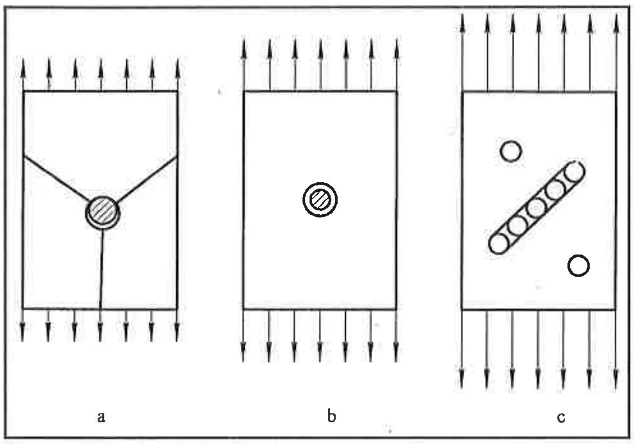
Sima próbatest szakítóvizsgálata a módosított Gurson-féle szívós törési elmélet alapján

Dr.Krállics György*– Tatár Levente*

Bevezetés

A szívós törés jelenségének megértésében fontos szerepet játszanak a mikroüregek keletkezésével, növekedésével és összenövésével kapcsolatos fizikai folyamatok. Az üregek keletkezése elsősorban az anyagban lévő második fázisú kiválásokkal függ össze, amikor is az alakváltozás során az alapfém mátrixa és a második fázis kohéziós kapcsolata megszűnik (*1.a.ábra*). Az alakváltozás folyamán a mikroüregek növekednek (*1.b.ábra*), majd a terhelés egy kritikus állapotában a mikroüregek összenőnek (*1.c.ábra*) és egy makroszkopikus repedést alkotnak, amelynek megjelenése a szerkezet terhelhetőségének drasztikus csökkenését eredményezi.



1.ábra. Mikroüregek keletkezése (a), növekedése (b) és összenövése (c)

McClintok [1], *Rice* és *Tracey* [2] munkáira alapozva *Gurson* [3] dolgozott ki egy komplett elméletet porózus anyagok alakváltozására és törésére. Az elmélet jelentősége abban foglalható össze, hogy az alakváltozás hagyományos kontinuum-mechanikai leírásmódját összekapcsolta az üregképződés és növekedés mikro-mechanikai folyamataival, vagyis különböző léptékű jelenségeket foglalt szerves egységbe, ezzel jelentősen hozzájárult egy új tudományterület a *continuum damage mechanics* (a károsodások kontinuum mechanikája) kialakításához.

Alapegyenletek

Gurson szerint a gömb alakú mikroüregeket tartalmazó testben a makroszkopikus feszültségek az alábbi folyási feltételt elégíti ki:

$$f = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_M^2} + 2f\,\mathrm{ch}\left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) - 1 - f^2 = 0 \qquad (1)$$

ahol σ_M–a hibátlan mátrix anyag egyenértékű feszültsége, σ_e – a makroszkopikus egyenértékű feszültség, σ_{kk} – a makroszkopikus feszültségtenzor első skalár invariánsa, f – a mikroüregek térfogati hányada.

Az anyagtörvény felírásakor a folyási elméletet alkalmazta. A makroszkopikus alakváltozási sebességtenzor két részből tevődik össze, a rugalmasból és a képlékenyből.

* BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezettani Intézet

$$\xi_{ij} = \xi^e_{ij} + \xi^p_{ij} \qquad (2)$$

A képlékeny alakváltozási sebesség az (1) folyási függvényből leszármaztatva

$$\xi^p_{ij} = \frac{1}{E_t}\frac{\partial\phi}{\partial\sigma_{ij}}\frac{\partial\phi}{\partial\sigma_{kl}}\dot{\sigma}^{i} \qquad (3)$$

ahol E_t – a mátrix anyag $\sigma_M = \sigma_M(\varepsilon_M)$ görbéjének tangens modulusa, $\dot{\sigma}^{i}$ – a Cauchy-feszültségtenzor Jaumann-féle deriváltja.

Az elmélet egyik alapvető feltevése szerint a mátrixban és a makroszkopikus anyagban a disszipációs teljesítmény azonos, vagyis

$$(1-f)\sigma_M\dot{\varepsilon}^p_M = \sigma_{ij}\xi^p_{ij} \qquad (4)$$

ahol $\dot{\varepsilon}^p_M$ – az egyenértékű képlékeny alakváltozási sebesség a mátrixban.

