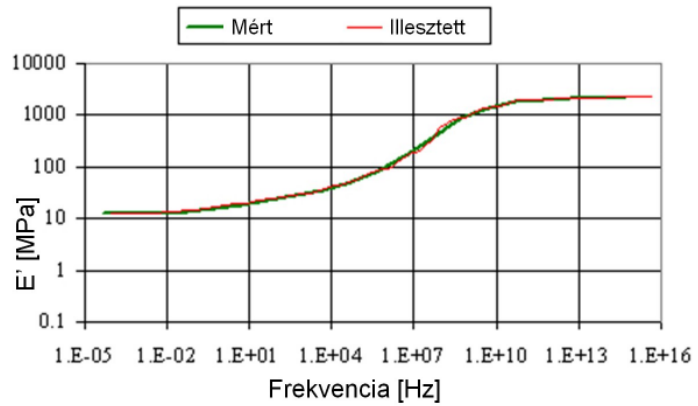
$$E''(\omega, T_g) = E_o \cdot \sum_{i=1}^N e_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (3)$$

$$\tan(\delta, T_g) = \frac{E''(\delta, T_g)}{E'(\delta, T_g)} \quad (4)$$

Az általánosított Maxwell modell elvi ábráját és az illesztett tárolási modulus görbét a 8. ábra mutatja.



a.)



b.)

8. ábra.

a.) az általánosított Maxwell modell elvi ábrája;

b.) a mérésből és a görbeillesztésből kapott tárolási modulus mestergörbék 24 °C-on

## 2. Érintkezési, hőtani és kopási szimuláció

Polimer anyagok esetében a hőmérséklet változása, a hőtágulás és az időfüggő sajátosságok befolyásolják az alkatrész anyagjellemzőit és kopott geometriáját, mely hatásokat a kopási szimulációs modellekben vehetjük figyelembe (9. ábra).

A kopási folyamat végeselemes modellezése gyakran a lineáris kopáselméleten alapul. A kezdeti paraméterek a modell geometria, a terhelések, a kényszerek, és a kopási modell paraméterei illetve az anyagtulajdonságok. A modell geometriájának definiálása után az érintkezési állapot meghatározása szükséges. Ily módon ismert lesz az érintkezési tartomány mérete és elhelyezkedése.

Minden egyes szimulációs lépésben a rendszerparaméterek konstansok és meghatározzák a kopási mélységet minden csomópontban, követve az alábbi diszkrétizált kopási modellt: A növekményes eljárás szerint az  $i$ -edik csomópontban a  $j$ -edik megoldási lépésben a kopási mélység

$$h_{j,i} = h_{j-1,i} + \Delta h_{j,i} \quad (5)$$

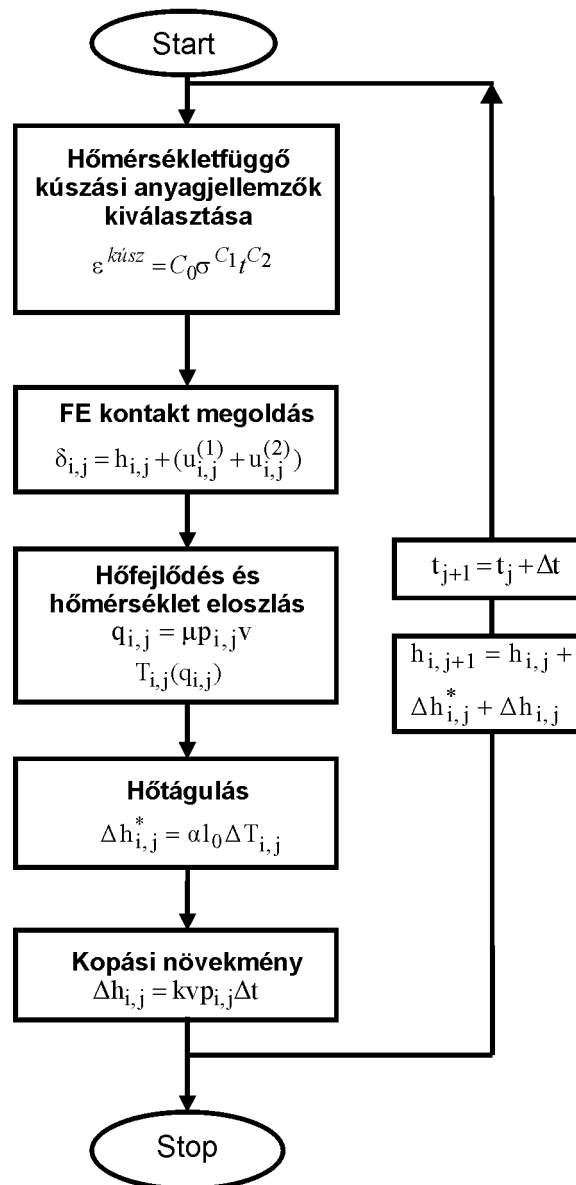
ahol a  $\Delta h_{j,i}$  a kopási növekmény [mm] az  $i$ -edik csomópontban a  $j$ -edik megoldási lépésben.

A csomóponti kopási növekmények meghatározása konstans  $\Delta t$  időnövekmény esetén:

$$\Delta h_{j,i} = k(p_{j,i}v)\Delta t, \quad (6)$$

ahol  $v$  a csúszási sebesség,  $k$  fajlagos kopási tényező és  $p_{j,i}$  az érintkezési nyomás az előző értelmezés szerint.

