

Feszültségkorróziós repedés vizsgálata egyedi próbatesttel

Investigation of stress corrosion cracking with unique specimen geometry

Bernadett Spisák^a, Szabolcs Szávai^b, Gál Alexandra^c

^{a, b, c} Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

^atudományos munkatárs, bernadett.spisak@bayzoltan.hu, ^bosztályvezető, szabolcs.szavai@bayzoltan.hu, ^cjunior kutató, alexandra.gal@bayzoltan.hu

^a PhD hallgató, Miskolci Egyetem

Kulcsszavak

feszültségkorróziós repedés,
 mérés előkészítés,
 végelem szimuláció,
 módosított CT próbatest,
 próbatest tervezés

Keywords

stress corrosion cracking,
 preparation of experiment,
 finite element simulation,
 modified CT specimen,
 specimen designing

Absztrakt

A cikkben feszültségkorróziós repedés vizsgálat előkészítése kerül bemutatásra. A vizsgált anyag a VVER-440 reaktor primer körében található 08H18N10T ausztenites korrózióálló acél. A vizsgáló berendezés korlátozott kapacitása miatt egy új típusú próbatest került kialakításra, amelynek során szimulációk segítségével kerültek meghatározásra a próbatest főbb méretei, illetve az előfeszítéshez szükséges paraméterek.

Abstract

In this article the preparation of a stress corrosion crack test is presented. The material under investigation is the 08H18N10T austenitic corrosion resistant steel which is located in the primary loop of the VVER-440 reactors. Due to the limited capacity of the test equipment, a new type of test specimen was developed, and simulations were used to determine the main dimensions of the specimen and the parameters required for the prestressing.

1. Bevezetés

A feszültségkorróziós repedés számos iparágban jelen lévő probléma. Ide sorolható a repülőgép-, a gáz- és olaj-, a hajó-, illetve a nukleáris ipar. Ezek közül az egyik legjobban kutatott terület az ilyen típusú repedések nukleáris iparban történő megjelenése. A feszültségkorróziós repedés jellemzően hosszú lappangási idővel rendelkezik, majd a terjedési szakaszba érve hirtelen a szerkezet tönkremenetelét okozhatja. Emellett keletkezéséhez három feltétel együttes jelenlétére van szükség, mégpedig a megfelelő környezetre, mechanikai terhelésre, illetve az anyag feszültségkorróziós repedésre való érzékenységre. Itt szükséges megemlíteni, hogy egy feszültségkorróziós repedésre érzékeny anyagban nem minden környezetben fog megindulni a repedés, emiatt vizsgálatuk bonyolult és időigényes, ezáltal egy olyan modell kialakítása szükséges, amellyel előre jelezhető a feszültségkorróziós repedés növekedési sebessége. Az általunk vizsgált anyag a VVER-440-es típusú atomerőművek primer körében található. Annak érdekében, hogy a da/dt-K diagram meghatározható legyen az adott anyagminőségekre, a Paksi Atomerőműben alkalmazott közege (bóros-víz) üzemi hőmérsékleten (297 °C) és nyomáson (123 bar) feszültségkorróziós vizsgálatok elvégzésére van szükség.

2. Feszültségkorróziós repedés vizsgálati módszerei

Számos vizsgálati módszer létezik egy ötvözet feszültségkorrózióra való érzékenységének meghatározására. Ha a cél az, hogy egy adott környezetben az üzemi viselkedést megjósoljuk vagy a működésben lévő ötvözeteket megfigyeljük, akkor gyakran a feszültségkorróziós repedésről rövid időn belül kell információkat gyűjteni. Ehhez gyorsított vizsgálatokra van szükség, amelyet elérhetünk a környezeti hatás vagy a kritikus vizsgálati paraméterek növelésével. A vizsgálatot a korrozív

próbatetek hőmérsékletének vagy koncentrációjának növelésével, valamint elektrokémiai stimulálással lehet felgyorsítani. A vizsgálati idő lecsökkentését előidéző paraméterek közé sorolhatók a nagyobb terhelések, folyamatos alakváltozás illetve az előrepezttés, amely lehetővé teszi a feszültségkorróziós repedésnél lévő repedés-nukleációs szakasz kikerülését.

