

A MESTERGÖRBE ÉS ALKALMAZÁSA A NUKLEÁRIS IPARBAN MASTER CURVE AND ITS APPLICATION IN THE NUCLEAR INDUSTRY

GILLEMOT FERENC, HORVÁTH LÁSZLÓNÉ

Kulcsszavak: Mestergörbe, reaktor anyagok, Eurofer 97 acél, Charpy vizsgálat

Keywords: Master Curve, reactor materials, Eurofer 97 steel, Charpy test

Summary

In the surveillance programs of the nuclear units and in the study of radiation embrittlement of structural materials the traditional fracture mechanics generally can't be used, since the size of the irradiated specimens is limited. The small size specimens give valid fracture toughness data only at low temperature, but data below the operating or shut down temperatures of reactor pressure vessels are useless at safety and lifetime evaluation. Traditionally Charpy impact tests used to measure the transition temperature shift caused by irradiation and thermal ageing, but the Charpy test is a dynamic sensitivity test, and only a very uncertain empirical correlation is available to calculate the fracture toughness of the aged material. This case the applied safety margin is large, and it shortens the calculated safe lifetime. To solve this problem K. Wallin elaborated a semi empirical method based on the weakest link theory to calculate realistic fracture toughness trend curves from data obtained on small size specimens. The paper describes the method and introduces some examples of the practical application.

Bevezetés a mestergörbe elméletbe és az alkalmazási gyakorlatába.

A „Mestergörbe” tulajdonképpen egy exponenciális görbe, amelyik leírja a törési szívósság-hőmérséklet összefüggést. A törési szívósság az a munka érték, amelynél egy repedés statikus terhelés hatására megindul. A mestergörbe alakja, meredeksége és kitevője nagyon hasonlít az OAH 3.17, 3.18 útmutatókban, valamint a VERLIFE-ban [1] és a PNAE-G-002-86 [2] orosz szabályzatban megadott K_{1c} görbéhez, ami természetes is, mert a mestergörbe alakját ugyanazon adatbázisok alapján határozta meg K. Wallin [3], mint a K_{1c} görbékét, sőt a mestergörbe is valamennyi reaktoracélra vonatkozik, mint a fent említett görbék (azaz a 15H2MFA-ra és varratára konzervatív). A különbség az, hogy a mestergörbe helyzetét a hőmérsékleti skálán valódi statikus törésmechani-

kai anyagjellemző kiválasztott kritikus értéke ($K_{1c}=100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ kritérium) határozza meg, amelyet kisméretű próbatesteken mérnek ki, majd a -weakest link (leggyöngébb láncszem) - elmélettel és félempirikus becsléssel átkonvertálnak 1CT (1 inch vastag) méretű próbatestekre. A módszer előnye, hogy valódi törésmechanikai próbatesteken (előrepszett próbatest, statikus terhelés, repedés megindulásig elnyelt energia) határozza meg a görbe helyzetét, és mérhető öregített és besugárzott próbatesteken is.

Evvel szemben hagyományos K_{1c} görbe alakját nagyméretű (1-25" vastag) próbatesteken mérték ki a 70 es és 80-as években - és a Charpy V ütőmunka valamely kritériummal kiválasztott átmeneti hőmérséklete szerint tolják el a hőmérsékleti skálán. A nagy próbatest méretek miatt nem lehet a törési szívósságot mérni üzemelő szerkezetekből vett mintákon és azokat nem lehet reaktorban besugározni.

A Charpy V próbán mért ütőmunka egy lekerített (0.25 mm rádiuszú) próbatesten mért abszorbeált munka érték, amely magában foglalja a lekerített bemetszésből a repedés megindulásáig szükséges deformációs munkát, a repedés megindulás munkáját, és a próbatest 8 mm-es vastagságán keresztül a repedés terjedés munkáját. Csak közelítésnek tekinthetjük, hogy ezt a munkát a tisztán statikus repedés-megindulás munkájának a korrekciójára használjuk fel. Az átmeneti hőmérséklet meghatározása valamilyen empirikus kritérium (valamilyen elnyelt energia érték (gyakran 41 J, vagy laterális expanzió, vagy töret értékelés) alapján történik. Ezeknek a kritériumoknak nincs valódi fizikai alapjuk, a gyakorlatban alakultak ki a vasúti iparban. A besugárzott anyag K_{1c} görbét a szabályzatokban megadott K_{1c} görbe alakból, a gyári ütőmunka mérés, a surveillance 0 és besugárzott próbatesteken végzett mérésekből korrelációval állapítják meg. Így három Charpy átmeneti hőmérséklet mérés hibájával terhelt a „hagyományos” K_{1c} görbe sugárkárosodott anyag esetén. Megjegyzendő, hogy a tapasztalatok alapján a sugárkárosodás okozta görbe eltolódás 10-20%-kal nagyobb a statikus törésmechanikai próbatesten mérve, mint Charpy próbatesten, ugyanakkor a valódi korrekt törésmechanikai kritikus hőmérséklet jelentősen alacsonyabb, mint a Charpy átmeneti

