

A K_{Ic} meghatározása kis próbatestekkel: egy új amerikai szabvány ismertetése

Czoboly Ernő – Gillemot Ferenc

Előzmények

A reaktortartályok biztonsága, a tervezett élettartamok ellenőrzése szükségessé teszi a tartályanyagok törési szívósságának napra kész ismeretét, azaz a törési szívósság változásának figyelését a sugárzás okozta károsodás függvényében. E cél érdekében a reaktorokban próbatest láncokat helyeznek el, amelyek időszakos vizsgálatával meghatározható a sugárzás okozta elridegedés mértéke.

A probléma abból adódik, hogy a reaktorban a rendelkezésre álló hely korlátozott és ezért, valamint egyéb okok miatt is a próbatestek mérete kicsi kell, hogy legyen. Szokásosak a Charpy-méretű (10x10x55 mm) darabok. A K_{Ic} meghatározásához azonban a vonatkozó szabványok szerint az anyagok szívósságának megfelelő – a reaktoracélok esetében nagyméretű – próbatestekre volna szükség. Az eddigi gyakorlat szerint [1] ezt a nehézséget úgy hidalják át, hogy különböző, de nem besugárzott reaktoranyagokon végzett mérésekkel meghatározzák a törési szívósságot a hőmérséklet függvényében ($K_{Ic}(T)$ görbe), majd a méréspontok statisztikus szórását figyelembe véve a 95%-os biztonsághoz (5% törési valószínűséghez) tartozó görbét tekintik mérhetőnek. A hőmérséklet függvényében Charpy-vizsgálatokat végeznek és kijelölnek egy kritikus hőmérsékletet, amely valamilyen célszerűen (de önkényesen) választott energiaszinthez tartozik. A besugárzott próbatesteken azonos módon végeznek ütőmunka méréseket és meghatározzák az ehhez az energiaszinthez tartozó kritikus hőmérséklet eltolódását, ΔT -t. Feltételezik, hogy a $K_{Ic}(T)$ görbe azonos módon tolik el a magasabb hőmérsékletek felé.

Ez az eljárás több kifogásolható elhanyagolást tartalmaz. Így például nem biztos, hogy a törési szívósság teljesen azonos mértékben tolik el a hőmérséklet függvényében, mint a Charpy-ütőmunka. Ezért a számításoknál nagyon konzervatívan járnak el és a pesszimista számítások miatt az atomerőművek élettartamát feleslegesen rövidre korlátozzák. Ez ösztönözte az ASTM E-8 Fárads és Törés Bizottságát 1997-ben egy módosított eljárás kidolgozására, amit az ASTM E 1921-97 jelű szabványban [2] tettek közzé. A szabvány erősen támaszkodott K. Wallin finn kutató munkásságára [3-5]. A szabványt a felhasználók tapasztalatai alapján több ízben kismértékben módosították, utoljára 2000-ben, de ezek a módosítások a lényegét nem érintették. Az ajánlott módszer minden esetben a *kérdéses anyagon végzett törésmechanikai mérésekre* alapoz, ezért kerül a túlzott konzervatizmust, ugyanakkor biztonságosabb, mint elődje.

Eljárás az ASTM E 1921-97 szerint

A szabvány kidolgozását igen sok kísérleti munka előzte meg. Ezekről szóló beszámolókat a szabványhoz mellékelt lista szakcikkei tartalmazták. Azokat a feltételezéseket, amelyeket az egyszerűbb kivitelezhetőség érdekében tesznek, és amelyek sok esetben önkényesnek tűnhetnek, a kísérleti eredmények támasztják alá.

A szabvány meglehetősen részletes és emiatt elég hosszú. Ezért itt csak a fontosabb jellegzetességeire térhetünk ki. Az Atomenergiakutató Intézetben azonban a magyar fordítás is rendelkezésre áll és ezt az érdeklődők megtekinthetik.

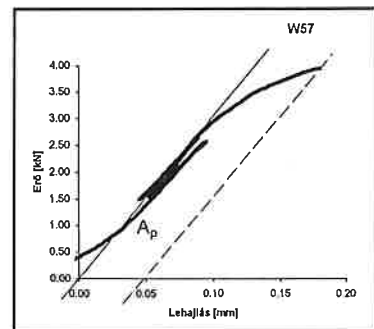
Lényeges vonása az itt ajánlott eljárásnak, amiben legalább formailag hasonlít a korábbi módszerhez, hogy itt is szerepel egy összefüggés a törési szívósság és a hőmérséklet között és ezt a görbét kell a kérdéses anyagra vonatkozó méréseknek megfelelően a hőmérséklet tengely mentén jobbra-balra tologatni. Fontos különbség azonban, hogy míg a korábbi eljárásnál ez a „tologatás” a Charpy-vizsgálat eredményei szerint történt, addig itt most valóban *törési szívósságot* mérnek.

