

BESUGÁRZOTT SZAKÍTÓ PRÓBATESTEK BEFOGÁSÁNAK PROBLÉMÁI FIXTURE PROBLEMS OF IRRADIATED TENSILE TEST SPECIMENS

ANTÓK DÁNIEL¹, KRÁLLICS GYÖRGY²

Kulcsszavak: szakítóvizsgálat, végeselemes módszer, képlékeny alakváltozás
Keywords: tensile test, finite element method, plastic deformation

KIVONAT

Besugárzott próbatesteknél elterjedt a villás befogópofákkal felszerelt univerzális szakítógépeken végzett szakítókísérletek diagramjait vizsgáltuk. A szakítódiagramok lineárisan rugalmas szakasza kisebb mereedségű volt a vártnál, és értéke mérésről mérésre ingadozott. Végeselemes szimulációkkal kimutattuk, hogy ennek az oka a befogópofák geometriai kialakításában és a nagy súrlódási erőkben lehet fel.

ABSTRACT

Diagrams of tensile tests equipped with grips made for irradiated specimens were analyzed. In the diagrams it was observed that the slope of the linear elastic stage was lower than it was previously expected and the slope values were deviating. Finite element method simulations demonstrated that the unexpected behaviour of the slopes can be explained by the geometry of the grips and by the remarkable friction forces.

1. BEVEZETÉS

Az egyik legelterjedtebb mechanikai anyagvizsgálati módszer az egytengelyű szakítóvizsgálat. Segítségével meghatározhatóak a vizsgált darab klasszikus anyagjellemző tulajdonságai (egyezmenyes folyáshatár, szakítószilárdság, kontrakció, szakadási nyúlás, ...) és a képlékeny alakváltozási tulajdonságokat pontosabban leíró folyásgörbe.

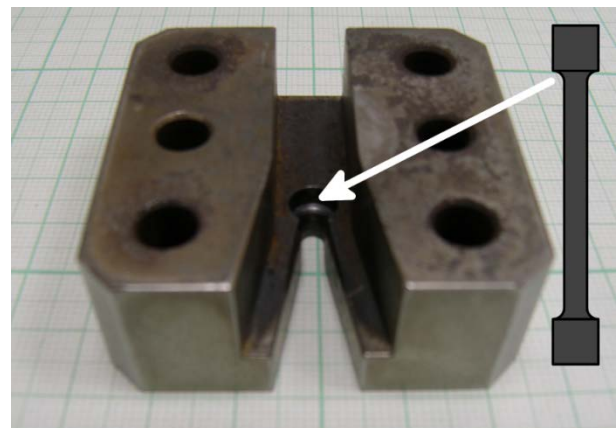
A szakítás során közvetlenül mérik az erőt (F) és a szakítógép keresztfejének elmozdulását (δ). A próbatest nyúlásának mérését extenzométeres és optikai módszerek is kiegészíthetik.

A szakítóvizsgálatok eredményeit a körülményektől függően számos hiba terhelheti [1]. A hibák egy része a próbatestek befogására vezethető vissza. A befogás akkor tekinthető jónak, ha:

1. Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium; Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK) antok.daniel@energia.mta.hu
2. Anyagtudomány és Technológia Tanszék; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem krallics@eik.bme.hu

- a próbatest tengelye és a szakítógép tengelye végig egybeesik a szakítás során;
- a próbatest nem csúszik meg a szakítás során;
- a próbatest csak kis mértékben szenved képlékeny alakváltozást a befogópofák környezetében a szakítás során.

Besugárzott, radioaktív próbatestek szakítása-
kor ügyelni kell arra, hogy a szakítóvizsgálatot végző személyzetet minél kevesebb sugárzás érje. Ennek érdekében elterjedt módszer a „beakasztós” vagy más néven „villás” befogók alkalmazása (1. ábra). Miután a befogópofákat beszerelik a szakítógépbe, az elszakítandó próbatestet egy manipulátor segítségével a befogópofákba helyezik a pofákon kialakított résen keresztül. A próbatest a szakítás során felütközik a pofa toroidális felületén.