Dr. Gillemot Ferenc A.S.I. Kft
Horváth Lászlóné KFKI Atomenergia Kutató Intézet
Az 5. AGY-on elhangzott előadás írott változata

hőmérséklet. Ennek az az oka, hogy a Charpy próba nemcsak a repedés megindulás energiáját méri, és az igénybevétel nagy sebességgel történik.

Mindezek alapján kimondható, hogy szükség van egy olyan mérési módszerre, amely kis próbatesteken is lehetővé teszi a törési szívósság-hőmérséklet trendgörbe korrekt meghatározását és ez jelenleg a mestergörbe.

A mestergörbe alapesetben (Basic Master-curve)

A mestergörbe félempirikus mérnöki közelítése a törési szívóssági trendgörbének. A törési szívósság trendgörbék a törési szívósság hőmérséklet függését írják le. A görbe alakját egy exponenciális függvénnyel lehet leírni és egy jellegzetes pontjának kimérésével lehet meghatározni a helyzetét a hőmérsékleti skálán. Az úgynevezett K_{1c} görbénél ez a pont a Charpy (dinamikus ütőmunka) 41 J kritériummal megállapított értéke (T_{k41J} , ami teljesen empirikus választás!), míg a mestergörbénél a 100MPa \sqrt{m} törési szívóssághoz tartozó hőmérséklet értéke (T_0). Ez utóbbi valódi törésmechanikai mérésen alapszik, így korrekt értéket ad. Az ASTM 1921-05 szabvány [4] a görbe képletét adja meg

$$K_0 = 31 + 77 \cdot \exp\{0.019 \cdot (T - T_0)\}$$

és azt a módszert, amellyel a mérési szórások figyelembevételével kiszámítható a T_0 hőmérséklet értéke. A méréseket sohasem lehet úgy elvégezni, hogy pont 100 MPa \sqrt{m} értéket adjanak, hanem a mérési hőmérséklet változtatásával el kell érni, hogy a mérések eredményei valódi törési szívósságot adjanak (K_{1c} , K_{1jc}), majd a próbatest méret-hatását és a mérési szórásokat figyelembe véve ki kell számítani a T_0 hőmérsékletet.

A törési valószínűség eloszlása egyetlen hőmérsékleten elvégzett mérések és homogén ferrites acél esetében:

$$P_f = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4\right\}$$

ahol K_{jc} a P_f valószínűséghez tartozó törési szívósság, K_{min} a szerkezeti anyag elméleti minimális törési szívóssága (csak rugalmas deformációval történő törési szívóssága) és K_0 egy karakterisztikus törési szívóssági érték, amely 63,2% törési valószínűséghez tartozik. K_{min} értéke acélra 20 Mpa \sqrt{m} .

A K_{1c} vagy K_{jc} (J integrálból számított K_{1c}) ridegtöréshez tartozó törési szívósság érték (szélsőérték). Az ASTM 1921 szabvány szerint a

$$K_{Jc} \leq \sqrt{\frac{(W - a) \cdot \sigma_Y \cdot E}{30 \cdot (1 - \nu^2)}}$$

kritériummal szelektálhatóak a mérési eredmények. W a próbatest vastagsága, az előreperesztés mélysége, E a rugalmassági modulus, σ_Y a folyáshatár és ν a Poisson tényező. Ha a mért törési szívósság a számított értéknél nagyobb, azaz nem ridegtörés vagy kvázi ridegtörés történt, akkor a kritérium szerinti értéket kell használni a továbbiakban (cenzorálás). A kiértékeléséhez minimálisan hat érvényes mérés szükséges, a cenzorált értékek nem számítanak bele a hat mérésbe, bár a statisztikai elemzésnél a cenzorált értékeket figyelembe lehet venni.

A mestergörbe értékelés figyelembe veszi a próbatest méretének a hatását is és 25 mm vastag próbatestre (1CT=compact tension) normalizálja az adatokat a következő képlettel:

$$K_{25mm} = K_{min} + (K_{JC} - K_{min}) \cdot \left(\frac{B}{B_0}\right)^{1/4}$$

ahol B a próbatest vastagság és $B_0=25$ mm.