A legrégebbi eljárásnál a legrosszabb eredményekhez igazodó burkoló görbét vették alapul, később azonban már itt is figyelembe vették a

mérendő anyag eredményeinek szórását (5% törési valószínűség). Ezt az itt ajánlott eljárásnál is megtartották. Az ún. *mestergörbe* ugyanis az adatokból számított *medián* értékeket (ez az érték tartozik az 50%-os törési valószínűséghez) foglalja össze, míg a számításokhoz egy ebből származtatott, tetszőlegesen alacsony törési valószínűséghez (általában 5%) tartozó görbét használnak. Fontos megemlíteni továbbá, hogy az új eljárásnál a próbatestek méretét is figyelembe veszik az eredmények értékelésénél, mégpedig a matematikai statisztikában használatos *leggyengébb tag* elve alapján.

A vizsgálat menete

A szabvány szerinti vizsgálatot a következőképpen kell elvégezni: Mindenek előtt ellenőrizni kell, hogy a vizsgálandó anyag megfelel-e az előírásoknak, a szabvány ugyanis csak a meghatározott szilárdsági csoportba tartozó ferrit-perlit acélokra vonatkozik. A mérésekhez törésmechanikai (bemetszett és befárasztott hajlító, vagy kompakt húzó) próbatesteket kell készíteni, de ezek mérete lehet kisebb, mint a szokásos, azaz a törésmechanikai szabványokban előírt. A darabokat olyan hőmérsékleten kell vizsgálni, hogy azok ridegen törjenek ugyan, de egy kevés képlékeny alakváltozás után, vagyis a mérés a képlékeny-rideg tartományban történjen. Ez a szokásos reaktoranyagoknál a besugárzás előtti állapotban $-50 \div -90$ °C hőmérsékletet is jelenthet. A vizsgálati hőmérséklet kiválasztásához korábbi tapasztalatok, vagy a hőmérséklet függvényében végzett Charpy-mérések adhatnak útmutatást. Az erőt és a próbatest alakváltozását megfelelő műszerezettséggel mérni és regisztrálni kell. Egy ilyen regisztrátumot mutat az 1. ábra. A méréskor felvett terhelési görbe alapján először a J-integrált kell számítani, majd ebből adódik a K_{Ic} . A J-integrál a rugalmas és a képlékeny komponensek összege:



1. ábra. Egy varratfémről kivágott, 10x10x55 mm méretű hajlító próbatest erő-lehajlás görbéje. Repedés mélysége kb. 5 mm, vizsgálati hőmérséklet -65 °C. Az előírás szerint a próbatestet többször fel-le kell terhelni.

$$J_c = J_e + J_p \quad [\text{N/mm}] \quad (1)$$

A számításokhoz használt képleteket egy oldalbemetszett, hajlító próbatest esetére adjuk meg. Más alakú, vagy oldalbemetszés nélküli próbatesteknél a képletek kissé módosulnak, de a lényeg nem változik. A rugalmas komponenset a következőképpen számítjuk:

$$J_e = (K_e)^2/E \quad [\text{N/mm}] \quad (2)$$

ahol

$$K_e = [P/(BB_N W^{1/2})] f(a_0/W) \quad [\text{N/mm}^{3/2}]$$

$$f(a_0/W) = (2 + a_0/W) \{0.886 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)^4\} / (1 - a_0/W)^{3/2}$$

a_0 = kezdeti repedés mérete [mm]

P = a törésnél mért erő [N]

B = a próbatest teljes vastagsága [mm]

B_N = az oldalbemetszések közötti távolság [mm]

W = a próbatest szélessége [mm]

A J-integrál képlékeny komponense:

$$J_p = \frac{\eta A_p}{B_N (W - a_0)} \quad [\text{N/mm}] \quad (3)$$

ahol

η = a próbatesttől függő tényező, esetünkben 2

A_p = a terhelési görbe alatti terület képlékeny része (lásd az 1. ábrát) [N.mm]

* Atomenergiakutató Intézet, KFKI, MTA, Budapest, 1121 Konkoly-Thege út 29-33.