A próbatetek esetében két csoport különíthető el egymástól, ezek a sima és az előrepezttett próbatetek. További megkülönböztetések tehetők a terhelési módok között, mint például állandó lehajlás, állandó terhelés, állandó elmozdulás vagy alakváltozási sebesség. A próbatetek kialakításának és a terhelési módnak a kiválasztásához először szükséges a vizsgálat céljának és a kívánt információ típusának a definiálása. Ez alapján négy alapvető feszültségkorróziós vizsgálat különböztethető meg:

1. Sima próbatetek – statikus terhelésű vizsgálatok,
2. Sima próbatetek – dinamikus (monoton növekvő) terhelésű vizsgálatok,
3. Előrepezttett próbatetek – statikus terhelésű vizsgálatok,
4. Előrepezttett próbatetek – dinamikus (monoton növekvő) terhelésű vizsgálatok.

A vizsgálatok során előrepezttett próbateteket alkalmaztunk. Az ilyen típusú próbatetek esetében a vizsgálat során figyelembe vesszük, hogy a szerkezetben már jelen van valamilyen kezdeti hiba. A törésmechanika az ezekből a hibákból keletkező és tovább növekedő repedések karakterizálására használható fel. A vizsgáló személynek figyelembe kell vennie a méreti elvárásokat, a repedés konfigurációját és orientációját, és a próbatest megmunkálását, illetve előrepezttését. Minden előrepezttett próbatest esetében alapkövetelmény, hogy a próbatest méretei elegendően nagyok legyenek ahhoz, hogy a túlnyomórészt triaxiális feszültség biztosítható legyen úgy, hogy képlékeny deformáció csak nagyon kis régióban, a repedéscsúcs környezetében lépjen fel. A fáradásos

előrepeztes az ASTM E 399 [1] szabványban előírtakkal végezhető el. Az egyes előrepeztesztett próbatesteknél használt feszültségintenzitási tényező értéke nem haladhatja meg a környezeti hatáznál tervezett kezdeti K értéknek a kétharmadát. Ezzel megelőzhető a repedéscsúcsban a fáradásos károsodás és a maradó nyomófeszültség kialakulása, amely befolyással lehet a feszültségkorróziós repedés viselkedésére.

A vizsgálatok elvégzését állandó terheléssel terveztük. Az ilyen típusú tesztek legfontosabb tulajdonsága, hogy a vizsgálat teljes időtartama alatt a terhelés állandó értéken van tartva. Konstans terhelés esetén a próbatestek általában húzó irányú terhelésnek vannak kitéve. Általánosságban két típusát különböztethetjük meg: próbatestek egy önterhelésű keretben való terhelése és próbatestek egy külső terhelő kerettel való terhelése. Az önterhelésű keret előnye az alacsonyabb költség és a kisebb helyigény. Ez különösen fontos környezeti kamrákban és autoklávokban elvégzett vizsgálatok esetén. Hátránya, hogy gyakran a próbatestre a környezeti hatás előtt helyezik rá a terhelést. Az előterhelés nem konzervatív eredményekhez vezethet. A külső terhelésű keretes vizsgálatok esetén súlyokat vagy rugókat alkalmaznak. A terhelési keretek száma minimalizálható, ha próbatest sorozatokat vizsgálunk.

Az előrepeztesztett próbatesteken végzett állandó terheléses vizsgálatok felhasználhatók a K_{ISCC} meghatározására és adott határokon belül a repedésnövekedés sebességének (da/dt) a mérésére. A leggyakrabban alkalmazott próbatestek a kompakt próbatestek (CT) és a bemetszett hajlított próbatestek (SEB) [2].

Az 1. ábra a húzófeszültség változását mutatja be az idő függvényében. Az ábrán szereplő σ_M a repedés csúcsánál lévő maximális feszültséget, a σ_N az átlagfeszültséget és a σ_G pedig az alkalmazott feszültség nagyságát mutatja. Az ábrából leolvasható, hogy az állandó

terheléses vizsgálat esetén a terhelés értéke nem változik, így a maximális, illetve az átlagos feszültség értéke is folyamatosan növekszik.

3. Vizsgált anyagok

Ahogy már korábban említésre került a VVER-440 reaktor primer körben található 08H18N10T ausztenites korrózióálló acél esetén készítettük el a kísérleti vizsgálatok előkészületeit. Az anyagra vonatkozó fontosabb paramétereket a 1-2. táblázatok foglalják magukba.

