

Feszültségkorróziós repedésterjedés vizsgálata

Analysis of stress corrosion crack propagation

SPISÁK Bernadett^{1,2}, Dr. SZÁVAI Szabolcs^{1,2}, BÉZI Zoltán¹

¹Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519 Miskolc, Iglói út 2., +36-1/463-0500, bayzoltan@bayzoltan.hu, www.bayzoltan.hu

²Miskolci Egyetem 3515 Miskolc – Egyetemváros, <https://www.uni-miskolc.hu/>

Abstract

Stress corrosion cracking is the phenomenon with the greatest impact on the safe operation of light water reactors. The severity of this failure makes it essential to develop a model to predict the growth rate of stress corrosion cracking. One such model is the RMI model, developed by Shoji et al. based on the slip-dissolution/oxidation theory. In the following, the implementation of such a model for stress corrosion crack propagation in finite element simulations is presented.

Keywords: Stress corrosion cracking, light water reactor, finite element analysis, RMI model, ageing mechanism

Kivonat

A feszültségkorróziós repedés a könnyűvízes reaktorok biztonságos működését legnagyobb mértékben befolyásoló jelenség. Ezen meghibásodás súlyossága elengedhetetlenné teszi egy olyan modell kialakítását, amellyel előre jelezhető a feszültségkorróziós repedés növekedési sebessége. Erre példa az RMI modell, amelyet Shoji és társai dolgoztak ki a repedéscsúcs alakváltozási sebességére vonatkozó elmélet alapján. A cikkben ezen modell végeelem szimulációba való implementálása kerül bemutatásra.

Kulcsszavak: Feszültségkorróziós repedés, könnyűvízes reaktor, végeelem analízis, RMI modell, öregedési mechanizmus

1. BEVEZETÉS

A feszültségkorróziós repedés (SCC – stress corrosion cracking) a könnyűvízes reaktorok biztonságos működését az egyik legnagyobb mértékben befolyásoló tényező [1]. Ezen meghibásodás súlyossága, és számos területen való megjelenése elengedhetetlenné teszi egy olyan modell kialakítását, amellyel előre jelezhető a feszültségkorróziós repedés növekedési sebessége, ezáltal a következőkben egy ilyen modell végeelem szimulációs szoftverbe történő implementálása kerül bemutatásra, amelynek segítségével ezen meghibásodási mechanizmus vizsgálata és előrejelzése egyszerűbbé válik.

Számos próbálkozás született már a repedéscsúcsban keletkező alakváltozási sebesség numerikus és analitikus módszerekkel történő számszerűsítésére. Ford és társai [2] a repedéscsúcs alakváltozási sebességére egy fél-empirikus formulát ajánlott, míg a Congleton és társai [3] által kialakított repedéscsúcsban keletkező alakváltozási sebesség alapját a lineárisan rugalmas törésmechanika adja, melyet főleg rideg anyagokra alkalmaztak. A közelmúltban Tetsuo Shoji és a Tohoku Egyetem munkatársai egy elméleti modellt javasoltak a feszültségkorróziós repedések növekedési sebességére, amely a Fracture Research Institute (FRI) [4][5] modelljeként ismert, s mely a repedéscsúcs alakváltozási gradiens elméletén és a kiterjesztett repedésfront alakváltozás újra eloszlás elméletén alapszik. Az FRI modell elektrokémiai és törésmechanikai megfontolásokat egyaránt tartalmaz. Az új modell kiterjeszti a meglévő Ford-modellt [1] oly módon, hogy tartalmazza az anyag feszültség/alakváltozás jellemzőinek és a repedés növekedési sebességének a repedéscsúcs alakváltozási sebességére gyakorolt hatását is.

Az FRI modell alkalmas a repedésnövekedési sebesség előrejelzési modelljeként a fennmaradó élettartam és az alkatrészek biztonságának vizsgálatára. Új megközelítést kínál a repedésnövekedési sebesség becslésére alakváltozásra keményedő és különböző besugárzási körülmények között alkalmazott anyagok esetére, ahol potenciálisan figyelembe vehetőek a különböző anyagkeményedési hatások is.