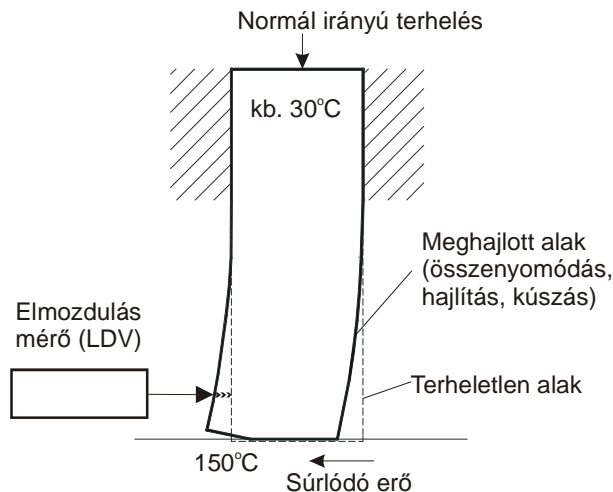
A blokkdiagramban a fajlagos kúszás a Bailey-Norton törvény szerint határozható meg míg a hőfejlődés összefüggésében a súrlódási tényező is szerepel az eddig ismert paramétereken túlmenően.



9. ábra.  
A kopási algoritmus fő elemei

## 2.1 Pin-on-disc mérési elrendezés hőtani és kopási szimulációja

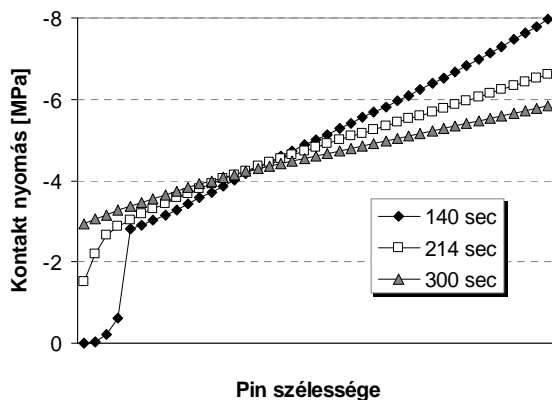
A 10. ábrán a próbatest kopási vizsgálat alatti viselkedésének sematikus vázlata látható. A PEEK pin a normál irányú terhelés hatására összenyomódik, míg a súrlódó erő hatására ezzel egyidejűleg meghajlik. Az ábrán látható, hogy a próbatesten kezdetben – a meghajlás miatt – élszerű felfekvés jön létre. Ahogy a kopás miatt az érintkezési tartomány szélesedik (majd végül bekövetkezik a teljes bekopás) a próbatest elhajlása fokozatosan nő. Ezt a hatást a kúszás is erősíti, hiszen ha a kopás hatására a pin elhajlása nem nőne, a viszkoelasztikus anyag miatt (időben változó anyagjellemzők) akkor is bekövetkezne az elhajlás növekedése.



**10. ábra Az elhajlásmérés sematikus elrendezése**

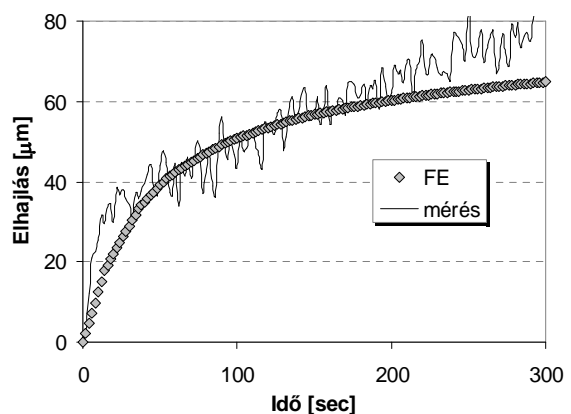
A 11. ábrán láthatók a pin kopásának különböző fázisaira jellemző érintkezési nyomáseloszlások. A próbatest 140 sec alatt kapta meg a teljes terhelést és összhangban azzal, hogy az érintkezési tartomány csak a próbatest keresztmetszetének egy hányadára terjed ki, a sarokfelfekvésnél viszonylag magas érintkezési nyomás alakul ki. Ahogy a kopás következtében az érintkezési tartomány szélessége növekszik és eléri a próbatest teljes szélességét (214 sec) a nyomás csúcsértéke csökken. A további kopás pedig egyre inkább csökkenti az érintkezési tartomány két szélén tapasztalható különbséget (300 sec) és közelíti a névleges  $p=4\text{MPa}$  értékhez ( $F_N/A_{\text{pin}} = 64 \text{ N}/16 \text{ mm}^2$ ).

A 12. ábra a lézeres elhajlásmérés és a végeleemes modellből kapott elhajlás összehasonlítása látható a 0-300 sec időtartományban. A számított és a mért eredmények jó egyezést mutatnak.