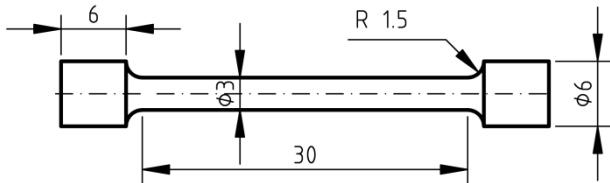
1. ábra: Az egyik befogópofa és a szakító próbatest

Figure 1: A grip and the tensile test specimen

A könnyű behelyezést elősegítő geometria azonban lehetővé teszi, hogy a befogópofában a próbatest szabadabban mozogjon, és ez rontja a rendszer merevségét. A próbatest a befogópofákba való behelyezés után kis holtjártékkal mozgatható, és a súrlódás miatt több, nem teljesen ideális (tehát nem függőleges) pozíciója is stabil. Végeselemes szimulációkkal megvizsgáltuk, hogy a villás befogás milyen mértékben befolyásolja a szakítóvizsgálatok eredményeit és a tapasztalatainkat összevetettük kísérleti eredményekkel.

2. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A szimulációkat egy 1984 és 1993 között végrehajtott kísérletsorozatra alapoztuk. A kísérletekben különböző mértékben besugárzott 15H2MFA típusú reaktoracélból készült hengeres próbatesteket szakítottak el. A próbatestek névleges méretei a 2. ábrán láthatóak. A próbatestek valós méreteit mind szakítás előtt, mind szakítás után lemérték.

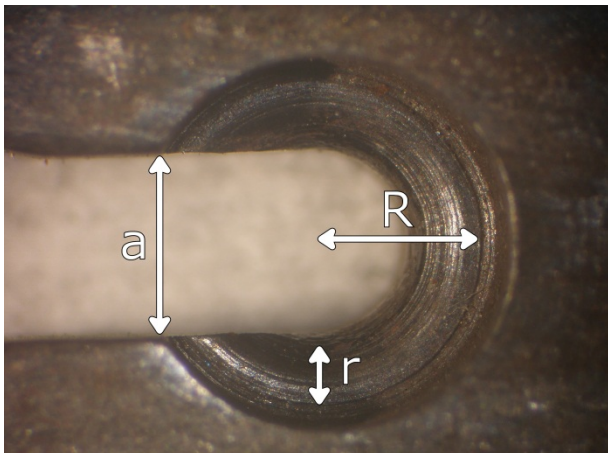


2. ábra: A próbatestek névleges méretei
Figure 2: Nominal dimensions of the specimens

A 15H2MFA ötvözői (m/m%): 0.16% C, 0.24% Si, 0.48% Mn, 0.014% P, 0.016% S, 2.85% Cr, 0.66% Mo, 0.32% V, 0.07% Ni, 0.08% Cu.

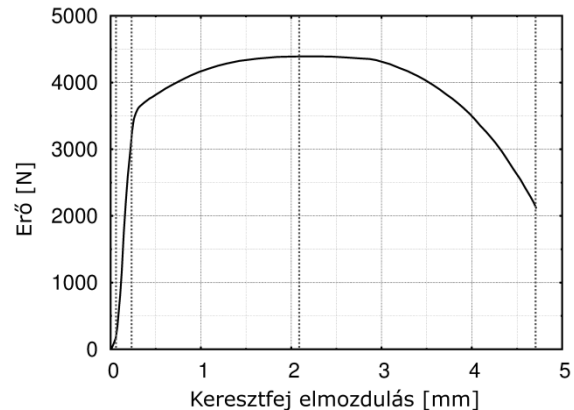
A próbatesteket különböző mértékben sugározták be, de ennek ebben a cikkben kevés jelentősége van. Ennek az az oka, hogy a szakítódiaagram kezdeti, a lineárisan rugalmas nyúlást leíró szakaszát vizsgáljuk, és a neutronsugárzás az acélok rugalmas anyagtulajdonságait (Young modulus, Poisson tényező) csak elhanyagolható mértékben befolyásolja [2]. Emellett a kísérleti eredményekben sem lehetett kimutatni összefüggést a besugárzás mértéke és a lineáris szakasz mereksége között.

