

## Funkcionálisan gradiens anyagszerkezetű kompozit görgő végeselemes vizsgálata

Felhős Dávid, Dr. Váradi Károly, Dr. Klaus Friedrich

Gépszerkezet-tani Intézet,

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műegyetem rkp. 3.,

1111 Budapest

Institute for Composite Materials (IVW GmbH.), University of Kaiserslautern,  
Erwin-Schrödinger-Strasse, 67663 Kaiserslautern, Germany.

*Tárgyszavak: kompozit; epoxi; mikroméretű SiC erősítőrészesecske; nyomóvizsgálatok; végeselemes modellezés.*

### Bevezetés

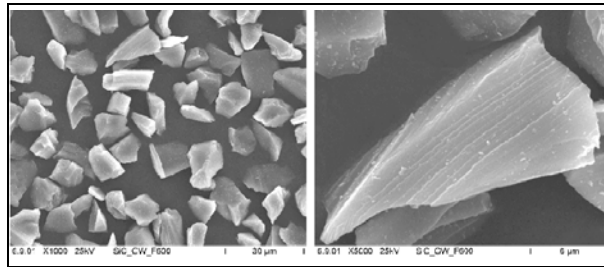
Az utóbbi években egyre inkább előtérbe kerülnek az anyagszerkezet-tani kutatások, amelyek az ipar igényeit igyekeznek kielégíteni a korábbiaknál előnyösebb tulajdonságú szerkezeti anyagokkal. *A funkcionálisan gradiens (FG) eloszlású anyagok többek között kedvező kopási tulajdonságaik miatt kerültek a kutatások előterébe.* Jó kopásállóságú görgőket, fogaskereket, csúszógyűrűket készítenek belőlük [1].

*Az (FG) kompozitokat az jellemzi, hogy az egyik komponens nem egyenletesen oszlik el a másik komponensben. Kutatásaink során SiC részecskékkel erősített epoxigyanta mátrixú kompozitot vizsgáltunk.* Egyenletes anyageloszlású és FG anyageloszlású görgőket készítettünk, ezeket nyomóvizsgálatoknak vetettük alá, és a méréseket végeelem módszerrel modelleztük. A gradiens szerkezetű görgő keresztmetszetében mikrokeménység-mérésekkel határoztuk meg az erősítőrészescskék eloszlását. Mérésekkel meghatároztuk a SiC/epoxi kompozit nyomókarakterisztikáját az erősítőrészescskék térfogatarányának függvényében. *Korábbi kutatásokkal egyetemben [1] mi is azt állapítottuk meg, hogy a gradiens anyagszerkezetű görgők kopási viselkedése kedvezőbb egyenletes anyageloszlású társaikénál a kedvezőbb érintkezési nyomáseloszlás miatt.*

### Felhasznált anyagok

Az erősítőrészescskékről készült elektronmikroszkópos felvételen látszik (1. ábra), hogy a részecskék durva éllel és szabálytalan formával rendel-

keznek. Az erősítőrészekék legnagyobb átlagos mérete 9  $\mu\text{m}$ , rugalmassági modulusa igen magas. A felhasznált anyagok jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.



1. ábra Elektronmikroszkópos felvétel az SiC részecskékről

1. táblázat

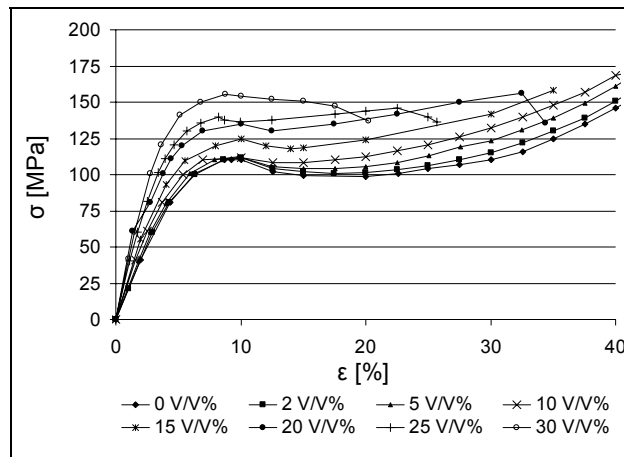
### A felhasznált anyagok tulajdonságai

Név	Sűrűség g/cm <sup>3</sup>	Rugalmassági modulus, GPa	Méret $\mu\text{m}$
<u>Térhálósodott mátrix:</u> Epoxygyanta	1,18	2,7	–
<u>Erősítőrészekék:</u> Szilícium-karbid (SiC)	3,2	455	9