**11. ábra.**

**Az érintkezési nyomáseloszlás változása**

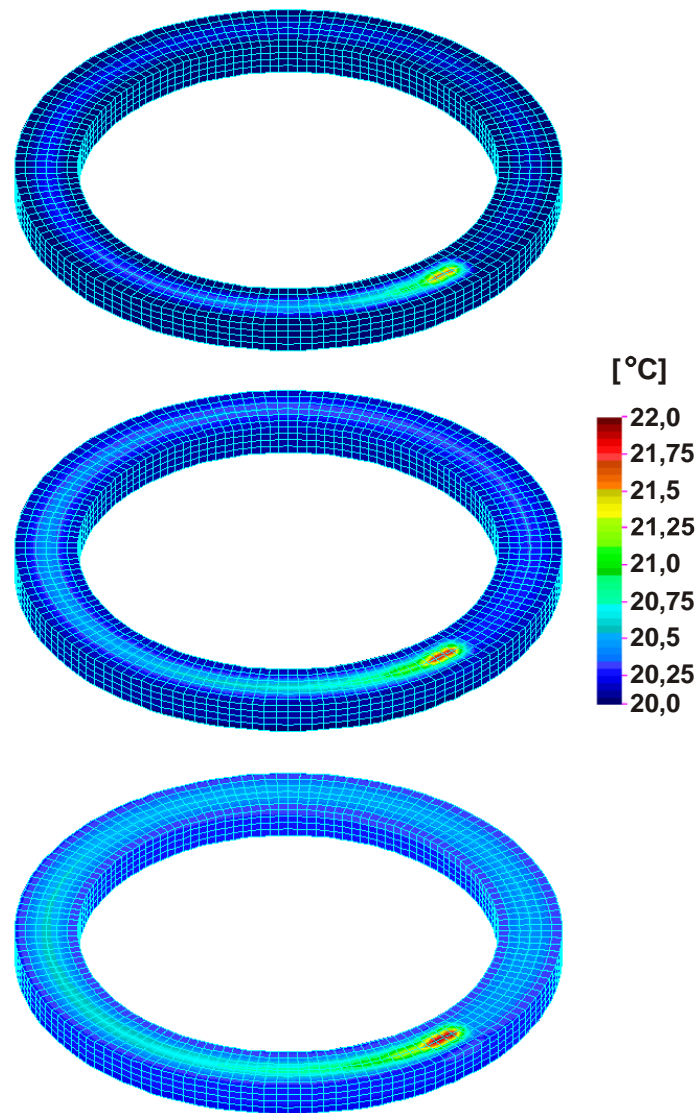


**12. ábra.**

**A pin elhajlása**

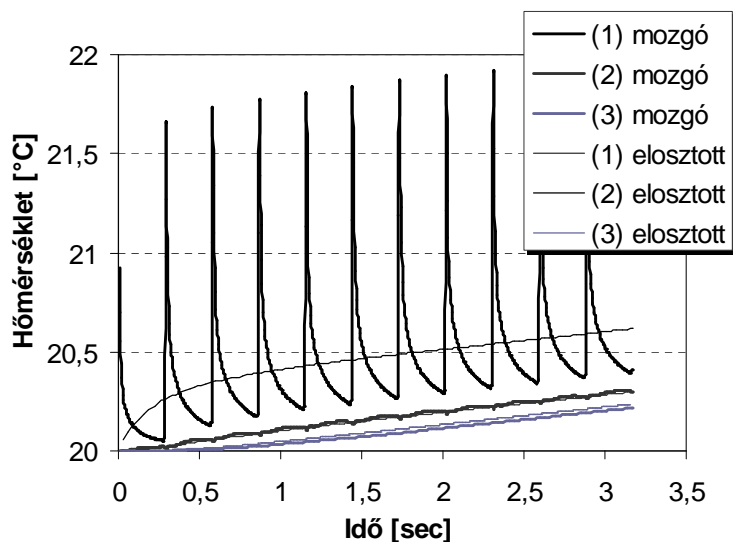
Egyenletes sebességű körmozgást végző hőforrás esetén a mozgó hőforrás (13. ábra) hőmérsékleti ingadozást okoz a test felszínközeli anyagrétegében. Ennek a hatásnak a vizsgálatára végeleemes modelleket készítettünk. Az 14. ábra mutatja, hogy a mozgó hőforrás a felszínen okoz hőmérsékleti ingadozást, az alatt a jelenség egyre kevésbé érezhető. Ha a valóságos körülményeket tekintve azt is figyelembe vesszük, hogy a hőtani végeleemes modellekbe beépített kontakt hőellenállás a kapcsolódó alkatrészekben tovább csökkenti ezt a hatást – hővezetés szempontjából „fojtásként” viselkedve – akkor belátható, hogy ez a hatás

gyakorlatilag megszűnik a csatlakozó alkatrészekben és a mozgó hőforrásos modell jól helyettesíthető elosztott hőforrású modellel.