1. táblázat: A 08H18N10T acél vegyi összetétele PNAE alapján

Anyag-minőség	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	Cu [%]	Ti [%]
08H18N10T	max 0,08	max 2	max 0,8	max 0,035	max 0,02	17-19	9-11	max 0,5	max 0,1	max 0,3	max 0,7

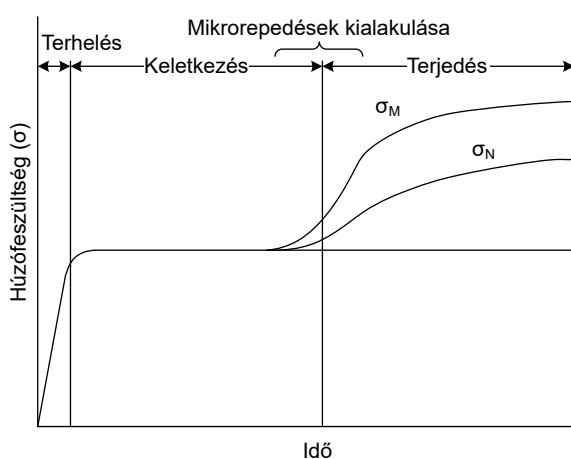
2. táblázat: 08H18N10T ausztenites korrózióálló acél szilárdsági tulajdonságai PNAE [5] alapján

Jellemző	Hőmérséklet, °C							
	20	50	100	150	200	250	300	350
Szakító szilárdság [MPa]	491	477	456	426	417	382	358	333
Folyáshatár [MPa]	196	193	186	181	176	167	162	157
Relatív nyúlás [%]	35	34	33	31	29	27	28	25
Kontrakció [%]	40	40	40	40	40	40	40	40
Hőtágulási együttható $\cdot 10^6$ [1/°C]	-	16,4	16,6	16,8	17,0	17,2	17,4	17,6
Rugalmassági együttható [GPa]	205	202	200	195	190	185	180	175

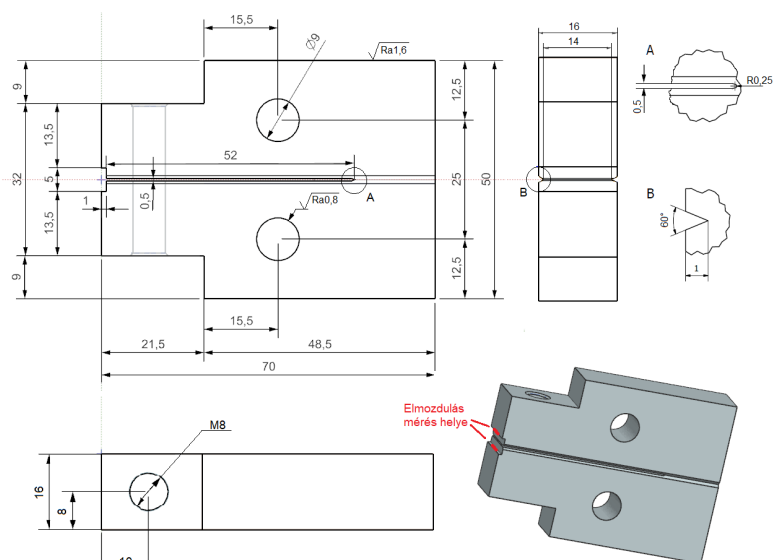
4. Vizsgálati próbatest geometriája

A vizsgálatokat egy partner által készített autokláv berendezésben terveztük elvégezni. Számos irodalom áttekintése alapján megállapítható, hogy a feszültségkorróziós repedés vizsgálatához 15 és 123 MPa \sqrt{m} közötti feszültségintenzitási tényezőt alkalmaznak. Azonban ezek közül a leggyakrabban ennek értéke 20 és 40 közé esett [3, 4].

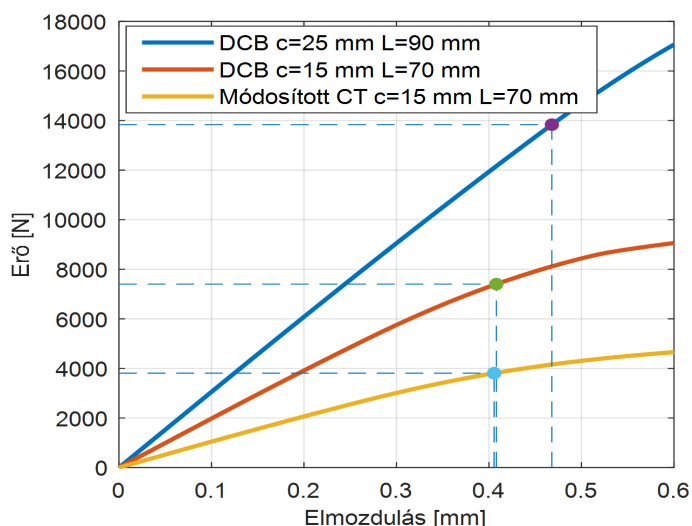
A berendezés, illetve a rendelkezésre álló alapanyag tömb méretkorlátja miatt hagyományos CT próbatesteken