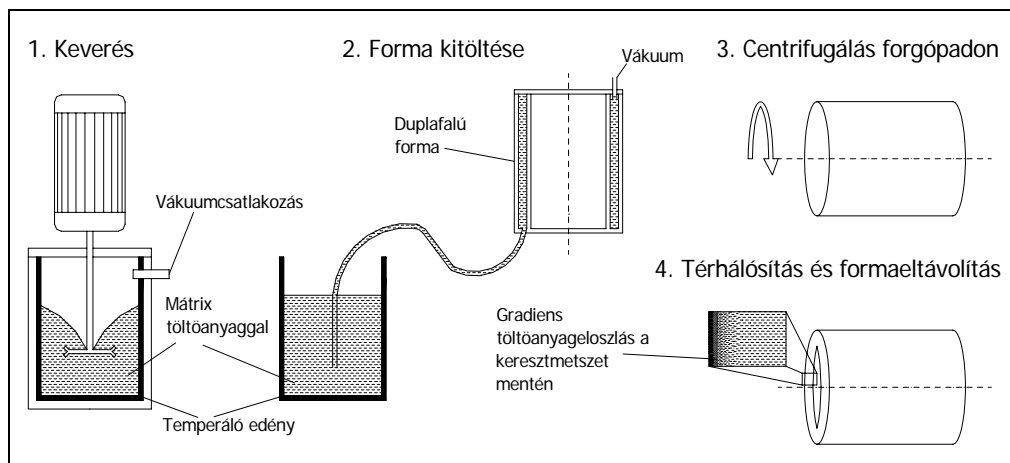
Különböző térfogatszázalékban erősítőrészekéket tartalmazó egyenletes anyageloszlású nyomópróbatesteket készítettünk, és egy univerzális ZWICK anyagvizsgáló berendezésen mértük a kompozit feszültség–alakváltozás görbéit. A nyomóvizsgálatok eredménye a 2. ábrán látható. A SiC V/V% növekedésével növekszik a kompozit rugalmassági modulusa, de kisebb mértékben csökken az alakváltozó képessége. Ennek alapján vizsgálatainkhoz egy könnyen kezelhető SiC V/V%-tartalmú kompozitot választottunk (5 V/V% SiC), ami arra is alkalmas, hogy gradienssé téve a görgőben az anyageloszlást, a kialakuló gradiens jelleg markáns legyen.

A gradiens anyagszerkezet kialakítására különféle eljárásokat dolgoztak ki a felhasznált anyagok és a kialakítandó struktúráknak megfelelően. A gradiens anyagszerkezet készítésének általunk használt technológiai lépéseit mutatja be a 3. ábra. Az első lépés a komponensek összekeverése, vákuum alatt, előírt hőmérsékleten. Második lépés a keverék bejuttatása a dupla falú nemesacél formába. Harmadik lépés a keverék centrifugálása forgópadon, amely során a centrifugálási paraméterek függvényében kialakul a gradiens anyagszerkezet. Esetünkben a centrifugálás 1000 1/min fordulatszámon 30 percig, szobahőmérsékleten zajlott. Utolsó lépés a térhálósítás és a formaeltávolítás, utómegmunkálás. A vizsgálataink során felhasznált 3 görgő képét (tisztá gyan-

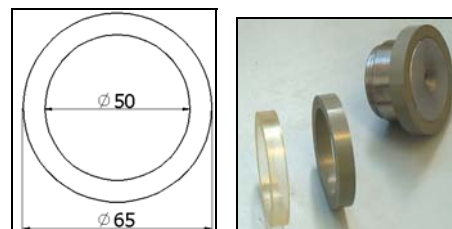
ta, 5 V/V% SiC erősítőrészeket tartalmazó és gradiens anyageloszlású), acélmagját és méreteit a 4. ábra mutatja meg. Az 5 V/V% egyenletes erősítő-részecske eloszlás jó közelítéssel megegyezik a gradiens görgő részecskeel-oszlásával, mivel a gradiens anyageloszlású görgő átlagosan 5 V/V% erősítőrészeket tartalmaz.