A szakítókísérleteket egy MTS 812.21 típusú szervohidraulikus univerzális szakítógépen, 20 °C, 100 °C és 300 °C hőmérsékleteken végezték el. A szakítások sebessége 0,5 mm/perc sebességű volt. A befogópofák toroidális felületének – ahol létrejött a kontaktus a próbatestekkel – méretei a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra: A befogópofa toroidális felületének méretei
Figure 3: Dimensions of the specimen's toroidal surface

A toroidális felületet a tórusz R és r sugarával lehet leírni: $R = 2,77$ mm; $r = 1,13$ mm. A rés, amelyen keresztül a próbatestek helyezhetők be, $a = 3,17$ mm széles. Egy tipikus, mért szakítódiaagramot mutat be a 4. ábra:



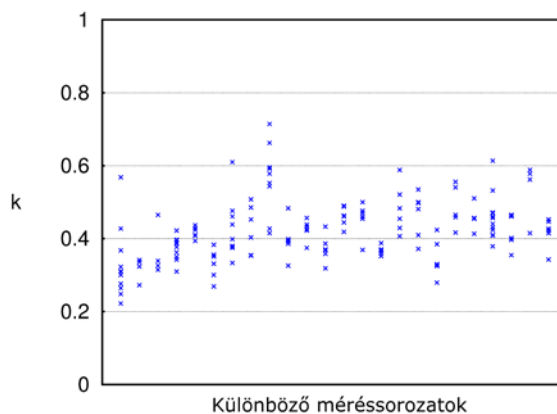
4. ábra: Besugárzatlan próbatest szakítódiaagramja
Figure 4: Tensile diagram of an unirradiated specimen

A mérések szakítódiaagramjait megvizsgálva a következő felfedezést tettük: a görbék kezdeti, lineáris, a rugalmas nyúlásra jellemző szakaszának mereksége rendszeresen eltér attól az értéktől, melyet az adott próbatest valós (nem névleges) méretei és a hőmérsékletfüggő rugalmas anyagtulajdonságai alapján megbecsülhetünk. A merekségek becslését analitikusan, a Hooke-törvény segítségével is el lehet végezni, de a nagyobb pontosság kedvéért végeeselemes számításokat használtunk (MSC Marc). Tengelyszimmetrikus modelljeinkben minden egyes próbatestnek a valós méretei szerepeltek, és a befogás tökéletesen merev volt. Az így becsült merekségeket s_{merekv} [kN/mm] jelöli. A mérések merekségeit $s_{mért}$ jelöli.

Amennyiben veszünk egy mérést és a hozzátartozó szimulációt, a $k = \frac{s_{mért}}{s_{merekv}}$ azt mutatja meg,

hogy a mérés rugalmas szakasza mennyivel viselkedett lágyabban az elméletben várhatónál. Az összes mérés merevségének k értékei az 5. ábrán tekinthetők meg.

Amennyiben a próbatest-befogás-szakítógép rendszer teljesen merev lenne, $k = 1$ körüli értéket kellene kapnunk. Az 5. ábra azt sugallja, hogy a rendszer lágyabb az elméletileg elérhető teljesen merev állapotnál, és lágyasága mérésről mérésre változik. Ehhez kis részben hozzájárul az, hogy a szakítógép is elszenved valamekkora rugalmas alakváltozást a szakítás során, és ezt belemérjük a keresztfej elmozdulásába. Viszont a rendszer lágyaságának mértékét és ingadozását ez önmagában nem magyarázza meg.



5. ábra: A szakítókísérletek merevségének ingadozása

Figure 5.: The deviation of the tests' rigidity

Az egyes próbatestek anyagjellemző tulajdonságai kis mértékben különbözhetnek. A szobahőmérsékletű, besugárzatlan próbatesteken elvégzett extenzométeres mérések segítségével meghatározott Young modulusok jó közelítéssel (5-10%-on belül) visszaadták a 15H2MFA Young modulusának a próbatestek gyártója (Škoda) által mért értékét. Így kijelenthetjük, hogy a rugalmas anyagjellemzők bizonytalansága biztos, hogy kisebb, mint a k ingadozása. A legvalószínűbbnek tehát az tűnt, hogy a k értékeit a legnagyobb mértéken a befogás befolyásolta.