A J-integrál ismeretében számítható a K_{Jc} :

$$K_{Jc} = (J_c E / 1000)^{1/2} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (4)$$

ahol

E = rugalmassági modulus [N/mm²]

A továbbiakban meg kell vizsgálni, hogy az eredmény „érvényes”-e vagy sem, azaz sikerült-e a vizsgálati hőmérséklettel a kellő intervallumot eltalálni. Ez az anyag folyáshatára és a darab mérete alapján döntendő el. Követelmény, hogy

$$K_{Jc} \leq K_{Jc(\text{limit})} \equiv \left[\frac{E(W - a_0)R_{p0.2}}{30} \right]^{1/2} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (5)$$

ahol

$R_{p0.2}$ = az egyezményes folyáshatár [N/mm²]

A statisztikus kiértékeléshez általában hat, esetenként egy-két darabban több érvényes mérésre van szükség. Azonban azokat az eredményeket, amelyek kívül esnek az érvényességi határon, sem lehet elfelejteni, hanem megfelelően módosított formában a kiértékeléshez fel kell használni. Így a teljes adathalmazból kell a statisztikus jellemzőket, elsősorban a K_{Jc} értékek mediánját, $K_{Jc(\text{med})}$ -t kiszámítani. Az említett ellenőrző mérések alapján ugyanis azt állapították meg, hogy az adatok Weibull-eloszlást követnek. A számítás két lépésben végezzük. Először a K_o értéket határozzuk meg, ahol a törési valószínűség 63,2%, majd ebből számítjuk át a $K_{Jc(\text{med})}$ -t. A törési valószínűsége vonatkozó Weibull-eloszlást a következő összefüggés írja le:

$$p_f = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{K_{Jc} - K_{\min}}{K_o - K_{\min}}\right]^b\right\} \quad (6)$$

Az is bebizonyosodott, hogy az érintett acéloknál a három Weibull-paraméter közül kettőnek az értékét fel lehet venni és csak a harmadik paraméter kell a mérési eredményekből számítani. Így $K_{\min} = 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ és $b = 4$. A K_o kiszámítása előtt azonban célszerű a mérési eredményeket átszámítani 1T, azaz 25,4 mm vastagságú próbatestekre, hiszen a próbatestek méretével változik annak valószínűsége, hogy egy törést okozó hiba éppen előfordul-e a vizsgált darabban. Ez a következő lehetőséges:

$$K_{Jc(1T)} = K_{\min} + (K_{Jc} - K_{\min}) (B / 25,4)^{1/4} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (7)$$

Most már számítható a K_o attól függően, hogy az adathalmaz csak érvényes méréseket tartalmaz-e, vagy sem. Az előbbi esetben a

$$K_o = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (K_{Jc(i)} - K_{\min})^4}{N} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (8)$$

képlet használandó, ahol

N = a vizsgált próbatestek száma

Amennyiben az adathalmazban érvénytelen mérések is vannak, akkor az eljárás a következő: Az érvénytelen mérések helyett (ahol tehát a mért K_{Jc} nagyobb, mint a $K_{Jc(\text{limit})}$) a $K_{Jc(\text{limit})}$ -t helyettesítjük be. A (8) képlet pedig az alábbiak szerint módosul:

$$K_o = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (K_{Jc(i)} - K_{\min})^4}{r} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (9)$$

ahol

r = az érvényes adatok száma

A K_o -ból a $K_{Jc(\text{med})}$ -t a következőképpen kapjuk:

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{\min} + (K_o - K_{\min}) [\ln(2)]^{1/4} \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (10)$$

Ilyen módon megkaptuk a $K_{Jc(\text{med})}(T)$ görbe, azaz a mestergörbe egyetlen pontját, vagyis a $K_{Jc(\text{med})}$ értékét a vizsgálati hőmérsékleten. A teljes görbét a

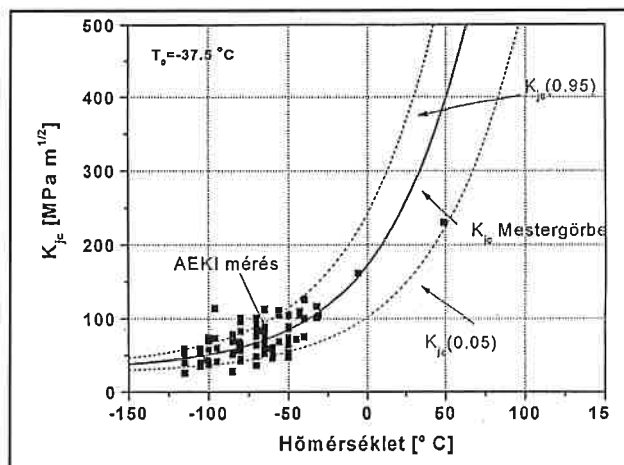
$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_o)] \quad [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (11)$$

képlet írja le. Itt a T_o az ún. referencia hőmérsékletet jelenti. Ez az a hőmérséklet ahol a $K_{Jc(\text{med})}$ értéke = 100 [MPa·m^{1/2}]. Mivel a mestergörbe egy pontját már meghatároztuk, a (11) egyenletben csak a T_o az ismeretlen. Ezért az egyenlet átrendezésével ezt fejezzük ki és ezt számoljuk:

$$T_o = T - \frac{1}{0.019} \ln \left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad (^\circ\text{C}) \quad (12)$$

Természetesen, mivel a mester görbét matematikai statisztikával határoztuk meg, számíthatjuk bármely törési valószínűséghez tartozó K_{Jc} értékeket is a hőmérséklet függvényében. Szokásos az 5 és a 95%-hoz tartozó értékek megadása. Ezt a 2. ábrán szaggatott vonalakkal jelezzük.