2. AZ FRI REPEDÉSCSÚCS ALAKVÁLTOZÁSI SEBESSÉG MODELL FELÉPÍTÉSE

Számos szerkezeti anyag, mint az ausztenites korrózióálló acél is, alakváltozásra keményedő anyag. Ezek feszültség-alakváltozási görbéi sok módon megadhatók, a modellt a Gao-Hwang [6] törvényt használja:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} & \text{ha } \sigma \leq \sigma_0 \\ \frac{\sigma}{E} + C(\sigma - \sigma_0)^{n_{GH}} & \text{ha } \sigma > \sigma_0 \end{cases}, \quad (1)$$

ahol σ a valós feszültséget és ε a valós alakváltozást jelentik, σ_0 a kezdeti folyáshatár, C az eltolási együttható és $n_{GH} = 4,1$ az alakváltozási-keményedési kitevő. A (2) egyenlet az (1)-es törvényen alapszik, és sík alakváltozás esetén érvényes.

$$\varepsilon_p = \beta \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) \left[\ln \left(\frac{R_p}{r} \right) \right]^{n_{GH}} \quad (2)$$

ahol $\beta = 5,46$ dimenzió nélküli konstans, σ_y az anyag folyáshatára, $E = 206$ GPa a rugalmassági modulusa, r egy növekedő repedéscsúcstól vett távolság és $R_p = \lambda(K/\sigma_y)^2$ a képlékeny zóna mérete síkbeli alakváltozásra ($\lambda = 1/3\pi$ a sík feszültségi és sík alakváltozási körülményektől függő állandó, K a feszültségintenzitási tényező). Ezzel azt feltételezzük, hogy a repedés kvázi-statisztikus állandó terhelés mellett folyamatosan növekszik. Az RMI modellt a Shoji és társai által kidolgozott repedéscsúcs alakváltozási sebességére vonatkozó modellen alapszik, amelyet a (3) egyenlet mutat be [7]:

$$\frac{d\varepsilon_{ct}}{dt} = \left(\frac{d\varepsilon_{ct}}{da} \right) \cdot \left(\frac{da}{dt} \right) \quad (3)$$

Ezt az egyenletet kombinálták a Gao-Hwang [6] repedéscsúcsban lévő aszimptotikus mező elméletével, amely a képlékeny alakváltozási sebességet jelenti a repedéscsúcsnál (repedéscsúcs alakváltozási sebessége):

$$\frac{d\varepsilon_{ct}}{dt} = \beta \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) \left(\frac{n_{GH}}{n_{GH}-1} \right) \left\{ \ln \left[\frac{\lambda}{r_0} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\}^{n_{GH}-1} \left[\left(\frac{2}{K} \right) \dot{K} + \left(\frac{1}{r_0} \right) \dot{a} \right], \quad (4)$$

ahol \dot{K} (vagy dK/dt) a feszültségintenzitási tényező változásának sebessége. Maga a repedésnövekedés sebessége a következő egyenlettel számítható:

$$\dot{a} = \frac{M i_0}{z \rho F (1-m)} \left(\left(\frac{t_0}{\varepsilon_f} \right) \left(\frac{\beta \sigma_{0,2} n_{GH}}{E (n_{GH}-1)} \right) \left(\frac{2K}{K} + \frac{\dot{a}}{r_0} \right) \left[\ln \left(\left(\frac{\lambda}{r_0} \right) \left(\frac{K}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \right) \right]^{n_{GH}-1} \right)^m \quad (5)$$

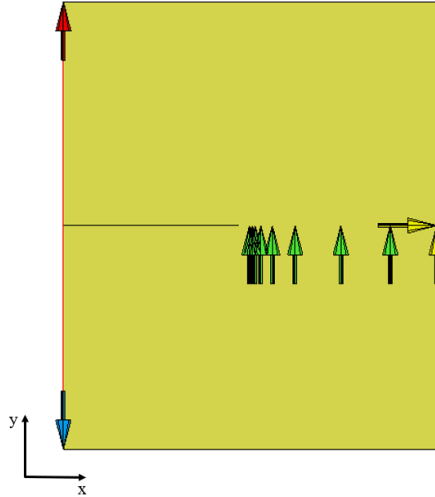
ahol $i_0 = 0,001 \text{ A/mm}^2$ az oxidációs áramsűrűség, $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ a sűrűség, $t_0 = 0,2 \text{ s}$ a konstans áramsűrűség időtartama, r_0 a repedéscsúcs előtti karakterisztikus távolság, $M = 55,382 \text{ g/mol}$ az atomi tömeg, $z = 2,67$ az elektron ekvivalensek száma, $F = 96500 \text{ C/mol}$ a Faraday állandó, $\varepsilon_f = 0,0008$ az oxid réteg törési alakváltozása, és m a repassziválódási sebesség. Az (5) egyenletben szereplő paraméterek leírása és értékei a [8] szakirodalomból származnak.