2. ábra Az egyenletes anyageloszlású próbatestek feszültség-alakváltozás görbéi nyomó igénybevétel esetén

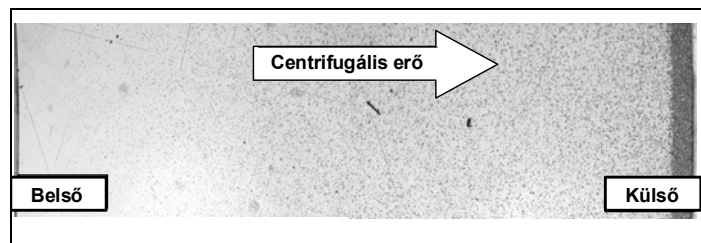


3. ábra A gradiens anyagstruktúra készítésének technológiai lépései

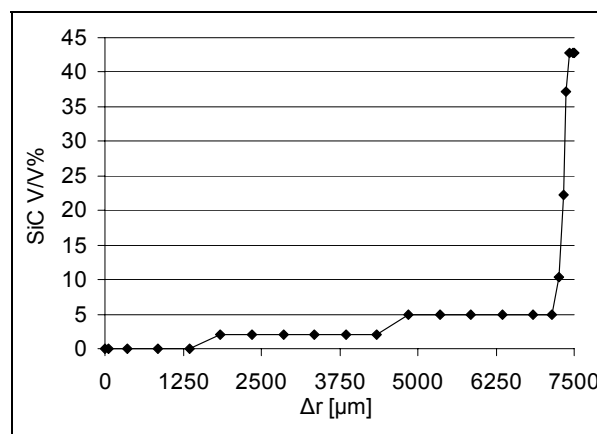


4. ábra A vizsgálatok során használt görgők az acélmaggal és azok méretei

A gradiens görgő keresztmetszetéről készült mikroszkópos felvétel látható az 5. ábrán. A gradiens görgő keresztmetszetében közvetett módon, mikrokeménység-mérések segítségével határoztuk meg az erősítőreszecskek térfogatszázalékának eloszlását. Elsőként felvettük az egyenletes anyageloszlású, próbatestenként különböző arányban SiC részecskéket tartalmazó kompozit univerzális keménységét az erősítőreszecskek térfogatszázalékos arányának függvényében. Ezután a gradiens görgő keresztmetszete mentén is mikrokeménység-méréseket végeztünk, és felvettük az univerzális keménység változását a keresztmetszetben. A két görbét összevetve meghatározhattuk a görgő keresztmetszetében az erősítőreszecskek térfogatszázalékának eloszlását hasonlóan a [2] szakirodalomhoz. A 6. ábrán látható a SiC részecskék mérésekkel közvetett módon meghatározott eloszlása a keresztmetszetben. A kapott eloszlásdiagramon és a mikroszkópos felvételen is azt láthatjuk, hogy a görgő belső pereméről az erősítőreszecskek teljes mértékben elvándoroltak, és a külső peremen egy vékony rétegben igen nagy arányban (~42,5 V/V%) sűrűsödtek össze, kemény kopásálló réteget hozva létre a felületen.