Annak a hőmérsékletnek a kiválasztása, ahol a legnagyobb a valószínűsége az érvényes méréseknek általában próbálkozásokkal történik.

Segítséget nyújt a próba hőmérsékletének az előzetes kiválasztásához az 1. táblázat, ha ismerjük az adott acél Charpy átmeneti hőmérsékletét.

Próbatest mérete (1CT próbához viszonyított arány)	Próba javasolt hőmérséklete $T_{test}=T_{Charpy\ 41J} - T$
(1CT próbához viszonyított arány)	T [°C]
Előreperesztett Charpy méretű 3 pont hajlító-próba (10*10*55mm)	-50
0.4	-38
0.5	-34
1	-24
2	-14
3	-7
4	-4

1. táblázat. A mestergörbe mérés hőmérséklet kiválasztása Charpy átmeneti hőmérséklet alapján.

Az egy hőmérsékletes kiértékelésnél így rendszerint az első néhány mérés nem értékelhető, mert el kell találni a méréshez alkalmas hőmérséklet tartományt.

A több hőmérsékleten mért mestergörbe

Ennek a hátránynak a kiküszöbölésére és regebbi különböző hőmérsékleten végzett mérések feldolgozására az ASTM 1921-05 szabvány lehetővé teszi több hőmérsékleten mért adatok feldolgozását a következő egyenletek segítségével:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i \cdot \exp\{0.019 \cdot [T_i - T_0]\}}{11 + 77 \cdot \exp\{0.019 \cdot [T_i - T_0]\}} = \sum_{i=1}^n \frac{(K_{Jc_i} - 20)^4 \cdot \exp\{0.019 \cdot [T_i - T_0]\}}{(11 + 77 \cdot \exp\{0.019 \cdot [T_i - T_0]\})^5}$$

A számítás feltétele, hogy csak olyan mért értékek vehetők figyelembe, amelyeknek a mérési hőmérséklete maximum $\pm 50^\circ\text{C}$ -kal tér el a T_0 kiszámított hőmérséklettől.

Végül az ASTM 1921-05 szabvány megadja a figyelembe veendő mérési szórást is, amely az érvényes mérések számától függ:

$$\sigma_{T_{0E1921}} = \frac{\beta}{\sqrt{r}}$$

ahol r az érvényes (cenzorálatlan) mérések száma és β az alábbi táblázatból vehető ki:

K_{Jcmed}^{eq} [MPa \sqrt{m}]	β
>82	18
65-82	18,8
58-65	20,1

2. táblázat. β meghatározása a K_{Jcmed} függvényében

A számítás a képlet hossza ellenére is viszonylag egyszerűen elvégezhető egy táblázatkezelő programban, ahol az egyes próbatestek értékei kerülnek beírásra, majd az egyes próbatestekből számított értékek summájának a minimum értékét vagy nemlineáris egyenlet megoldó opcióval PC-n számíthatjuk, vagy feltételezzük, hogy a T_0 értéke egy zárt tartományba esik (pl. -80 - $+30^\circ\text{C}$ közé, fokenként kiszámoltatjuk az értékeket és keressük a minimumhoz eső T_0 -t.

A mestergörbe természetesen a trendgörbe 50%-os valószínűségéhez tartozik. Ebből azonban egyszerűen meghatározható az 5 %, 1% vagy más törési valószínűséghez tartozó alsó határgörbe. A gyakorlatban az 5 % törési valószínűséghez tartozó görbét használják, ami azt jelenti, hogy valószínűen a mérések 5 %-a fog az alsó burkoló görbe alá esni. Ez megfelel a mérnöki gyakorlatnak, mert a valós szerkezeteknél még biztonsági tényezőket is alkalmaznak, és kis valószínűségi terhelésekre is méreteznek.

A mestergörbe kimérésénél figyelembe kell venni, hogy minél kisebbek a próbatestek annál nagyobb a mérési szórás. Az optimális anyagfelhasználás (legkisebb anyagfelhasználással legyártott próbatestek) valahol a Charpy méretű, esetleg az $5 \times 10 \times 55$ mm-es fél-Charpy próbatestek tartományába esik. Számos publikáció létezik ennél kisebb próbatestek használatára, azonban a szórás ilyenkor annyira megnő, hogy vagy túl konzervatív alsó burkoló görbét kapunk, vagy nagyon nagyszámú próbatestet kell felhasználni.

Inhomogén mestergörbe.