3. VÉGESELEMES SZÁMÍTÁSOK

Végeselemes számításainkhoz az MSC.Marc 2005r3 szoftverét használtuk. Modelljeinkben a nagy alakváltozások elméletét alkalmaztuk. A tengelyszimmetrikus modelleket 8-csomópontos, izoparametrikus elemekből, a 3D-s modelleket 20-csomópontos, izoparametrikus elemekből építettük fel. A csomópontok száma az előbbi esetekben 3896, az utóbbiakban 31835 volt.

A próbatestet a névleges méretei szerint modelleztük. A próbatest anyagjellemző tulajdonságait a 20 °C hőmérséklethez tartozó gyári (Škoda) adatok szolgáltatták: a Young modulus 209900 MPa, a Poisson tényező 0,3. A képlékeny alakváltozást a következő folyásgörbe segítségével vettük figyelembe:

$$\sigma_M = 336.7 + 674.27(\varepsilon_M^p)^{0.183} \text{ MPa [3]}$$

σ_M jelöli a von Mises feszültséget, míg ε_M^p az egyenértékű képlékeny alakváltozást.

A befogópofák anyaga kemény szerszámacél. A szimulációk során alakváltozásukat nem vettük figyelembe. A befogópofák és a próbatest érintkező felületei közötti súrlódást többféle súrlódási

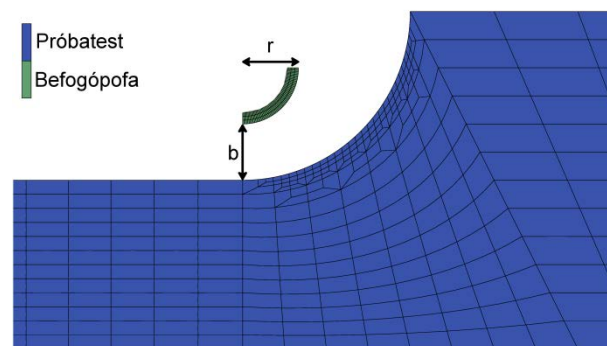
tényező (μ) értéket használva modelleztük. μ nehezen becsülhető, mert a pofák felületi érdessége nagy (4. ábra).

A szimulációk segítségével meghatároztuk az erő – keresztfej elmozdulás diagramokat és azt, hogy a próbatestekben milyen feszültség- és alakváltozás eloszlások jönnek létre. A szimulált diagramok lineáris szakaszának meredekségét jelölje s_{sim} . Ennek segítségével bevezethetjük

$$k' = \frac{s_{sim}}{s_{merev}}$$

mennyiséget, mely megmutatja, hogy az adott szimuláció mennyivel viselkedik lágyabban egy olyan szimulációnál, ahol a befogás tökéletesen merev.

Tengelyszimmetrikus elemzéseinkben azt vizsgáltuk meg, hogy a befogópofák geometriája hogyan befolyásolja a szakítókísérletet (6. ábra). Ezekben a számításokban a próbatest és a szakítás tengelye mindig egybeesett, és a pofákon lévő a szélességű rést se modelleztük (mivel a szimulációk tengelyszimmetrikusak voltak). A szimulációk során az r és b értékeket változtattuk. μ értéke 0,6 volt.



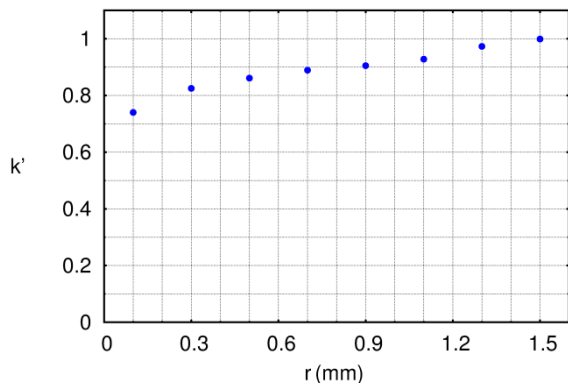
6. ábra: A tengelyszimmetrikus modell és a geometriai paraméterek

Figure 6: Dimensions of the axial symmetric model

Az eredmények nem meglepőek. Amennyiben r értéke megegyezik a próbatest lekerekítési sugarával (1,5 mm) és $b = 0$ mm (azaz a befogópofa felütközése a próbatesten ideális), akkor k' értéke lényegében 1. Az r csökkentése (miközben b -t úgy növeljük, hogy a 6. ábrának megfelelően a befogópofa a próbatest lekerekített részének közepén ütközik fel) k' csökkenését eredményezi, de még egy 0,1 mm lekerekítési sugarú befogópofa is csak $k' = 0,75$ -öt eredményez (7. ábra).