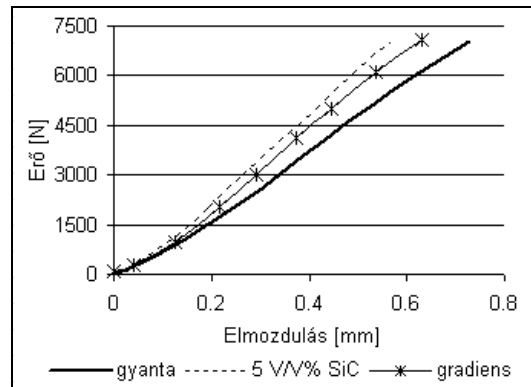


5. ábra Mikroszkópos felvétel a gradiens szerkezetű görgő keresztmetszetéről



6. ábra Az erősítőreszecskek térfogatszázalékának eloszlása a keresztmetszetben

A görgők nyomóvizsgálatait egy univerzális ZWICK anyagvizsgáló berendezésen végeztük el. A görgőkhöz egy szoros illesztésű acélmagot készítettünk, és felvettük a három különféle görgő erő-elmozdulás görbéit. A mérések eredménye a 7. ábrán látható. *Legmerevebbnek az egyenletes anyageloszlású, átlagosan 5 V/V% SiC-t tartalmazó görgő bizonyult, leglágyabbnak a tiszta gyantából készült görgő mutatkozott.*



7. ábra A görgők nyomóvizsgálatainak erő-elmozdulás görbéi

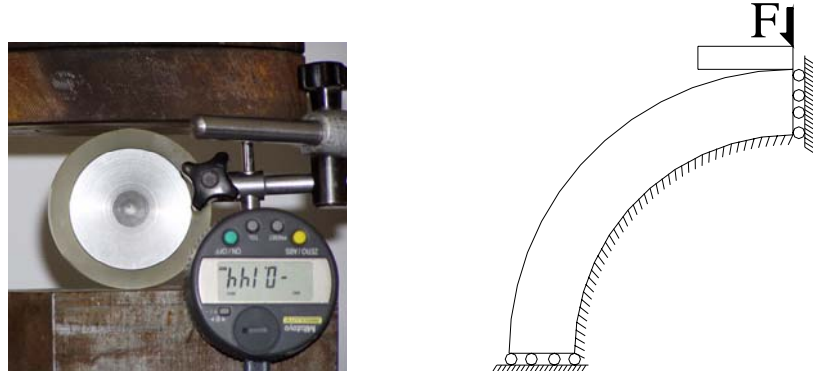
## A végeselemes modellek és számítási eredmények

A három különböző anyagszerkezetű, szoros illesztésű acélmaggal ellátott görgő nyomóvizsgálatának mérési elrendezése lehetővé tette, hogy negyedmodellt készítsünk. A terhelést egy nyomólapon keresztül kontakt elemek segítségével adtuk át a görgőnek. A negyedmodell miatt a szimmetriasíkokban megfelelő kényszereket kellett alkalmaznunk, és a szoros illesztés miatt a görgő belső peremét megfogtuk. A 8. ábrán látható a mérési elrendezés, a görgő negyedmodelljének sematikus vázlatja, a megfogásokkal, a nyomólappal és a terheléssel. Az FG görgő rétegei megjelentek a végeselemes modellben is. A 9. ábrán a gradiens görgő keresztmetszetének különböző térfogatszázalékban erősítőrészecskét tartalmazó rétegei láthatók. Ezekhez a rétegekhez rendeltük hozzá a rétegnek megfelelő SiC erősítőrészecske-tartalmú, egyenletes anyageloszlású kompozit anyag törvényét. A végeselemes számítás a nem-lineáris, a megoldás erő-kontroll szerint vezérelt és a módosított Newton-Rapson módszert alkalmazza. A modellek 19402 db. csomópontot és 19029 db. elemet, továbbá 60 db. kontaktelemet tartalmaznak.

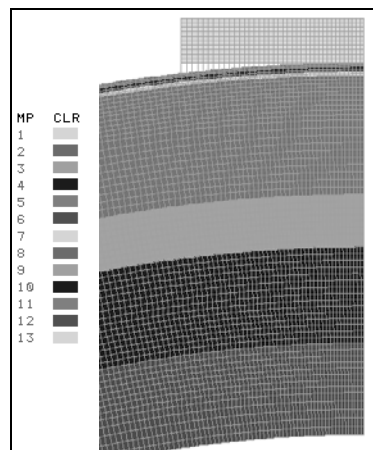
*A végeselemes modellek számított erő-elmozdulás görbéit összevetve a mérési erő-elmozdulás eredményekkel (10. ábra), megállapíthatjuk, hogy azok jó egyezést mutatnak.*