A mérnöki szerkezetek anyaga sokszor inhomogén. A nagyméretű kovácsdarabok és lemezek tulajdonságai az egymástól távol eső helyeken eltérőek. Sok esetben javítják a nagyméretű darabokat hegesztéssel is. A mestergörbe számítási módszere alkalmas e kétfázisú (inhomogén) szerkezeti anyag tulajdonságainak a leírására is. A mestergörbe valószínűségi analízisen alapszik (maximum likelihood). A valószínűségi analízis megoldható kétfázisú (bimodal) vagy véletlenszerűen inhomogén anyagokra is. Véletlenszerűen inhomogén tulajdonságokat elsősorban a hegesztési varratok mutatnak, ahol a technológiából következően az egyes sorok tulajdonságai eltérőek lehetnek egymástól, míg a kétfázisú anyagmodell egyes kovácsolt anyagokra és a hegesztési varratok hőzónájára jellemző. A valószínűségi változó T_0 feltételezhetően egy Gauss eloszlást követ ahol a középpérték T_{0MML} és a szórás $\sigma_{T_{0MML}}$. A valószínűségi függvény T_0 értékére ebben az esetben:

$$f_T = \frac{1}{\sigma_{T_{0MML}} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(T_0 - T_{0MML})^2}{2 \cdot \sigma_{T_{0MML}}^2}\right\}$$

ezt visszahelyettesítve a mestergörbe törési valószínűségébe:

$$f_{T_0} = 4 \cdot \frac{(K_{JC} - K_{min})^3}{(K_0 - K_{min})^4} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4\right\}$$

Az eloszlásfüggvény valamennyi próbatest törési valószínűségére:

$$f = \int_{-\infty}^{\infty} f_T \cdot f_{T_0} \cdot dT_0$$

Annak eldöntésére, hogy az alap vagy az inhomogén mestergörbe szerint kell a mérés kiértékelését elvégezni egy egyszerű kritérium használható:

$$\sigma_{T_{0MML}} > 2 \cdot \sigma_{T_{0E1921}}$$

A Mestergörbe alkalmazásának határai.

A mestergörbét ferrit-perlites alacsonyán ötvözött acélokra dolgozták ki a nukleáris ipar részére. Miután félempirikus trendgörbéről van szó, amelyet a reaktortartály acélok adatbázisán fejlesztettek ki, nem alkalmazható lágy szénacélokra, és erősen ötvözött acélokra (pl. saválló acélokra) sem. Alkalmazását azonban javasolták a ferrit-martenzites hőálló acélokra (9-14% Cr tartalmú acélok), amelyeket a jövő energetikai berendezéseinek tervezésénél használni (pl. fúziós reaktorok, szuperkritikus erőművek, negyedik generációs atomerőművek, vagy magas hőmérsékleten üzemelő olajfinomító berendezések. Egy ilyen acélon a KFKI AEKI-ben végzett mérést mutatunk be az alkalmazások fejezetben.

A mestergörbe nem érvényes – a törési szívósság trendgörbéhez hasonlóan - a 200 MPa√m érték felett. Ezen érték felett azonban már gyakorlatilag kizárt a ridegtörés a mérési szerkezeteknél és így nincs jelentősége a mestergörbe folytatásának a magasabb szívóssági értékek tartományába.