**13. ábra.**  
**A mozgó hőforrásos modell eredményei 1, 6 és 11 fordulat után**



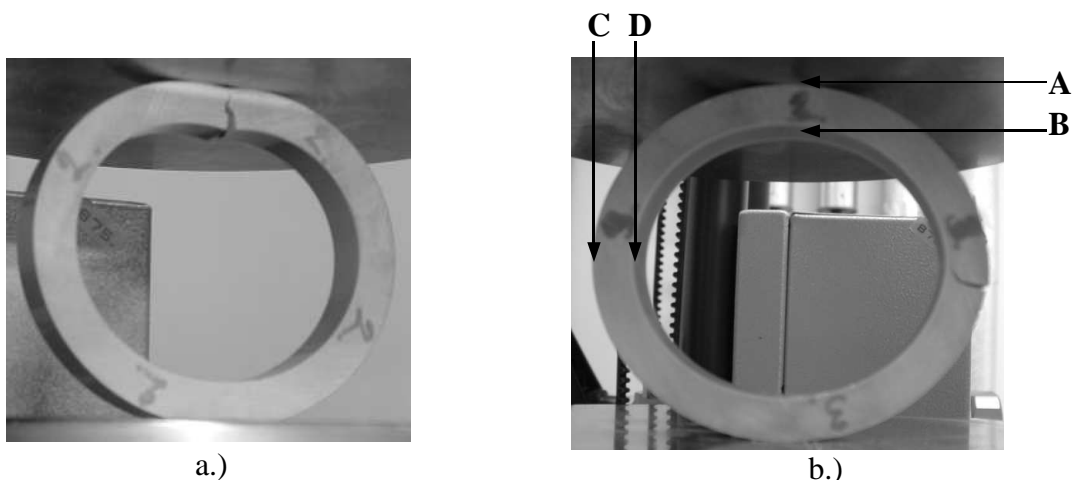


14. ábra.

A körmozgást végző és elosztott hőforrás hatásának összehasonlítása ( $p=1$  MPa,  $v=1$  m/s)

## 2.2 FGM gyűrűk nyomóvizsgálata és modellezése

Kísérleteket végeztünk a különböző anyageloszlású próbatetek strukturális tulajdonságainak meghatározására. A próbatetek készítése során változtattuk a centrifugálás sebességét, idejét és keverék viszkozitását.

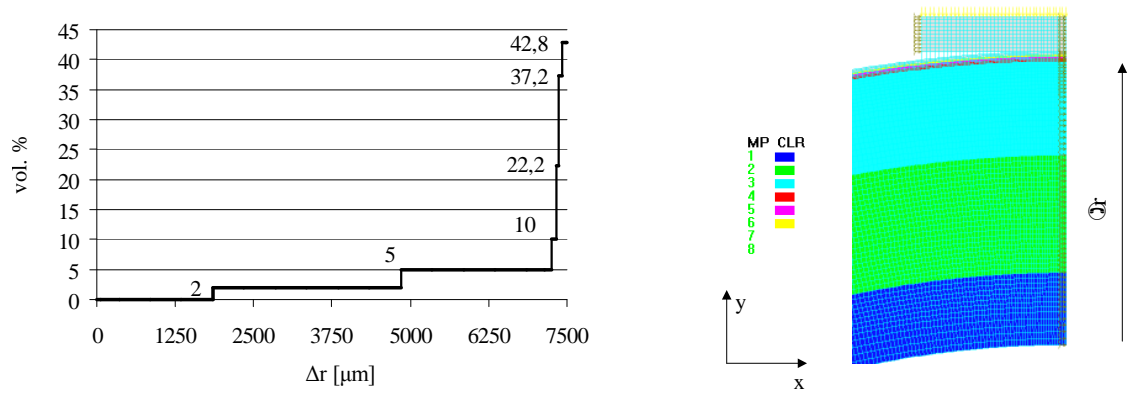


15. ábra.

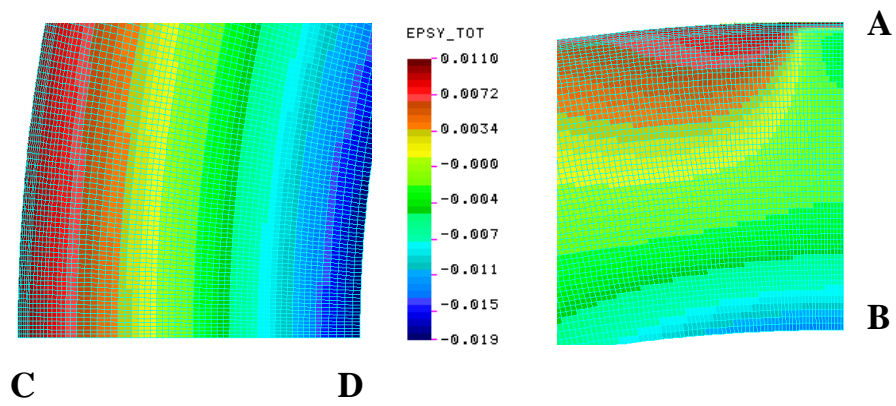
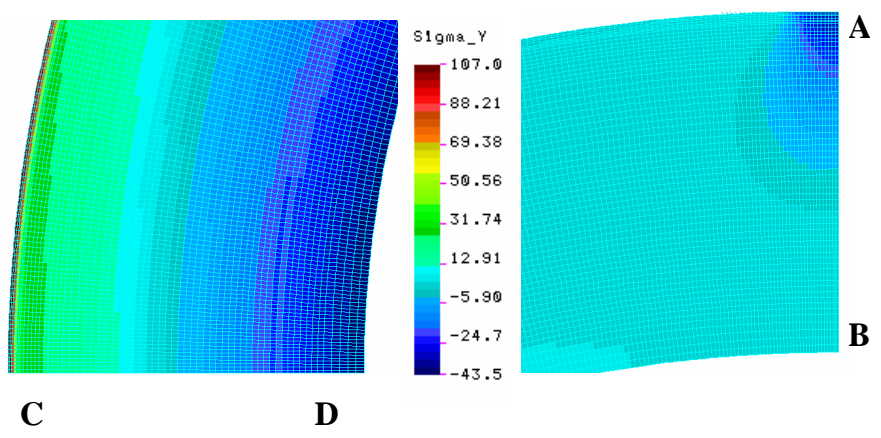
A gyűrűk tönkremenetele nyomóterhelés következtében  
(a) egyenletes anyageloszlású (b) FG gyűrű