Egy negyedik, képzeletbeli görgő modelljét is elkészítettük. Ez a negyedik képzeletbeli görgő egyenletes anyageloszlású, de a teljes keresztmetszetében olyan nagy rugalmassági modulusú anyagot tartalmaz, mint a gradiens görgő

a külső peremén (~42,5 V/V% erősítőrészecske-tartalom). Ezzel választ kaphatunk arra, előnyösebb-e a gradiens anyagszerkezet az egyenletes anyageloszlású teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú, és valószínűleg nagy kopásállóságú anyagszerkezetnél.



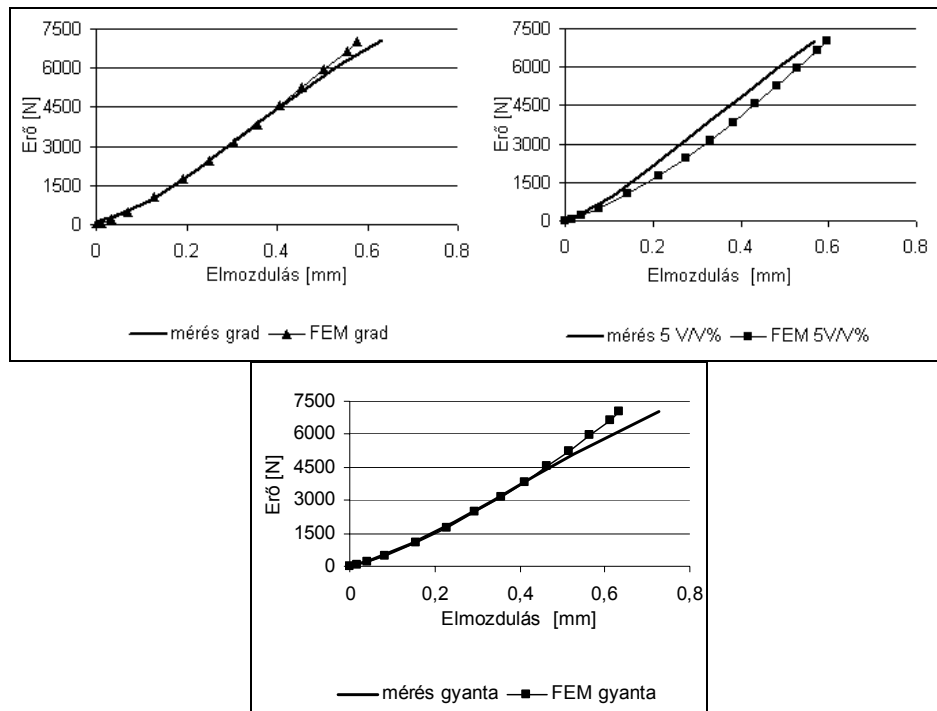
8. ábra A mérés elrendezés és a görgő negyedmodelljének sematikus vázlata