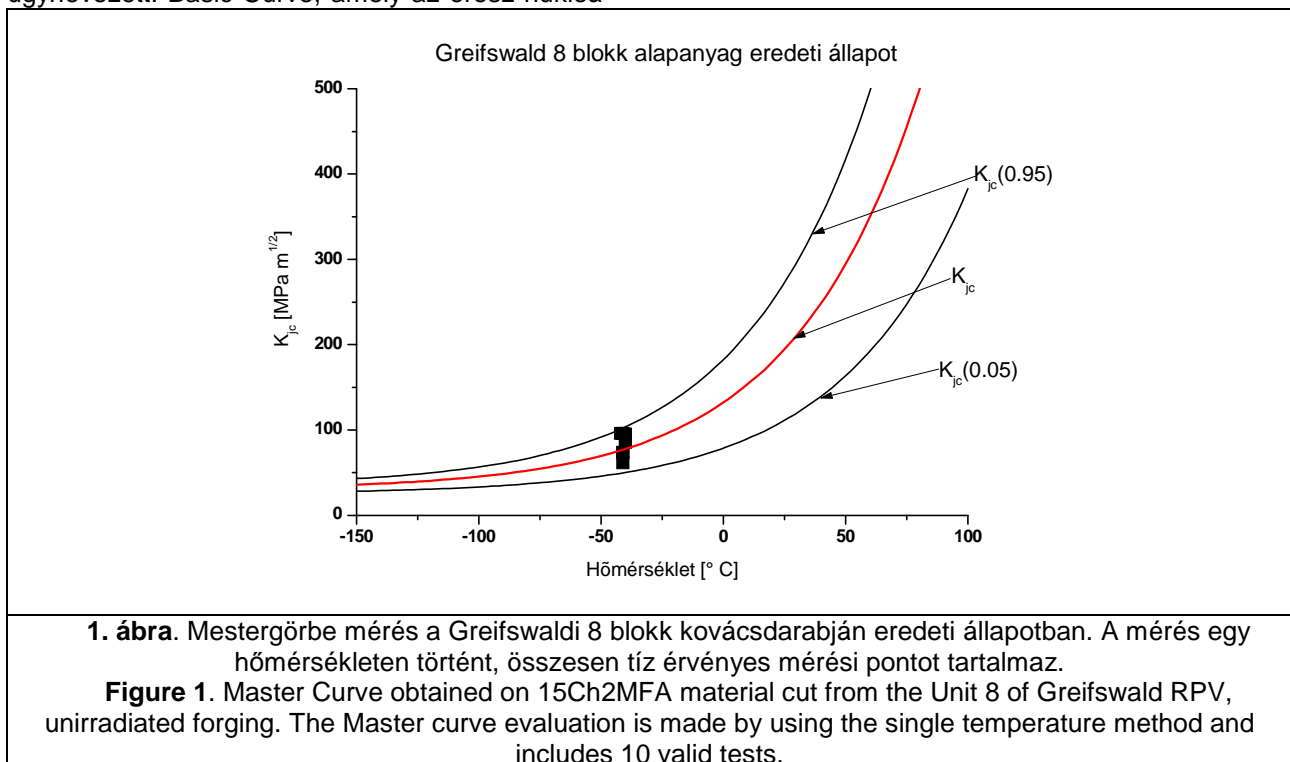
A mestergörbének létezik egy orosz párja, az úgynevezett. Basic Curve, amely az orosz nukleá-

ris szabályzatokban található meg. A két görbe azonos eredményeket ad a legtöbb esetben. Eltérés található az erősen öregedett anyagoknál a felső értéktartomány (200 MPa√m) közelében, azonban ennek sincs. gyakorlati jelentősége. A Basic Curve kevésbé alapszik empirián, mint a mestergörbe, viszont a számítása sokkal bonyolultabb, és mivel több paramétert tartalmaz a kimérése is költségesebb és nehezebb. A mérési gyakorlatban az egyszerűbb mestergörbe alkalmazása sokkal célszerűbb.

Kim Wallin [5] kimutatta, hogy bár a mestergörbe mérhető a Charpy próbánál kisebb próbatesten is (pl. 3*4*27 mm-es KLST próbatest), a kis méreteknél annyira megnő a szórás, hogy azonos – a gyakorlatban használható - eredmény eléréséhez több anyag kell, mint a Charpy méretű próbák térfogata.

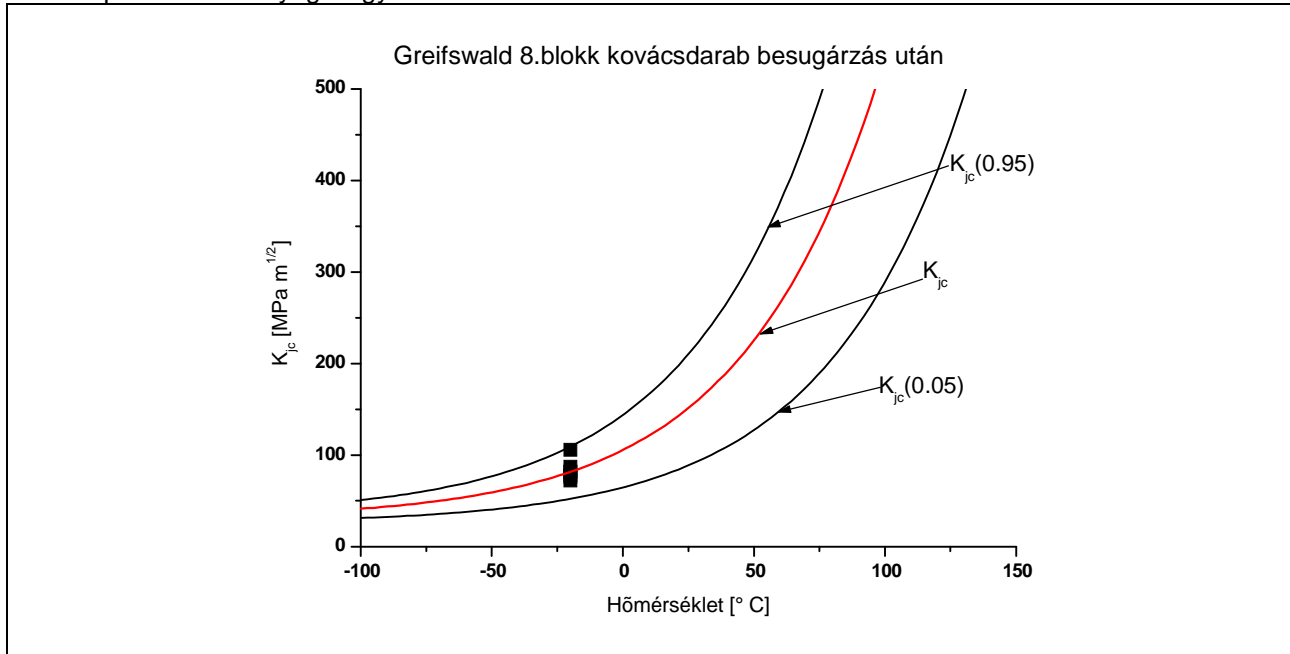
Néhány példa a mestergörbe alkalmazására.