A nyomóvizsgálatok során (15. ábra) a gradiens gyűrűk merevebbnek mutatkoztak, de hamarabb következett be esetükben a törés, mint a tiszta gyantából készült, vagy egyenletes anyageloszlású gyűrűk esetében. Az FG gyűrűk esetében a törés a gyűrű külső felszínén, a szimmetriasík jobb vagy bal oldalán következett be. A tiszta gyanta és az egyenletes anyageloszlású kompozit gyűrűk esetében a törés a gyűrűk belsejében, alul vagy felül következett be.

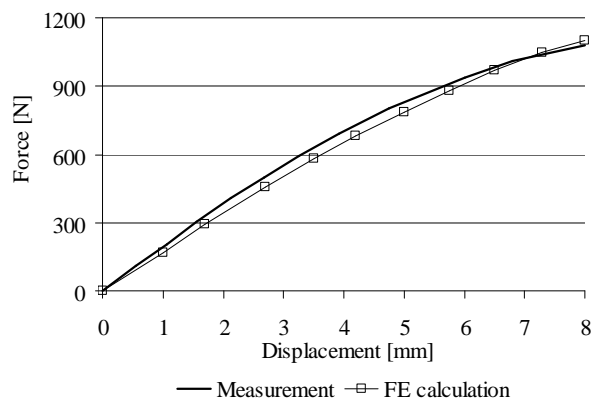
A 16. ábra a végeelem modell egyes rétegeinek SiC térfogatszázalék tartalmát mutatja meg. A különböző rétegek különböző színnel vannak ábrázolva. Minden réteghez hozzá van rendelve a megfelelő húzó és nyomó  $\sigma$ - $\varepsilon$  függvény.



**16. ábra.**  
**Átlagos SiC tartalom és az FG gyűrű rétegei**



A 17. ábra és a 18. ábra azt mutatja, hogy nagy feszültség és alakváltozás a gyűrű külső peremén alakul ki. Ennek oka a külső rétegben található magas SiC térfogatszázalék tartalom.



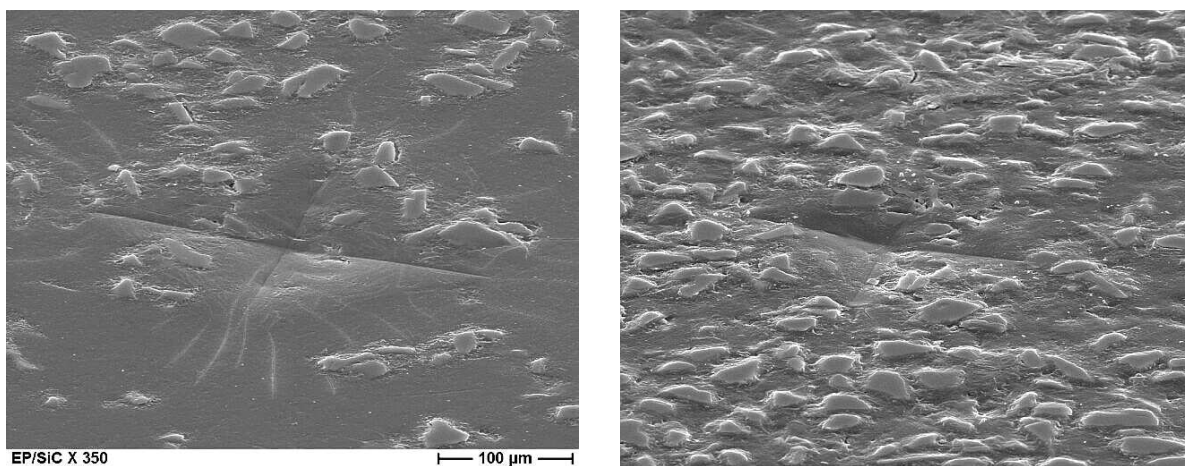
**19. ábra.**

**Erő elmozdulás görbe. Mérési és számítási eredmények**

A 19. ábra szerint, hogy a mérési és számítási eredmények jól egyeznek. A gyűrűk végeselemes modelljei helyesen mutatják a gyűrűk valóságos viselkedését.