3. VÉGESELEM MODELL FELÉPÍTÉSE

Az előzőekben bemutatott modell végeelem szoftverbe való implementálását követően, a szimulációkat egy egyszerűsített 2D-s CT próbatesten készítettük el. A szimulációkat MSC.Marc Mentat szoftverben végeztük el, amely a feszültségintenzitási tényezőt csak tisztán rugalmas anyagmodell esetén tudja számolni, ezért paraméterként a rugalmassági modulusát és a Poisson-tényezőt adtuk meg. Azonban fontos megemlíteni, hogy maga a repedésterjedést leíró képlet tartalmazza a Gao-Hwang keményedési törvényt, ezáltal a szimuláció tartalmazza a képlékeny alakváltozást is. A repedésterjedés szimulálásához az ucrack szubrutint alkalmaztuk. Ez a VCCT típusú repedés esetén használható. Ennek segítségével a (7) egyenletet beépítettük a szimulációba. A 2D-s VCCT repedés alkalmazása során szükséges a repedéscsúcs, repedésterjedés típus, iránya és a

kritériumok megadása. A repedés terjedése szimulálható kifáradással, direkt módon vagy a kettő kombinálásával. Kifáradás esetén a repedés minden egyes kifáradási periódus végén terjed. Direkt mód esetében a repedés növekedés akkor következik be, ha az energiefelzabarási sebesség nagyobb, mint a felhasználó által definiált repedésterjedési ellenállás. A repedés az elemek határa mentén terjed. A repedésnövekedés iránya alapján megkülönböztethető K_I , K_{II} , K_{III} irányú, feszültség alapú, egyes módú, illetve felhasználó által definiált repedésterjedés. Ezek közül ebben az egyes módú repedésterjedést alkalmaztuk.

A modell kialakítását és a peremfeltételeket az 1. ábra szemlélteti. A piros és kék nyilak a terheléseket, a sárga x és y irányú nyilak a megfogást, végezetül a zöld nyilak az y irányú szimmetriát jelölik. Mivel azon elemek esetén, ahol repedésnövekedés bekövetkezik nem alkalmazható megfogás, ezért a bemetszés és az y irányú megfogások között egy 1,5 mm-es közt hagyunk, ahol a repedés terjedése be tud következni.



1. ábra. Modell kialakítása és alkalmazott peremfeltételek

A szimuláció három részre van osztva. Az első lépésben az előrepezítés folyamatát szimuláljuk. Annak érdekében, hogy a szoftver tudjon egy kezdeti feszültségintenzitási tényezőt számolni, szükséges, hogy a modellben található legyen egy repedés, mivel a K -t a repedés csúcsában tudja meghatározni. Ebben a lépésben az eredeti a_0 (23,2 mm) méretet növeljük meg 23,3 mm-re. Ez azért szükséges, hogy két K értéket tudjunk meghatározni, amelyekből a következő lépésben exponenciális közelítéssel becsülhető a következő feszültségintenzitási tényező. A második lépésben következik be az SCC keletkezése, itt az előbb meghatározott K -val kiszámoljuk a kezdeti repedésnövekedést, amely a Ford modellel van közelítve [9]:

$$\dot{a} = A\varepsilon^m . \quad (6)$$

$$\text{Ahol } A = \frac{Mi_0}{z\rho F(1-m)} \left(\frac{t_0}{\varepsilon_f} \right)^m \text{ és } \varepsilon = 4,1 \cdot 10^{-14} \cdot K^4 .$$

A szubrutinban egy adott időintervallumban a repedés méretének a meghatározásához a Runge-Kutta módszert alkalmazzuk [10]. Ennek a felépítése a következő:

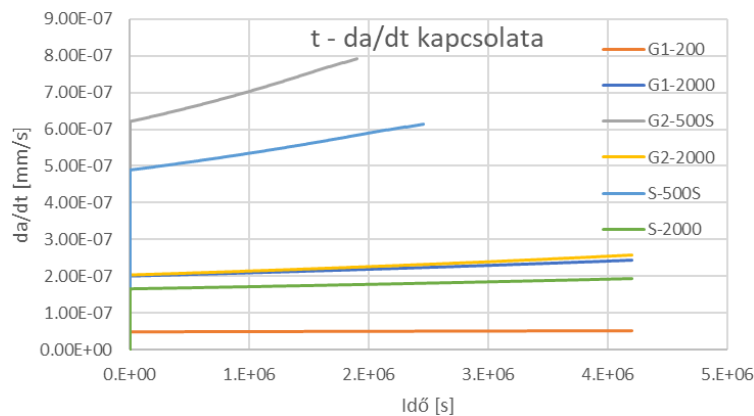
$$a_{n+1} = a_n + \frac{b_1 + 2 \cdot (b_2 + b_3) + b_4}{6} , \quad (8)$$

$$\text{ahol: } b_1 = dt \cdot da(t_n, a_n, \dot{a}_n, \dot{K}_n, K_n), \quad b_2 = dt \cdot da\left(t_n + \frac{1}{2}dt, a_n + \frac{1}{2}b_1, \dot{a}_n, \dot{K}_n, K_n\right), \quad b_3 = dt \cdot da\left(t_n + \frac{1}{2}dt, a_n + \frac{1}{2}b_2, \dot{a}_n, \dot{K}_n, K_n\right) \text{ és } b_4 = dt \cdot da(t_n + dt, a_n + b_3, \dot{a}_n, \dot{K}_n, K_n).$$

4. EREDMÉNYEK

A szimulációkat a [4] irodalomban található, különböző környezeti körülmények esetén vizsgált próbatesteken végeztük el. A modell validálásához az általunk szimulált és a szakirodalomban megtalálható értékek közötti eltérés hasonlítottuk össze, amelyek csupán 5%-os eltérést mutattak. A 2. ábra a repedésnövekedés sebességének a változását mutatja be az idő függvényében. A G2-500S és az S-500S

vizsgálatok esetén a repedés mérete kívül esett a megadott vizsgálati tartományon ezáltal ezen vizsgálatok esetén a szimulációk csak kevesebb ideig futottak le.



2. ábra. Repedésnövekedés sebességének a változása az idő függvényében

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy feszültségkorróziós modell végeelem szoftverbe való implementálása került bemutatásra. Ennek során részletesen ismertettük az alkalmazott módszer elméleti háttérét, majd ezt követően a szimulációkat a szakirodalomban található adatok segítségével validáltuk. A kutatás következő lépése a létrehozott szubrutin továbbfejlesztése, amellyel a szimulációk 3D-ben is megvalósíthatók.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TKP2020-NKA-18 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4.1.1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Dong, P., Brust, F. D. *Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond* ASME. J. Pressure Vessel Technol. 2000, 122(3), pp. 329–338. <https://doi.org/10.1115/1.556189>
- [2] Ford, F.P., Taylor, D.F., Andresen P.L., Ballinger R.G. *Corrosion-assisted cracking of stainless and low alloy steels in LWR environments*. EPRI final report RP2006-6, Electric Power Research Institute 2006.
- [3] Congleton J., Shoji T., Parkins R.N. *The stress corrosion cracking of reactor pressure vessel steel in high temperature water*. Corros Science 1985, 25(8):633–650
- [4] Ernest, D. Eason et al. *Evaluation of the Fracture Research Institute Theoretical Stress Corrosion Cracking Model*. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors 2005
- [5] Shoji, T., Lu, Z., Murakami, H. *Formulating stress corrosion cracking growth rates by combination of crack tip mechanics and crack tip oxidation kinetics*, Corrosion Science, 2010, 52 769-779
- [6] Gao Y., Hwang K. *Elastic plastic fields in steady crack growth in a strain hardening material*. Geochem Int, 1981., 50(50): 330–343
- [7] Shoji T., Suzuki S., Ballinger R.G. *Theoretical prediction of SCC growth behavior-threshold and plateau growth rate*. In: Proceedings of the seventh international symposium on environmental degradation of materials in nuclear power systems, Breckinridge, 1995, pp 881–889
- [8] Pathania, R. *Evaluation of the Fracture Research Institute theoretical stress corrosion cracking model, Comparison with measured crack growth rates on stainless steel*. EPRI jelentés 2004
- [9] F. P. Ford, *The Crack-Tip System and Its Relevance to the Prediction of Cracking in Aqueous Environments*, Environment-Induced Cracking of Metals, Proceedings of the First International Conference, R. Gangloff and M. Ives, eds., NACE, Houston, TX, Vol. NACE- 10, pp. 139-165, 1990.
- [10] W. H. Press, B. P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes*, New York: Cambridge University Press, 1989, pp. 550-560.