Az üregfejlődés fizikai folyamata két részből áll.

$$\dot{f} = \dot{f}_{nu} + \dot{f}_{gr} \qquad (5)$$

Az (5) egyenlet első tagja az üregképződés, a második tagja az üregnövekedés sebességét határozza meg .

$$\dot{f}_{gr} = (1-f)\xi^p_{kk} \qquad (6)$$

ahol ξ^p_{kk} – a makroszkopikus képlékeny alakváltozási sebességtenzor első skalár invariánsa

$$\dot{f}_{nu} = A\frac{EE_t}{E-E_t}\dot{\varepsilon}^p_M + \frac{1}{3}B\sigma_{kk} \qquad (7)$$

ahol E – a mátrix anyag rugalmassági modulusa, E_t – a mátrix anyag $\sigma_M = \sigma_M(\varepsilon_M)$ görbéjének tangens modulusa, A, B – az üregkeletkezési folyamat szabályozó paraméterei.

Általánosan elfogadott, hogy az üregképződést vagy az alakváltozás, vagy a feszültség szabályozza. *Chu* és *Needleman* [4] szerint az első esetben az üregképződéshez szükséges alakváltozás normális eloszlást követ, amelynek középértéke ε_N, szórása s_N.

$$A = \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E}\right)\frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon^p_M - \varepsilon_N}{s_N}\right)^2\right\}, \quad B = 0 \qquad (8)$$

ahol f_N – a keletkezett üreg térfogati hányada.

Ha az üregképződést a feszültség szabályozza, az A, B paraméterek

$$A = B = \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E}\right)\frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_M + \sigma_{kk} - \sigma_N}{s_N}\right)^2\right\} \qquad (9)$$

ahol σ_N, s_N, f_N jelentése a fentihez hasonló. Az (5) kifejezést integrálva a (6)–(9) egyenletek figyelembevételével a mikroüreg hányad aktuális értékét kapjuk, amely természetesen a darab különböző pontjaiban különböző értékű.

$$f = f_0 + \int_0^t \dot{f}\,dt \qquad (10)$$

ahol f_0 – a kezdeti mikroüreg térfogati hányad.

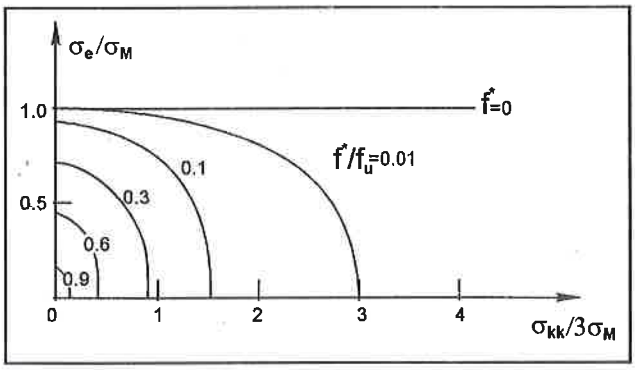
Gurson eredeti elmélete nem foglalkozott a mikroüregek összenövésének problémájával, ami a szívós törés folyamatának egyik fontos eleme. *Tvergaard* és *Needleman* [5] úgy módosította a Gurson-féle elméletet, hogy az előbb említett jelenséget is beépítették egyenleteikbe. Ebben az esetben a folyási feltétel az alábbiak szerint alakult:

$$\phi = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_M^2} + 2f^*\mathrm{ch}\left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) - 1 - \left(q_1 f^*\right)^2 = 0 \qquad (11)$$

ahol q_1 paraméter értéke Tvergaard szerint 1.5, az f^* károsodási paraméter a következő:

$$f^* = f \quad \text{ha } f \le f_c$$
$$f^* = f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c}\left(f - f_c\right) \quad \text{ha } f > f_c \qquad (12)$$

f_c azt a kritikus térfogati hányadot jelöli, amelynél a mikroüregek összenövése megkezdődik, f_F – mikroüreg térfogati hányad a törésnél, f_u^* – a károsodási paraméter a törésnél $f_u^* = 1/q_1$, ekkor a mátrix teherviselő képessége kimerül. A folyási felület megjelenítése látható a *2.ábrán*, ahol jól érzékelhető a hidrosztatikus feszültség és az üregek hatása