9. ábra. A gradiens görgő keresztmetszetének rétegei

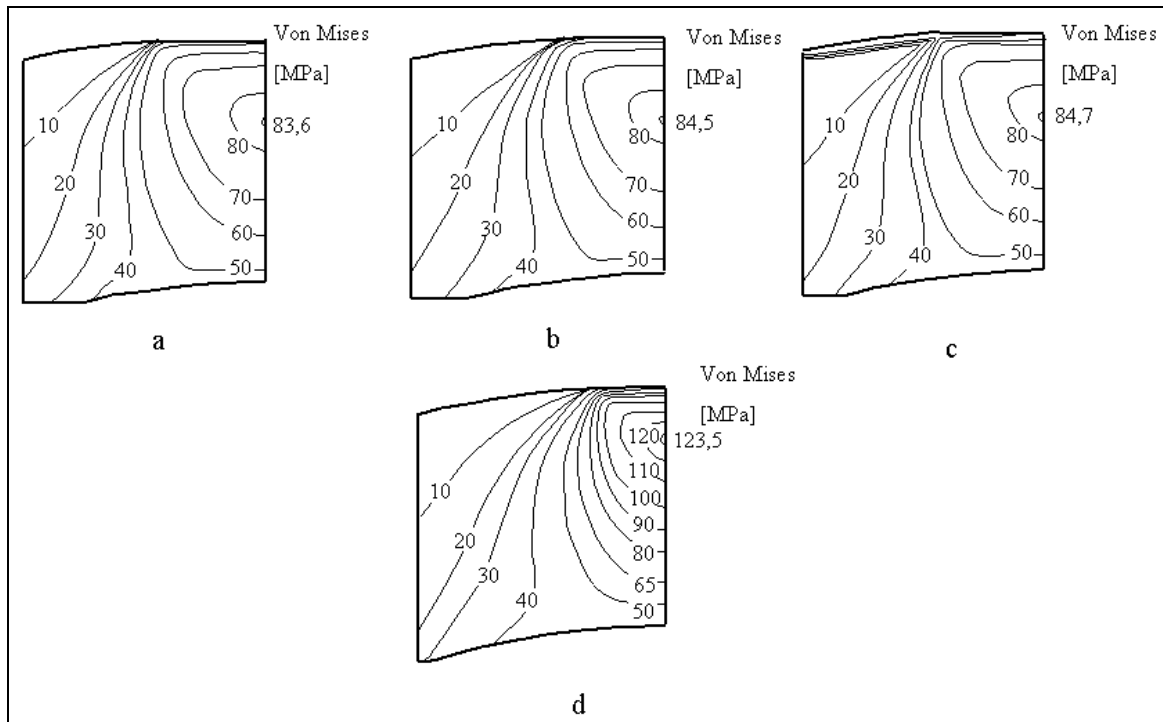
Elemelve a végeleemes számítások eredményeit, a négy görgő feszültség- és alakváltozás-eloszlásának képeiben egyetlen alapvető különbség fedezhető fel (11.-12. ábra). *A teljes keresztmetszetben nagy rugalmassági modulusú görgőben 50%-al magasabb egyenértékű feszültség alakul ki, ugyanakkor kevesebb, mint feleakkora egyenértékű alakváltozás ébred, mint a többi görgőben.* A gradiens görgő esetében a külső rétegben alakul ki magasabb feszültség, mint a másik két esetben, de ezzel együtt kisebb alakváltozás jön létre ebben a nagy rugalmasságú rétegben. Ez azzal magyarázható, hogy a

gradiens görgő kisebb rugalmassági modulusú magja könnyen deformálódhat, ezért a nagy rugalmassági modulusú külső réteg „szélesebb felületen támaszkodik meg”, így a külső rétegben nem alakul ki olyan nagy feszültség, mint a teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú görgőben. Emiatt a külső réteg nincs kitéve nagy igénybevételnek, ami kedvezően befolyásolja a görgő kopási tulajdonságait.