1. ábra: Húzófeszültség változása az idő függvényében állandó terhelés esetén



2. ábra: Vizsgálati próbatest geometriája



3. ábra: DCB és módosított CT próbatetek erő-elmozdulás görbéje

nem volt kivitelezhető a mérés, ezáltal először DCB próbatest alkalmazását terveztük. A hosszú ($L=90$ mm) DCB próbatetek esetében a kívánt maximális feszültségintenzitási tényező ($K=35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) eléréséhez szükséges erő mértéke (~ 14000 N) meghaladta az általunk létrehozható erő maximális értékét (6000 N), ezáltal a csökkentettük a próbatest hosszát (2. ábra). További problémát jelentett az előfeszítéshez a csavarok elhelyezése. Mivel a mérőberendezés belső átmérője adott volt, ezáltal a próbatest előfeszítésének a módját módosítottuk. Ennek hatására a 2. ábra által bemutatott „hibrid” próbatestet alakítottuk ki, amelyben kombináltuk a DCB, illetve a CT próbatesteket. A próbatest összhossza 70 mm, magassága 50 mm, szélessége pedig 16 mm. Látható, hogy a próbatest a CT befogócsapja tartalmaz egy furatot, amely segítségével az előrepeztesztés elvégezhető, illetve az előfeszítés elkészítéséhez a próbatest bal oldalán egy furat lett kialakítva, ahol az előfeszítést süllyesztett fészekben belső kulcsnyílású csavarral végeztük el. Az ehhez a próbatesthez elkészített szimulációból származó erő-elmozdulás görbe is feltüntette

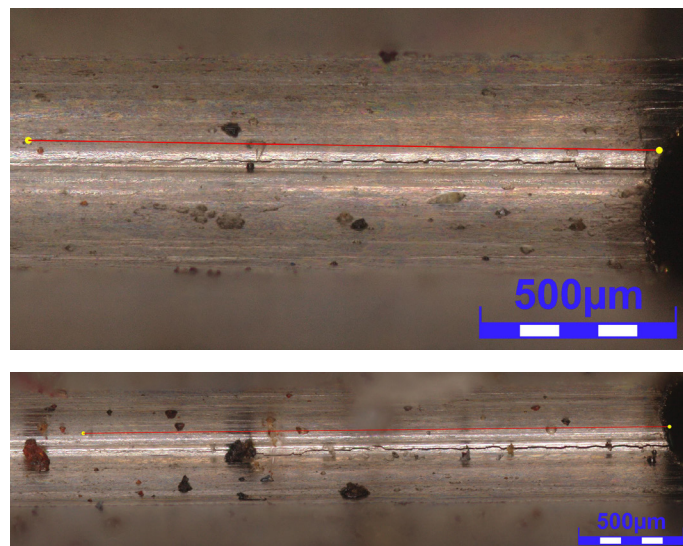
tesre került a 3. ábrán. Látható, hogy a kikönnyítés hatására az előfeszítésénél szükséges erő mindössze 3800 N.