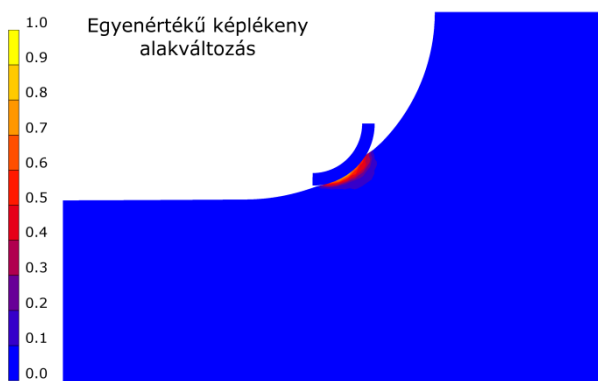
Jelentősebb lokális képlékeny alakváltozás csak akkor jött létre a tengelyszimmetrikus szimulációknál, ha a b és az r értékét is elég kicsinek választottuk (8. ábra). A valódi mérések során r kellően nagy volt ahhoz, hogy a tengelyszimmetrikus szimulációk alapján ne legyen okunk feltételezni, hogy a próbatest jelentős lokális képlékeny

alakváltozást szenvedett. Így a rendszert 3D-s modellekkel is megvizsgáltuk.



7. ábra: A befogópofa lekerekítési sugarának hatása a rendszer merevségére

Figure 7: Effect of the grip's radius of curvature on the rigidity of the tensile tests

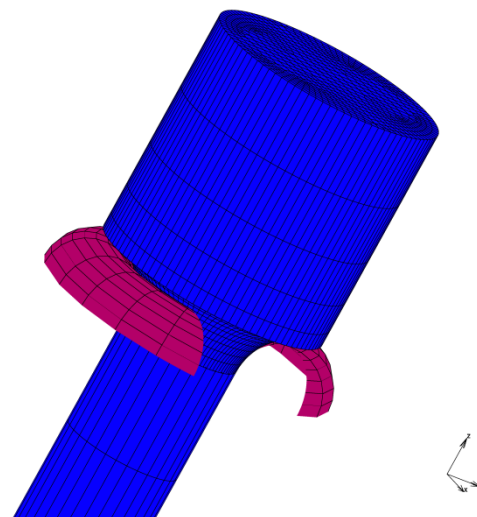


8. ábra: Lokális képlékeny alakváltozás rosszul megválasztott geometriai paraméterek esetén
Figure 8: Local plastic deformation in case of inappropriate geometric parameters

A 3D-s szimulációk (9. ábra) lehetővé tették, hogy megvizsgáljuk, hogy mi történik akkor, ha a próbatestet a befogópofákba nem tökéletesen függőleges (z-irányú) pozícióba kerül bele. Vizsgáltuk a befogópofákon található a szélességű rés szerepét is (mely a befogópofán x-irányban található). Olyan szimulációkat is futtattunk, amelyekben a két befogópofa két tengelye nem esett egybe. Ezekben a számításokban a súrlódás szerepe jelentős volt, így a szimulációk eredményeinek μ értékre való érzékenységet is vizsgáltuk. A 3D-s szimulációkban a próbatestet és a pofák méretei is a névvel egyeztek meg.

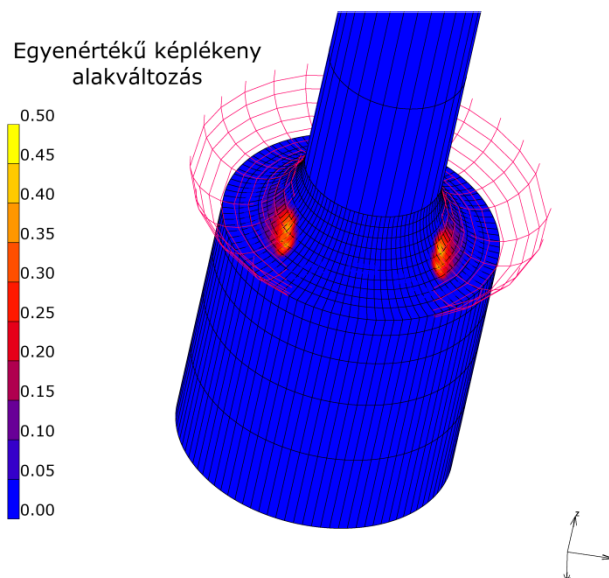
Amennyiben semmilyen geometriai tökéletlenséget nem raktunk a rendszerbe, akkor a próbatestet körkörös felületen felülteközött a toroidális felületeken. A rés miatt a befogópofák egy részén hiányzott a próbatestek alátámasztása, és a fellépő nyomaték