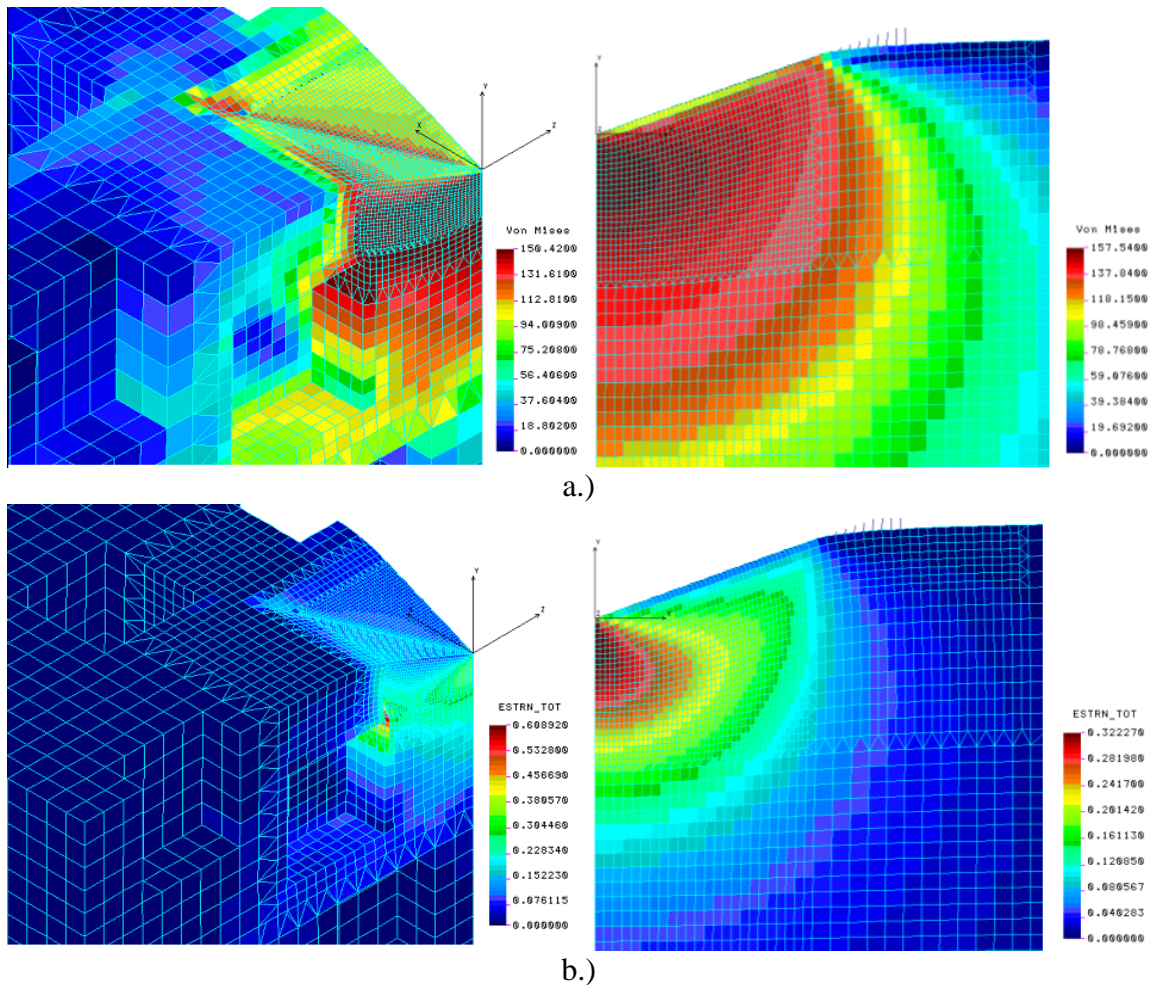
**2.3 FGM gyűrűkön végzett mikro-keménység mérések modellezése**

A próbatetek keresztmetszetében mikro-keménység méréseket végeztünk a tribológiai jellemzők (alakváltozás, feszültségek, tönkremeneteli mechanizmusok, stb.) meghatározására. Az 20. ábra a mátrixban mikrorepedéseket valamint a gyémántgúla szélein nagymérvű képlékeny alakváltozásokat mutat.



**20. ábra.**

**Elektronmikroszkóp felvételek a lenyomatokról**



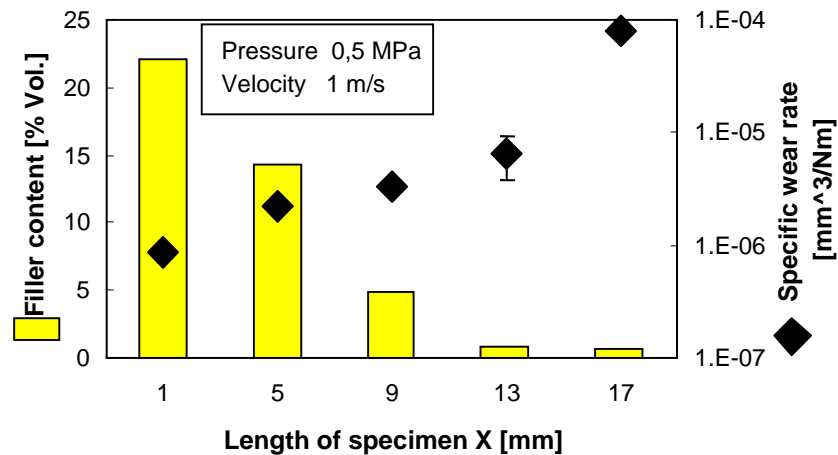
21. ábra.

**A von Mises egyenértékű feszültségi (a) és egyenértékű alakváltozási (b) eredmények az érintkezési tartomány közelében, a 3D-s mikro-modellben és a 2D-s modellen**

A 3D-s modell a 21. ábra világosan megmutatja a SiC erősítőrészecskék hatását a mátrixban. A feszültség és alakváltozás-eloszlás szerint a legnagyobb feszültség és alakváltozási csúcsok az erősítőrészecskék éleinél és sarkainál alakulnak ki. Ez nem adódik tovább az anyag mélyebb rétegeibe. A beágyazott részecskék a beágyazásuk egész felületén adják tovább a terhelést a mátrixnak. A terhelt részecskék környezetében a mátrix anyagának roncsolódása az elektronmikroszkópos felvételeken is megfigyelhető.