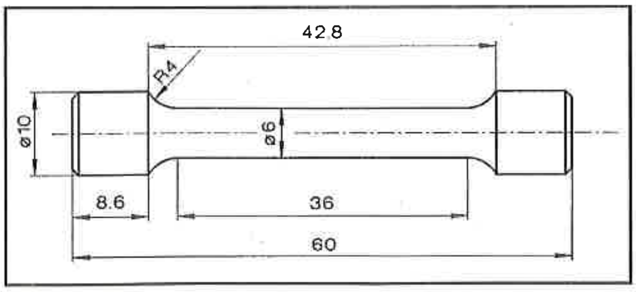


2.ábra Mikroüregekkel rendelkező test folyási felülete

A módosított Gurson-elmélet különösen az elmúlt évtizedben nagyon elterjedt szívós törési folyamatok vizsgálatára. Hét, fizikailag is értelmezhető paraméter segítségével (q_1, f_0, f_c, ε_N *vagy* σ_N, s_N, f_N) a mikroüreg-fejlődés folyamata összekapcsolhatóvá vált a makroszkopikus kontinuum-mechanika alapegyenleteivel.

Mérések, számítások

Jelen munkában ezt az elméletet alkalmaztuk sima szakító próbatest alakváltozási és törési folyamatainak elemzésére. A számításokhoz szükséges mérési eredmények egy nemzetközi együttműködés keretében megvalósított numerikus tesztsorozat adatbázisából származnak [5], ahol is a német 22NiMoCr37 jelű ferrites acél szakítását vizsgálták. A vizsgálathoz használt próbatest geometriája a *3. ábrán* látható, a próbatestek szakítását statikus körülmények között végezték.



3.ábra Szakító próbatest geometriája

Az előzetes kísérletekből ismert volt a mátrixanyag keményedési görbéje, *4.ábra* (a Bridgmann-féle korrekció figyelembevételével határozták meg), amit az alábbi függvényel közelítettük:

$$\sigma_M = c_1 - c_3 + c_2\left(\varepsilon_M^p\right)^{c_4} + c_3\exp\left(c_5\varepsilon_M^p\right) \qquad (13)$$

Az egyenlet paraméterei az *1.táblázatban* találhatók:

1.táblázat

A mátrixanyag alakítási szilárdsága egyenletének paraméterei

c_1 MPa	c_2 MPa	c_3 MPa	c_4	c_5
451	2232.599	7405.98	0.754	-0.272

A mikromechanikai paramétereket az irodalmi adatok figyelembevételével [7–9] vettük fel és értékeik a *2.táblázatban* találhatók.

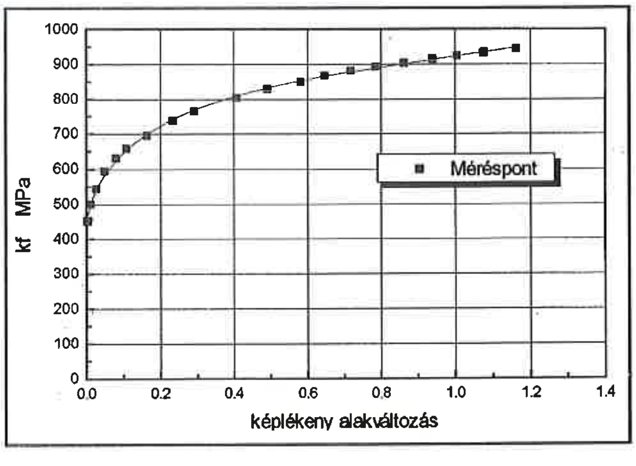
2.táblázat

Mikromechanikai paraméterek

q_1	f_0	f_c	f_F	ε_N	σ_N	f_N
1.5	0.0053	0.15	0.3	0.3	0.1	0.1

A szakítás számítógépes modellezésére nemlineáris feladatok megoldására szolgáló MARC [10] végeselemes rendszert használtuk, amely tartalmazza a módosított Gurson- féle elmélet alkalmazására szolgáló szubrutinokat. .Egy teljes alakváltozási folyamat végigkövetése 350 számítási lépést (incrementet) igényelt.