kis mértékben, de meghajlította a próbatesteket. A rés szerepe azonban sokkal jelentősebbé vált, ha a geometriai elrendezés nem volt tökéletes. Egyik szimuláció-sorozatunkban a próbatestet a tömegközéppontja körül a 9. ábrán látható y-tengely mentén megforgattuk különböző α_y szögekkel. Így a próbatest felső részét a rés fele döntöttük, és a rés élébe a szakítás során beakadt (10. ábra).



9. ábra: Háromdimenziós modell és a hozzá tartozó koordináta-rendszer

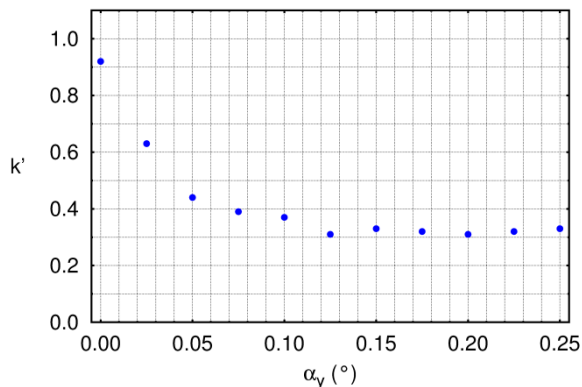
Figure 9: Three dimensional model and its coordinate system



10. ábra: A próbatest beakadása a rés élébe
Figure 10: Jamming of the specimen in the gap of the grip

A kellően nagy súrlódás ($\mu = 0,7$) miatt a próbatest nem csúszott vissza akadálytalanul a függőleges pozíciója felé, és a kontaktusban lévő felület jelentős lokális képlékeny alakváltozást szenvedett.

dett. Ez nagyobb elforgatások esetén k' jelentősebb csökkenéséhez vezetett (11. ábra).



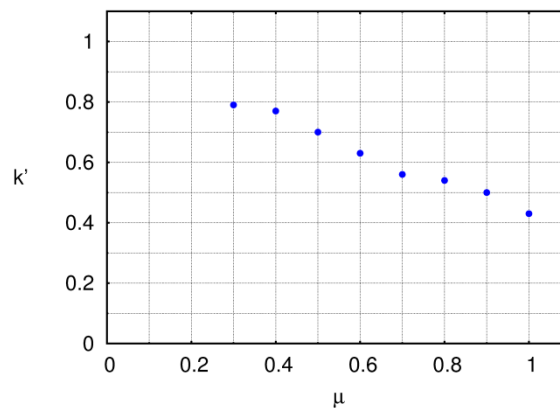
11. ábra: A rendszer merevsége α_y függvényében
Figure 11: The rigidity of the system in function of α_y

Azt tapasztaltuk, hogy amennyiben a próbatest döntése nem a rés irányában történik, hanem arra merőlegesen, akkor a beakadás nem jön létre, a szakítás során a próbatest számottevő ellenállás nélkül a függőleges pozíciójába visszacsúszik, és így k' értéke se csökken le.