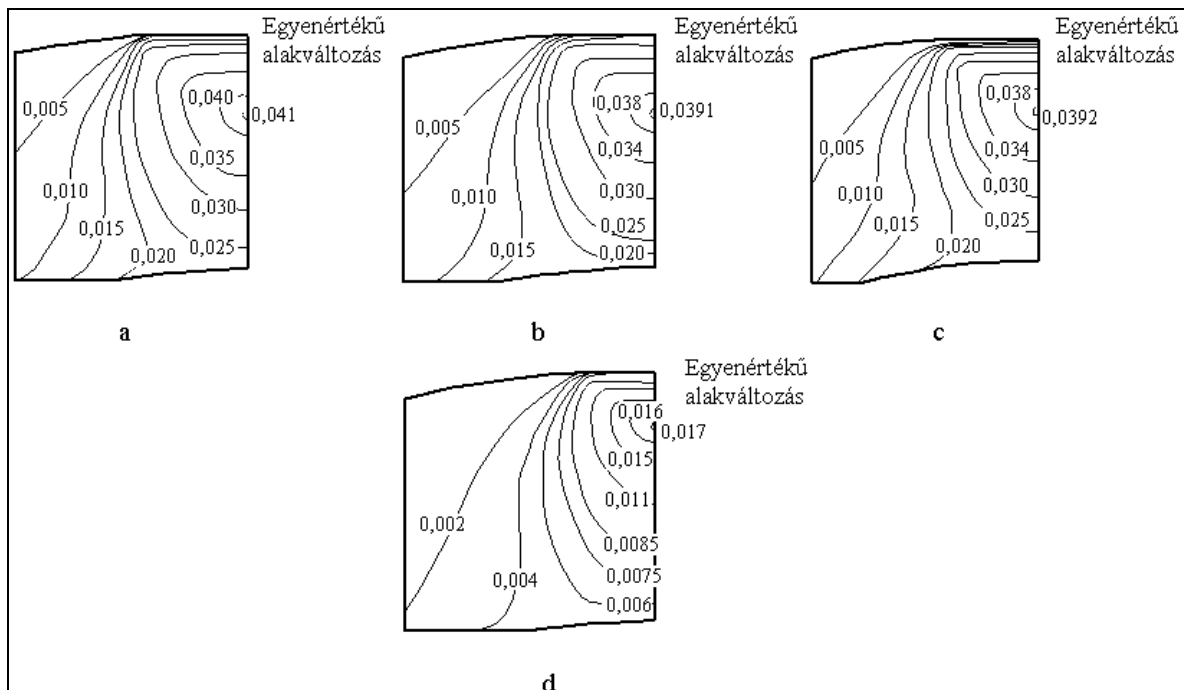
10. ábra. A görgők nyomóvizsgálatának erő-elmozdulás eredményei mérésből és számításból

A négy különböző görgőn kialakuló érintkezési nyomáseloszlásokat hasonlítja össze a 13. ábra. A teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú görgő érintkezési tartománya a legkisebb, és ott alakul ki a legmagasabb érintkezési nyomás is. A *gradiens görgő érintkezési tartományának mérete és az ott kialakuló érintkezési nyomás csak kis mértékben különbözik a tiszta gyantából álló és az egyenletes anyageloszlású 5 V/V% SiC-t tartalmazó görgőn kialakuló érintkezési feszültségektől, ugyanakkor az egyenletes anyageloszlású megoldás a kisebb felületi keménység miatt gyengébb kopási viselkedésű, mint a gradiens párja. A végeselemes számítások eredményei arra engednek következtetni, hogy az általunk megvizsgált görgők közül a gradiens anyagszerkezetű görgő bír a legkedvezőbb kopási tulajdonságokkal, mivel a kopásálló külső réteg ellenére sem növekedtek meg a feszültségek az érintkezési tartomány környezetében.*



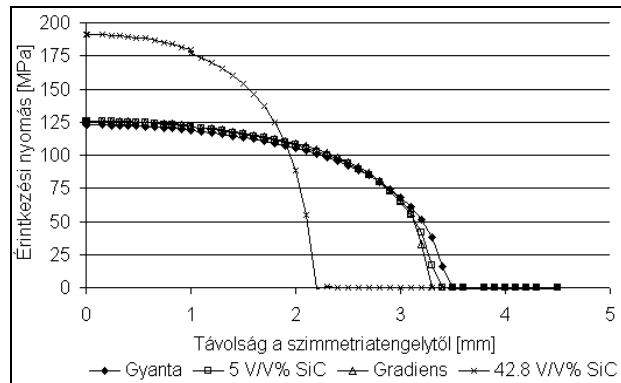
11. ábra A négy különböző görgőn kialakuló feszültségállapot 7000 [N] terhelés hatására

- a) tiszta gyantából készült görgő, b) 5 V/V% SiC erősítőrészecskét tartalmazó görgő,
- c) gradiens anyageloszlású görgő, d) teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú anyagból álló görgő (12. ábra magyarázata is)



12. ábra A négy különböző görgőn kialakuló alakváltozási állapot 7000 [N] terhelés hatására