A mikroüregek hatását kifejező modellen kívül a számításokat a hagyományos (mikroüreg nélküli) mechanikai modellel is elvégeztük. Az *3.ábrán* látható próbatest-kialakítás azt eredményezte, hogy nem kellett a próbatest közepén egy mesterséges hibát bevinni a végeselemes hálóba ahhoz, hogy a kontrakciós folyamat elkezdődjön.

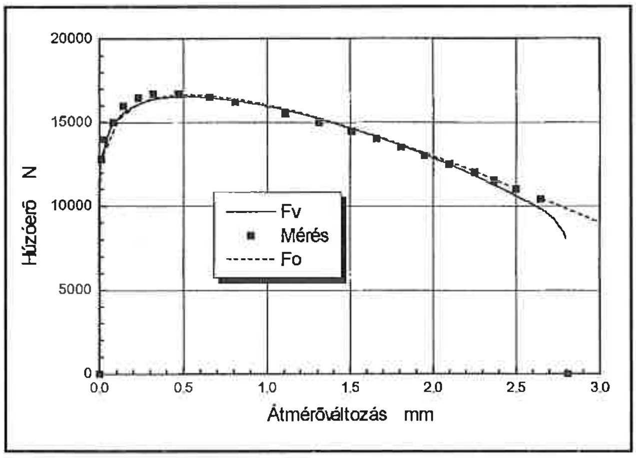


4.ábra Mátrixanyag alakítási szilárdság görbéje

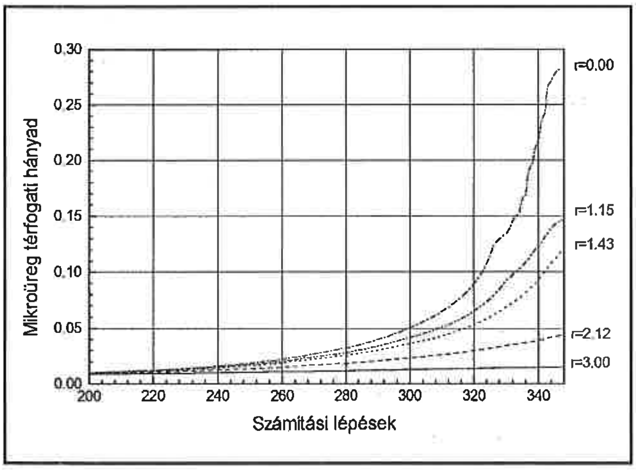
A számítási és a mérési eredmények összevetésére a húzóerő változásnak a próbatest legkisebb átmérőjének függvényében felvett diagramját használtuk (*5.ábra*). A mérési és számítási eredmények nagyon jó egyezést adtak, ugyanakkor a klasszikus mechanika alapján létrehozott modell nem volt képes a szakítási folyamat végét követni.

A módosított Gurson-féle modellel a repedés-keletkezés és terjedés folyamata is követhetővé vált, aminek a hatása a szakítódiagram menetének erőteljes megváltozásával van kapcsolatban (diagram vége).

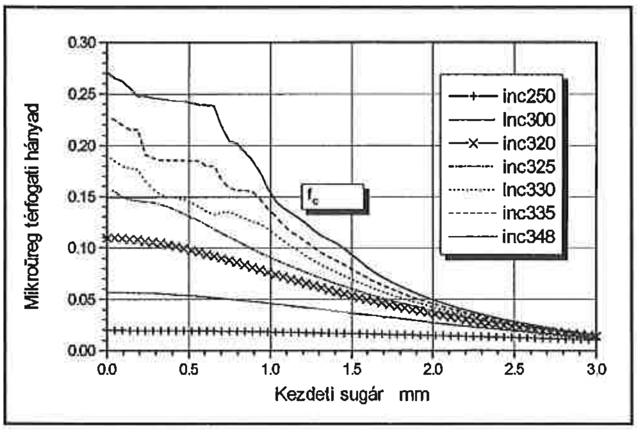
A feladat globális jellemzőin túl érdekes megfigyeléseket lehetett tenni a lokális mennyiségekre is. Az alakítási folyamat előrehaladásával a mikroüregek eloszlása és mennyisége jelentősen változott (*6.ábra*). Jól érzékelhető ez a változás a *7.ábrán*, ahol a próbatest legkisebb keresztmetszetében mutatjuk be a mikroüreg-eloszlást a szakítási folyamat különböző állapotaiban. Amint a próbatest valamely pontjában a mikroüreg hányad eléri az f_c értéket, az adott görbén törés figyelhető meg. A mikroüreg térfogati hányad próbatesten belüli eloszlása látható a *8. ábrán*.