### **Kopási tulajdonság**

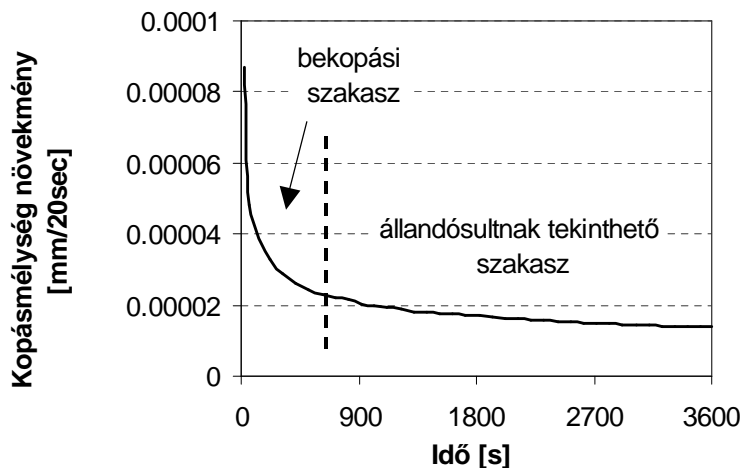
Különböző anyagú, gradiens szerkezetű próbatestek sorozatán vizsgálatokat végeztünk. A 22. ábra egy példát mutat arra, hogy hogyan változik a gradiens próbatest keresztmetszetében az erősítőrészecskék térfogatszázaléka és a kompozit fajlagos kopása. A külső zónákban, ahol az erősítőrészecskék részaránya magas (a centrifugálás hatása miatt), a fajlagos kopási arány jóval kisebb, mint a próbatest belseje felé haladva, ahol szinte nincs is erősítőrészecske.



22. ábra.

Fajlagos kopási arány az erősítőrészeszke tartalom arányában (a próbatesteket különböző helyekről vágtuk ki Aramid részeszke/epoxigyanta mintákból)

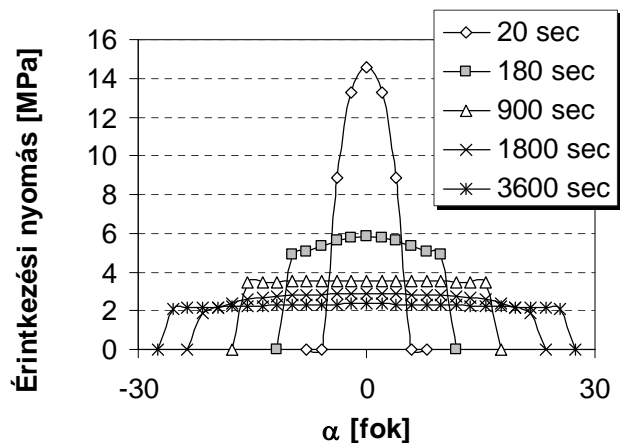
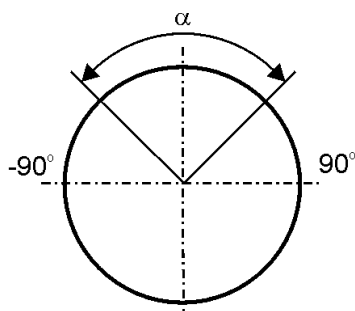
#### 2.4. Hibrid csapágy kopási és hőtani szimulációja



23. ábra.

Kopási mélység növekmény időbeli változása  $\Delta t=20$  sec időnövekmény esetén

A geometria sajátosságaiból (henger-henger érintkezés) és a kopási térfogat állandóságából adódóan, az egyes időlépésekhez ( $\Delta t=20$  sec a FEM modellben) egyre kisebb kopási mélység növekmény tartozik (23. ábra).

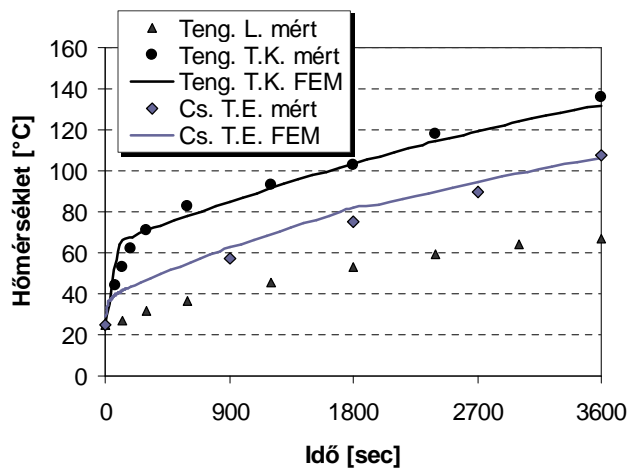


24. ábra.

**Az érintkezési nyomás eloszlása a  $-30^\circ \dots +30^\circ$  szögtartományban**

A szobahőmérsékleti érintkezési nyomást bemutató eredmények a 24. ábra láthatóak  $t=20, 180, 900, 1800$  és  $3600$  másodperc elteltével. Az érintkezési nyomás csúcserőke jelentős csökkenést mutat a kopás következtében.