A Greifswaldi atomerőmű 8. blokkja ugyanolyan Skoda gyártmányú reaktor volt, mint a paksi atomerőmű 1 - 4 blokkja. Elindítása előtt bekövetkezett Németország egyesítése, a blokkot sohasem helyezték üzembe, hanem szétválták és leszerelték.anyagából a drezdai Institute of Safety megszerzett néhány darabot és megosztotta a KFKI Atomenergia Kutató Intézettel és a petteni JRC Institute for Energy EU intézettel. A közös projekt során Pettenben, Drezdában és Budapesten több sorozat acélmintán vizsgáltuk a kovácsdarabok sugárállóságát. [6]



Olyan nagyméretű próbadarabok besugárzása, amelyeken, szobahőmérsékleten vagy efelett érvényes K_{Ic} mérést lehetett volna végezni, szóba sem jöhetett. Charpy méretű előrepszett próbatesteken végeztünk méréseket eredeti és besugárzott állapotban. Az anyag vegyi összetételét a 3.

táblázat mutatja be. A kimért mestergörbét az eredeti állapotban és a besugárzás utáni állapotban az 1a és 1b ábrák mutatják be. Jól látható, hogy a sugárkárosodás a T_0 kritikus hőmérsékletet a pozitív tartomány felé tolta el.



2. ábra. Mestergörbe mérés a grifswaldi 8. blokk kovácsdarabján $3 \cdot 10^{19}$ n/cm² E >1MeV neutron besugárzás után. A mérés egy hőmérsékleten történt, összesen nyolc érvényes mérési pontot tartalmaz.

Figure 2. Master Curve obtained on 15Ch2MFA material cut from the Unit 8 of Greifswald RPV, irradiated with $3 \cdot 10^{19}$ n/cm² E >1MeV neutron fluence at 270°C in the Budapest Research Reactor. The Master curve evaluation is made by using the one temperature method and includes 8 valid tests.

Általános tapasztalat, hogy az eltolódás mértéke kb. 10%-al nagyobb, mint a Charpy átmeneti hőmérséklet eltolódása azonos besugárzás esetén, de a Charpy vizsgálat nagyobb szórása és a magasabb átmeneti hőmérséklete miatt a mestergörbe nemcsak valós, de kevésbé konzervatív eredményt is ad, ami előnyös a reaktorok élettartamának törésmechanikai számításánál. Az acél vegyi összetételét a 3. táblázat, az egy hőmérsékleten végzett mestergörbe mérés eredményeit a 1. és a 2. ábra mutatja be.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
[%]					
0,15	0,30	0,45	2,86	0,10	0,79
W	Cu	P	S	V	
[%]					
0,01	0,05	0,008	0,009	0,31	