5.ábra A mért és számított húzóerő (Fo-károsodás nélküli eset, Fv-károsodásos eset) és a szakítópróbatest átmérőváltozásának kapcsolata

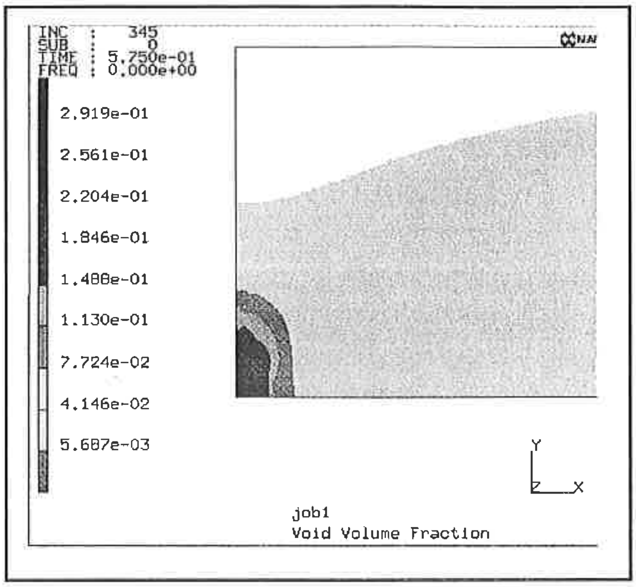


6.ábra A próbatest legkisebb keresztmetszetéhez tartozó pontjaiban a mikroüreg térfogati hányad változása a számítási lépések során



7.ábra A mikroüreg térfogati hányad változása a próbatest legkisebb keresztmetszetében a számítási folyamat különböző lépéseinél.

A 7.ábrán értelmezhető a mikroüregek hatására keletkezett repedés terjedése is. A repedés pillanatnyi hossza az f_c törési mikroüreg hányaddal jellemezhető.



8.ábra Mikroüreg térfogati hányad eloszlása a 340. számítási lépésnél

Összefoglalás

A szakítóvizsgálati mérések és a végeselemes számítások összevetése és a közöttük levő nagyon jó megegyezés azt bizonyítja, hogy a károsodás jelenségének bekapcsolása az alakítási folyamat modellezésébe fizikailag megalapozottabbá és numerikusan pontosabbá teszi a matematikai modellezést.

Irodalom

[1] *McClintock, F.A. A.* Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. Journal of Applied Mechanics, Vol.35,1968, pp. 363-371.

[2] *Rice, J.R.* and *Tracey, D.M.*, On the Ductile Enlargement of Voids in Triaaxial Stress Fields. Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol.17, 1969, pp. 201-217.

[3] *Gurson, A.L.*, Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol.99, 1977, pp. 2-15.

[4] *Chu, C.C.* and *Needleman, A.*, Void Nucleation Effects in Biaxially Streched Sheets. Journal of Engineering Materials and Technology. Vol.102, 1977, pp. 249-256.

[5] *Tvergaard, V.* and *Needleman, A.*, Acta Metallurgia, Vol.32,1984, pp.157

[6] Numerical Round Robin on Micromechanical Models. Technical Commitee 8, Numerical Methods, of the European Structural Integrity .IWM-Bericht T 8/95.

[7] *Tvergaard, V.* and *Needleman, A.*, Analysis of the Cup-cone Fracture in Round Tensile Bar. Acta Metallurgica. Vol.32, 1984, pp.157-169.

[8] *Needleman, A.*, and *Tvergaard, V.*, An Analysis of ductile rupture in notched bars. Journal of Mechanics and Physics of Solids. Vol.32. 1984, pp.461-490.

[9] *Ritchie, R.O.*, *Knott, J.F.* and *Rice, J.R.*, On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steels. Journal of Mechanics and Physics of Solids. Vol.21. 1973, pp.395-410.

[10] MARC User Information, MARC Analysis Research Corporation, 1994.