13. ábra. Az érintkezési nyomás eloszlása a négy különböző görgő esetén

## Következtetések

- A SiC részecskékkel erősített epoxigyanta mátrixú kompozit centrifugálással gradienssé tehető, a peremén egy igen vékony rétegben nagy térfogatszázalékban (42,5 V/V%) dúsulnak fel az erősítőrészecskék, kopásálló, kemény felszín hozva létre a görgőn.
- A mikrokeménység vizsgálata az erősítőrészecskék térfogatszázalék-eloszlásának a közvetett mérésére alkalmas, segítségével a gradiens görgő keresztmetszetében az anyageloszlás meghatározható.
- A kétdimenziós nemlineáris anyagtvényű végeselemes modellek képesek jól leírni a különböző anyagszerkezetű görgők mechanikai viselkedését.
- A gradiens anyageloszlású görgőn nyomási igénybevétel esetén kedvezőbb nyomáseloszlás és nagyobb érintkezési tartomány alakul ki, mint a teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú, azonos felületi keménységű görgőben.
- Mivel gradiens görgő esetében az érintkezési tartományban kedvezőbben alakul a feszültségeloszlás, mint a teljes keresztmetszetében nagy rugalmassági modulusú, azonos felületi keménységű görgőben, a gradiens görgők hosszabb élettartama és kedvezőbb kopási viselkedése várható, mint az egyenletes anyageloszlásúaké.

## Irodalom:

- [1] Christoph L. Klingshirn: Gradientenwerkstoffe zur Anwendung in Gleitlagern und Walzenbezügen, PhD. Diplom, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2004.
- [2] Watanabe, Y., Fukui, Y.: Fabrication of functionally-graded aluminium materials by the centrifugal method. Aluminium Transactions 2 (2000), p. 195–208.

## Röviden...

### Oldószermentes poliuretándsziperziók

A *Syntegra YM 2000* és *YM 2100* márkanévű termék a **Dow Chemical Co.** két új adalékanyaga, amelyeket *csökkentett oldószer tartalmú bevonatok, ragasztók, tömitők és elasztomerek feljavítására használnak*. Mindkét vizes PUR diszperzió oldószermentes, és ezáltal csökkentik a felhasználóknál és a késztermékben az illékony szerves anyagok párolgását. Mindkét polimer öszszeférhető más polimerdiszperziókkal, és alkalmazható önmagában vagy más polimerekkel (pl. akrilátlátexekkel) társítva textilbevonatokban, hajlékony vízálló membránokban vagy ragasztókban. Hasonló anyagokkal összehasonlítva a *Syntegra PUR* diszperzióknak nagyobb (>50%) a szárazanyag-tartalma, ezek a diszperziók stabilabbak, kifejezettebbek a tulajdonságaik. Nagyobb koncentrációjuk miatt kevesebb vizet tartalmaznak, ezért olcsóbb a szállításuk, és gyorsabban száradnak. Előnyeik a PUR kedvező alaptulajdonságait (tartósság, tapadóképeség, szabályozható kikeményedési sebesség, ellenőrizhető térhálósodás) tovább fokozzák. A két új PUR-diszperziót a **Dow** saját – oldószermentes – diszpergálási technológiájával, a *DisPURsa* eljárással gyártja. (További információk: [www. polyurethanes.com](http://www.polyurethanes.com) vagy [www. pur-case.com](http://www. pur-case.com))

(*Plastics Engineering*, 60. k. 6. sz. 2004. p. 7.)

### Mattító adalék bevonatokhoz

Az akrilátalapú mikrorészecskéket tartalmazó *Techpolymer* (a Sekisui Plastics Co.gyártmánya) a fedőrétegbe keverve mattítja a felületet, átlátszó műanyagban fényszóródást idéz elő, és ezzel csökkenti a fényáteresztést, homályosodást okoz. A *Techpolymer* törésmutatójának vagy a bekevert mennyiség változtatásával különböző hatás érhető el. A mikrorészecskék a fedőrétegen egyenetlenséget, emiatt fényszóródást okoznak és így keltik a matt felület látszatát. A *Techpolymer* oldószerálló, könnyen elosztható, és erősebben épül be a kötőanyagba, mint a szilícium-dioxid vagy más szervesetlen mattító részecske. (További információk: [www. TECH-P.com](http://www. TECH-P.com))

(*Modern Plastics*, 34. k. 9. sz. 2004. p.112.)