A szabvány lehetővé teszi olyan mérések kiértékelését is, amelyeket különböző hőmérsékleteken végeztek. Ilyenkor a kiértékelés kissé bonyolultabb, a T_o meghatározása iterációval történik. Általánosságban



2. ábra. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által szervezett közös vizsgálatban résztvevő laboratóriumok összesített eredményei a varratfém mestergörbéjére. A T_o hőmérsékleten (-37,5 °C) a $K_{Jc} = 100 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

igaz, hogy nem szerencsés, ha a vizsgálati hőmérséklet túlságosan eltér a T_o -tól. Ez a követelmény az eltérő hőmérsékleten végzett mérések esetére is igaz. Célszerű, ha a felhasznált mérések vizsgálati hőmérséklete $T_o - 14^\circ\text{C}$ és $T_o + 50^\circ\text{C}$ között marad.

Az Atomenergiakutató Intézetben különféle reaktoracél vizsgáltunk besugárzott és eredeti állapotban. Az egyik acélfajta egy közös vizsgálatok céljára készített, viszonylag sok kén- és rézszennyezőt tartalmazó és ezért sugárkárosodásra érzékeny A533B típusú acél volt (jele: JRQ), a másik egy mai minőségű, A533B típusú acélnak felelt meg (jele: JFL), a harmadik a Paksi Atomerőműben is használatos 15H2MFA jelű orosz acél és végül a negyedik, a VVER-440 reaktorok tartályainál alkalmazott hegesztési technológiával készült, de több szennyezőt tartalmazó varrat anyaga volt (jele: W). A referencia hőmérsékletre vonatkozó eredményeket a táblázat foglalja össze:

Anyag	Allapot	$T_{\text{vizsgálat}} [^\circ\text{C}]$	$T_o [^\circ\text{C}]$
JRQ (23.sz. lömb)	Eredeti	-70	-62,8
JRQ (23.sz. lömb)	Eredeti	-65	-68,4
JRQ (31.sz. lömb)	Eredeti	-70	-52,7
JRQ (31.sz. lömb, 10x20x90 mm pr.test)	Eredeti	-50	-64,7
JRQ (23.sz. lömb)	Besugárzás: $3,5 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$	21	53,2
JFL (10x20x90 mm pr.test)	Eredeti	-90	-109,4
15H2MFA	Eredeti	-105	-96,4
Varrat, W	Eredeti	-65	-44,1
Varrat, W	Besugárzás: $3,5 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$	39	33,1
Varrat, W	Besugárzás után hőkezelve: 470°C/ 100 óra	-50	-48,5
Varrat, W	Hőkezelés után újra besugárrozva, $3,5 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$	34-48	59,6

Az eredmények, valamint azok összehasonlítása az azonos anyagokon végzett külföldi mérések adataival azt bizonyítják, hogy ez a módszer jól beválk, az eredmények jól reprodukálhatók és érzékenyen reagálnak az anyagok tulajdonságaiban beálló változásokra. Ennek ellenére a szabványt ma még csak inkább egy ajánlásnak kell tekinteni, a hatósági előírások még nem vették át annak használatát és a szakirodalomban is tovább folyik még a vita, amennyiben további ajánlások jelennek meg [6-7].

Irodalom

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1968.
- ASTM E1921-97 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_o , for Ferritic Steels in the Transition Range.
- Wallin, K.: Recommendations for the Application of Fracture Toughness Data for Structural Integrity Assessments. Proceedings of the Joint IAEA/CSNI Specialists Meeting on Fracture Mechanics Verification by Large-Scale Testing, NUREG/CP-0131 (ORNL/TM-12413), October 1993, pp. 465-494.
- Wallin, K.: Validity of Small Specimen Fracture Toughness Estimates Neglecting Constraint Corrections. In: Constraint Effects in Fracture: Theory and Applications, ASTM STP 1244, M.Kirk and A.Bakker, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp.519-537.
- Wallin, K.: Master Curve Analysis of Ductile to Brittle Transition Region Fracture Toughness Round Robin Data (The Euro Fracture Toughness Curve), VTT Technical Document 367.58P, Espoo, Finland, 1998.
- Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Shvetsova, V.A.: Probabilistic model for fracture toughness prediction based on the new local fracture criteria. Int. J.Pressure Vessel & Piping, 1998, vol.75, 307-320.
- Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Shvetsova, V.A.: Improved probabilistic model for fracture toughness prediction based for nuclear pressure vessel steels. Int. J.Pressure Vessel & Piping, 1998, vol.75, 843-855.