3. táblázat. A Greifswaldi 8. blokk 0.3.1 jelű kovácsdarab vegyi összetétele

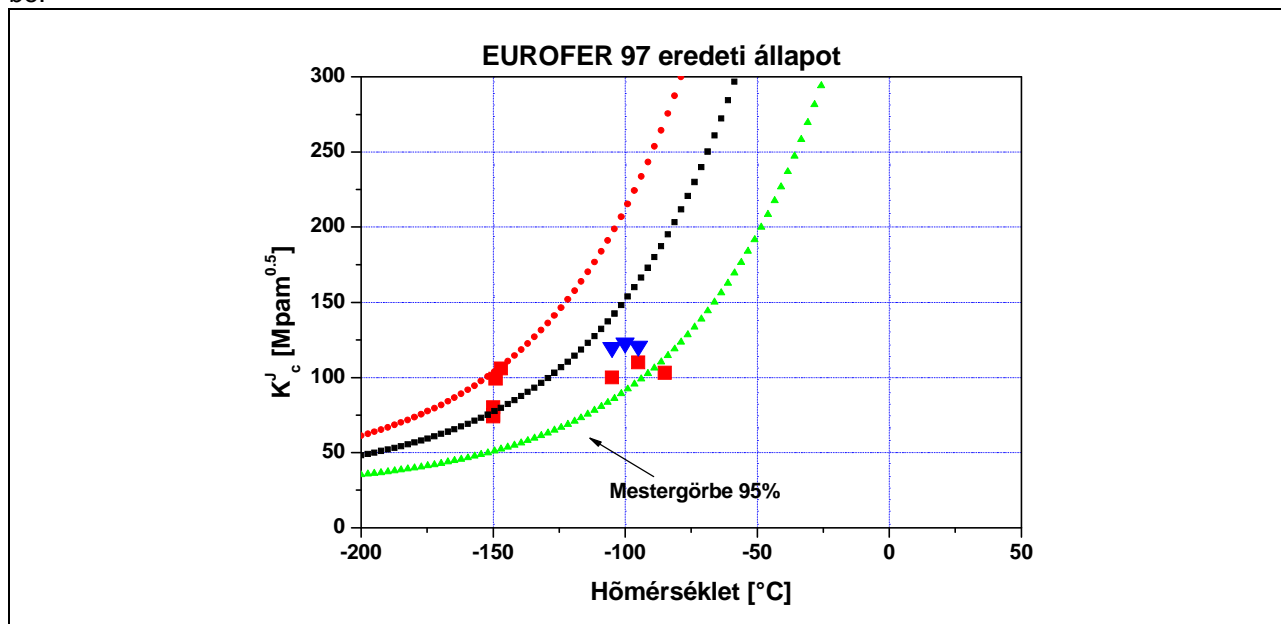
Egy másik érdekes mérésorozat volt az Eurofer 97 anyag vizsgálata [7]. Az Eurofer mechanikus ötvözéssel készített 9 %-os Cr acél számos más ötvözővel, amelyek közös tulajdon-

sága, hogy kevésbé aktiválódnak és hamar elvesztik a radioaktivitásukat. Az Eurofer-t fúziós reaktorok számára fejlesztették ki, sugárállósága és korrózióállósága mellett 600 – 650 °C-on is jelentős szilárdsággal rendelkeznek. A problémát az jelenti, hogy csupán laboratóriumi mennyiségeket állítottak eddig elő és igen drága. A kísérlet célja az volt, hogy megállapítsuk, alkalmazható-e a Mestergörbe módszer erre az anyagra is eredeti állapotban és kutatóreaktorban történő besugárzás után is. A rendelkezésre álló anyagmennyiség olyan kevés volt, hogy csak 4 - 4 próbatestet tudtunk belőle kivágni. Ezek eltörése után úgynevezett próbatest rekonstrukcióval (az eltört próbatestek két-két maradék darabjának két végét más anyag hozzáhegesztésével kitoldottuk és ebből új próbatesteket munkáltunk ki) állítottunk elő újabb 8 próbatestet. Az így mért mestergörbe besugárzatlan anyagon kiváló eredményt adott. Ennek az anyagnak a sugárkárosodással szembeni szívóssága olyan nagy, hogy a besugárzott anyagon az első néhány mérés érvénytelen lett (túl nagyra becsültük a sugárkárosodás által okozott átmeneti hőmérséklet-emelkedést, mert hasonló mérési adat még nem volt az irodalomban sem) és

így nem kaptunk érvényes görbét. Bár a kapott görbe érvénytelen, jól látható, hogy a módszer alkalmazható az Euroferr vizsgálatára mind eredeti, mind besugárzott állapotban, és ez az acél igen kevésbé ridegszik a neutronsugárzás hatására. Az acél vegyi összetételét a 4. táblázat, a mestergörbe mérés eredményeit a 3. és a 4. ábra mutatja be.