A hőtani modellel meghatározható a közvetlenül nem mérhető érintkezési tartománybeli hőmérséklet. Az érintkezési tartománybeli hőmérséklet eloszlás ismerete különösen polimer anyagok esetén hasznos tervezői információ, mivel a polimerekre általában jellemző a mechanikai és hőtani tulajdonságok hőmérsékletfüggése, ami jelentős hatással lehet a kopási viselkedésre is.



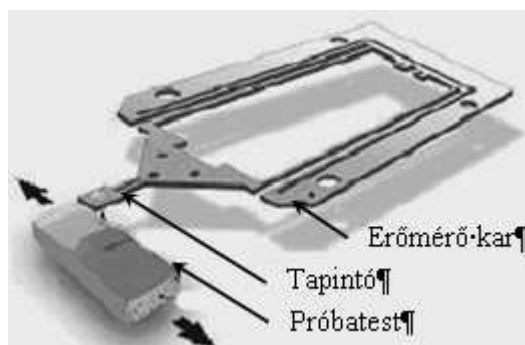
25. ábra.

**Mért és számított hőmérsékletek a tengely homloklfelületén és a csapágy hátoldalán**

A hőtani modellben a hőpartíció meghatározásához, vagyis a tengely és csapágy oldalak közötti „hőmérsékleti egyensúly” eléréséhez többféle eszközzel – lézeres hőmérővel, termoelemmel és termokamerával – mért hőmérsékleti adatokat használhatunk fel (25. ábra).

**2.5 Acél / elasztomer csúszópár vizsgálata**

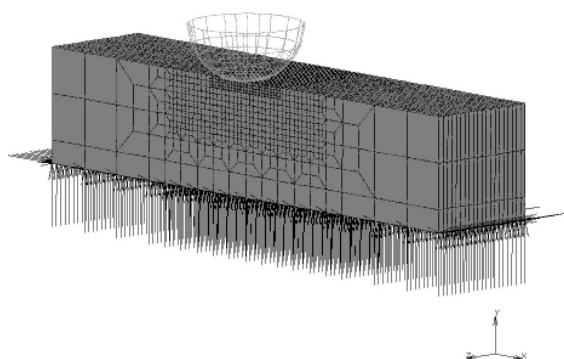
A mérés során egy golyót egy gumilapba nyomtunk, majd a golyót alternáló mozgásra kényszerítettük és mértük a reakcióerőket, amelyből meghatározható a súrlódási tényező nagysága a golyó pozíciójának függvényében. A modellezés során (27. ábra) ennek a mérésnek az eredményeit próbáltuk reprodukálni különös figyelmet fordítva a súrlódási tényező hiszterézis komponensének meghatározására.



**26. ábra.**

### **A mérési elrendezés vázlata**

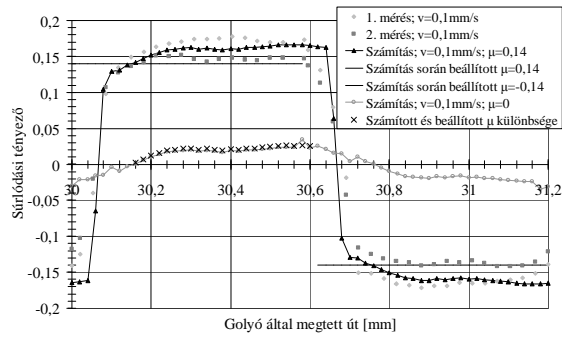
A modellezés célja, hogy „leválasszuk” a mérésből kapott súrlódási tényezőből a hiszterézis okozta komponenst. A teljes mért súrlódási tényező tartalmazza a hiszterézis, a folyadékfilmnyírás és a vegyes súrlódási állapotból adódó hatásokat. Vegyes súrlódási állapot esetében foltokban kialakulhat gumi-fém érintkezés, így adhéziós kapcsolat kialakulásával is számolnunk kell. A hiszterézisből származó súrlódási tényező leválasztásához a mérésből származó súrlódási tényezőt tehát két tagra kell felosztani: egy hiszterézist jellemző tagra és egy a folyadékfilmnyírást és vegyes súrlódást együttesen tartalmazó súrlódási tényező tagra. A hiszterézis okozta súrlódási tényező a gumi veszteségi tényezőjéből származik, ami az általános Maxwell modell segítségével vehető figyelembe a szimuláció során.



**27. ábra.**

### **A gumilap és golyó csúszásának végeleemes modellje**

A 28. ábra a fekete vonal az iteratív számítás során előírt folyadékfilmnyírást és vegyes súrlódást figyelembe vevő súrlódási tényezőt jelöli. A különálló világosszürke rombuszok és négyzetek a mért súrlódási tényező értékeit, a folytonos szürke vonallal összekötött körök a  $\mu=0$  számítás eredményeit, a folytonos fekete vonallal összekötött fekete háromszögek az iteratív számítás eredményeit, a fekete keresztek pedig az iterált számítás eredményeinek és a beállított súrlódási tényező különbségét mutatják. Az ábrákon látható 1. és 2. mérés azt jelenti, hogy minden mérés kétszer került elvégzésre, a mérési eredmények kísérleti reprodukálhatóságának ellenőrzése céljából.



**28. ábra.**

**A súrlódási tényező a golyó által megtett út függvényében,  $F=100\text{ mN}$ -os terhelés és  $v=0,1\text{ mm/s}$ -os maximális sebesség esetén**