Az 5. ábrán az egymás fölött található pontcsoportok olyan méréseket jelölnek, ahol a befogópofák pozíciója azonos volt (nem szerelték ki és be őket két mérés között). Az egymás mellett elhelyezkedő pontcsoportok különböző mérősorozatokat jelölnek. Látható, hogy egy mérősorozat k' értékei kevésbé ingadoznak, mintha az összes pontot nézzük egyszerre. Ez azt valószínűsíti, hogy a pofák ki- és beszerelése után azok pozíciója kicsit (~ 0,01 mm) megváltozhatott, és ez befolyásolta a pofák és a próbatest között kialakuló kontaktust, ezen keresztül a rendszer merevségét. Ezért szimulációinkban megvizsgáltuk azt is, hogy a befogópofák nem tökéletes geometriai pozíciója (kismértékű forgatás vagy eltolás) hogyan befolyásolja az eredményeket. Azt tapasztaltuk, hogy hasonló beakadások jöhetnek létre, mint amit a próbatest döntéseknél tapasztaltunk, de a beakadás mértéke sokkal véletlenszerűbb (nem találtunk olyan trendet, mint ami a 11. ábrán látható). A véletlenszerű viselkedés a valós mérések ingadozó k' értékeire is magyarázatot ad.

A tengelyszimmetrikus számításokkal szemben a 3D-s számításokban a μ értékének is nagy a jelentősége. A súrlódási tényezőre vonatkozó paramétervizsgálatot egy rögzített, nem tökéletes geometriai állapotú rendszeren végeztük el: a próbatest dőlése $\alpha_y = 0,05^\circ$, az alsó befogó 0,03°-kal volt az x-tengely mentén elforgatva, a felső befogó 0,01-mm-rel volt eltolva az y-tengely mentén. A 12. ábrán azt láthatjuk, hogy a rendszer merevsége csökkent, amennyiben a súrlódási

tényezőt növeltük. Ennek az az oka, hogy nagyobb μ értékek esetén a próbatest nagyobb terhelések mellett sem tud a nagyobb felületen alátámasztott, függőleges pozíciójába visszacsúszni. Mivel a próbatest ferde pozíciójában kis felületen érintkezik a pofákkal, nagy feszültségek keletkeznek, jelentős lokális alakváltozást szenved, mely növeli a keresztfej elmozdulás értékét. Ez a lineáris szakasz merevedésének, azaz végső soron a merevség csökkenésével jár.



12. ábra: A rendszer merevsége a súrlódási tényező függvényében
Figure 12: The rigidity of the system in function of the friction coefficient

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Sikerült olyan szimulációkat lefuttatnunk, amikben a rendszer merevsége hasonlóan kicsi, mint a mérésekben volt. Ezek a nagy súrlódási tényező értékekkel számolt 3D-s végeselemes szimulációk voltak. Egy mérés akkor tekinthető jónak, ha k' értéke kellően nagy. A problémára megoldást jelenthet más geometriájú (például kúpos) befogópofák és próbatestek alkalmazása, valamint a súrlódási tényező csökkentése. Utóbbihoz a felületek kenését kell megoldani, ami radioaktív környezetben komoly kihívást jelent.

A már meglévő kis k' értékű mérések kiértékelése is megoldható. A befogás minősége döntően csak a lineáris szakaszt (annak merevedését, illetve annak átmenetét a nemlineáris szakaszba) befolyásolja. A mért keresztfej elmozdulás értéket (δ) lehet úgy korrigálni, hogy kivonjuk belőlük a befogás miatt létrejövő, nem a mérőszakasz nyúlásából származó elmozdulásokat. Ha egy adott $\delta_{eredeti}$ keresztfej elmozdulásnál, $F(\delta_{eredeti})$ erő mérünk, akkor az alábbi lineáris korrekció jó közelítéssel megoldja a problémát:

$$\delta_{új} = \delta_{eredeti} - [F(\delta_{eredeti})/s_{mért} - F(\delta_{eredeti})/s_{merekv}]$$

IRODALOMJEGYZÉK:

- [1] P. Tóth: A szakítóvizsgálat során elkövethető mérési hibák és kiküszöbölésük. *Anyagvizsgálók Lapja* (2004/2) 51–52
- [2] M.I. Zakharova, N.A. Artemov, D.V. Petrov: Elastic modules and thermal conductivity of neutron irradiated type 13Cr-2Mo-Nb-V-B ferritic-martensitic steel. *Journal of Nuclear Materials* 233–237 (1996) 280–284
- [3] T. Fekete, G. Krallics, L. Tatar: Application of fracture mechanics “local approach” method on the analysis of ductile fracture of material 15Kh2MFA. *Seminar of Fracture Mechanics, Miskolc, Hungary 1997.* 221-234. (in Hungarian)