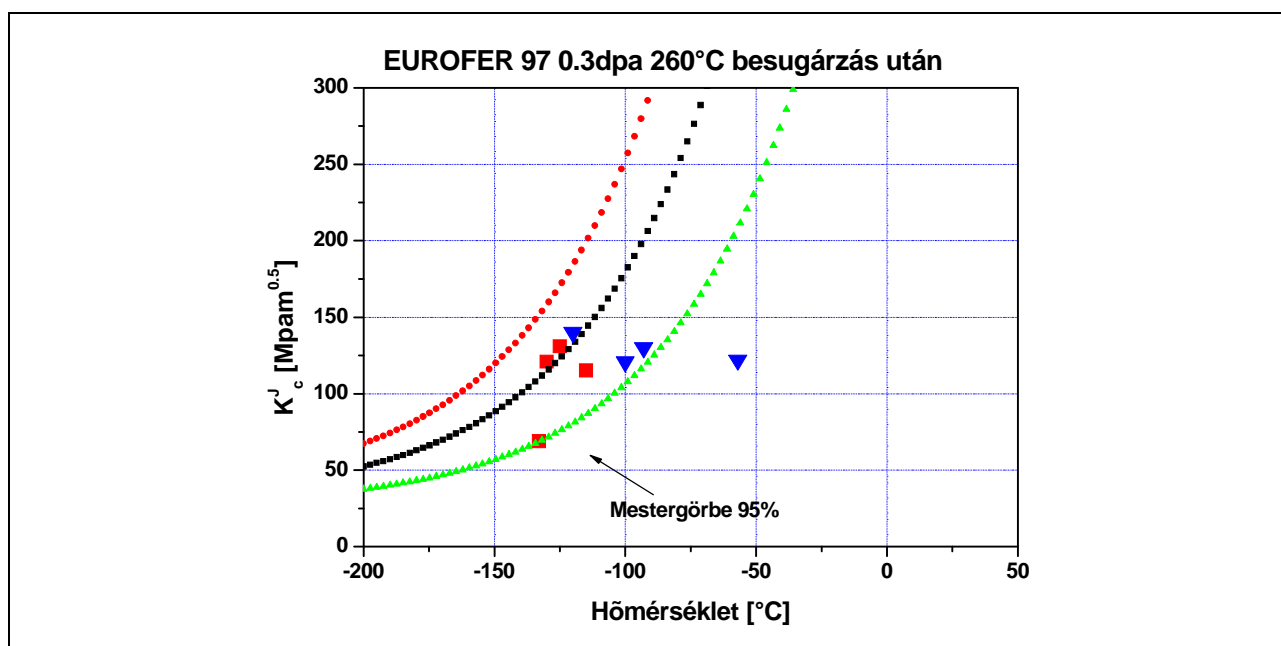
Acél	Cr	W	Mn	V	Ta
	[%]				
Eurofer 97	8,9	1,07	0,49	0,28	0,15

4. táblázat. Az Eurofer 97 acél vegyi összetétele.



3. ábra. EUROFERR 98 acél mestergörbe vizsgálata eredeti állapotban. A piros kockák az érvényes mérési pontok, a kék háromszögek a cenzorált mérési pontok.

Figure 3. Master Curve testing of Eurofer 97 (9% Cr ferrite martensitic steel) in as received state. Multitemperature method is used. The red quadrangles are the valid results; the blue triangles are censored points



4. ábra. EUROFER 97 acél mestergörbe vizsgálata 0.3 dpa neutron-besugárzás után. A piros kockák az érvényes mérési pontok, a kék háromszögek a cenzorált mérési pontok.

Figure 4. Master Curve testing of EUROFER 97 after 0.3 dpa neutron irradiation at 260°C. Multitemperature method is used. The red quadrangles are the valid results; the blue triangles are censored points

Irodalom:

- [1]. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPP-s "VERLIFE"
- [2]. PNAE G-7-002-86: Нормы расчета и прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, 1990, Energoatomizdat, Moszkva;
- [3]. Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants. International Atomic Energy Technical Report Series no. 429 Vienna 2005
- [4]. ASTM-1921-09. Test Method for Determination of Reference Temperature, To for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM 2009
- [5]. D.E. Mc. Cabe, J. G. Merkle, K. Wallin: An Introduction to the Development and Use of the Master Curve Method. ASTM, 2005 May
- [6]. Matti Valo, Kim Wallin, Enrico Lucon, Milos Kytka, Milan Brumovsky, Beatriz Acosta, Luigi Debarberis, Jyrki Kohopää, Ferenc Gillemot and Marta Horvath The Euratom 5th Framework Programme Project FRAME (fracture mechanics based embrittlement); description of the project and first results; Nuclear Engineering and Design, Volume 235, Issues 2-4, February 2005, Pages 445-455;
- [7]. F. Gillemot, M. Horváth, L. Tatár, G. Uri: Mastercurve Application For Euroferr TW5-TTMS-005 AEKI Progress report 2006