5. Vizsgálat előkészítése

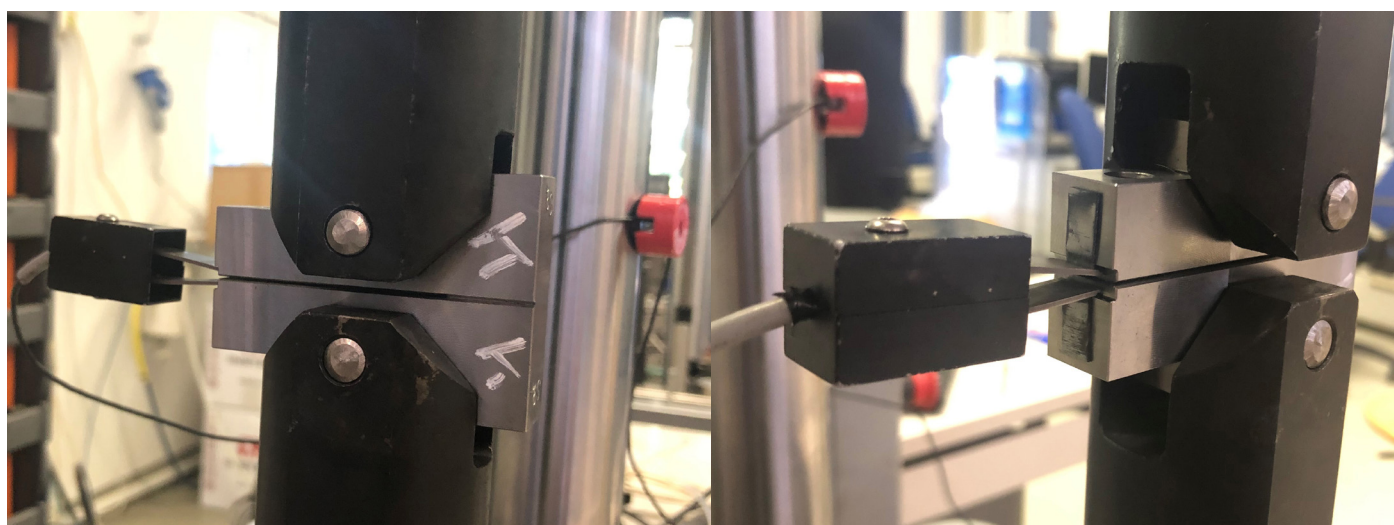
5.1 Előrepeztesztés

Az előrepeztesztéseket az Instron E10000 berendezésen végeztük el. A tervezett előrepeztesztett repedésméret: $2-3$ mm volt. A repedéshossz mérés a compliance módszerrel történt az előrepeztesztés közben, on-line. Előrepeztesztést szinuszos függvényvel, erővezérléssel végeztük, az aszimmetria tényező értéke $R=0,1$. Magát az előrepeztesztés folyamatát a 4. ábra szemlélteti.

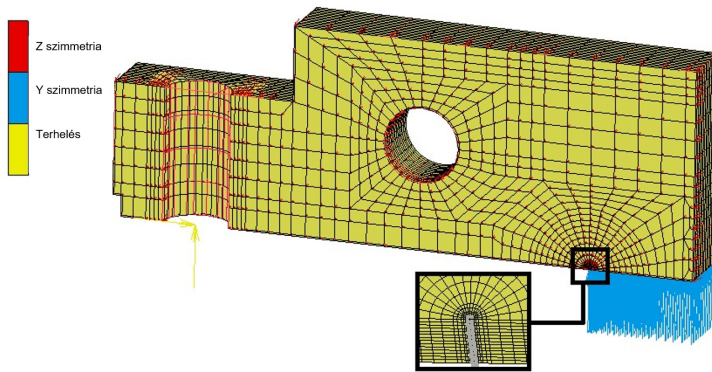
Előrepeztesztés után mértük a számításokhoz szükséges geometriai paramétereket (terhelési vonal távolsága a próbatest felületétől, repedés hossza a terhelési vonaltól, próbatest vastagsága és szélessége). A számításokhoz szükséges értékek a két oldalon mért értékek átlaga. Az 5. ábra az előrepeztesztés során az R8-as próbatestben keletkezett repedést szemlélteti $500 \mu\text{m}$ -es nagyításban.



5. ábra: R8-as próbatestben kialakított repedés az előrepeztesztést követően



4. ábra: Előrepeztesztés



6. ábra: Végeselem háló felépítése és alkalmazott peremfeltételek

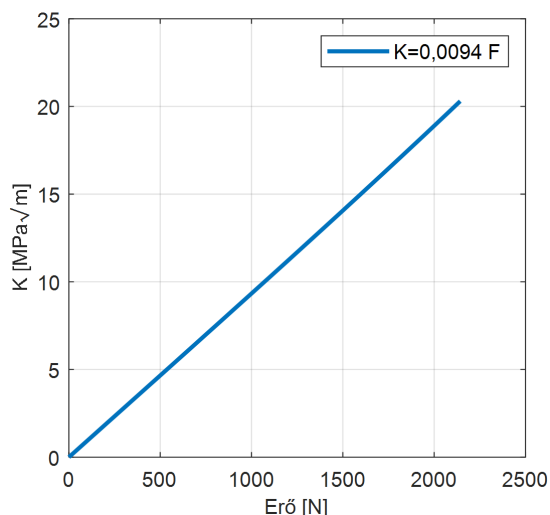
5.2 Előfeszítés

A próbatestek előfeszítését M8-as csavarokkal valósítottuk meg, amelynek során a következőkben felsoroltakat kell figyelembe venni:

- A meghúzást olyan mértékig kell elvégezni, hogy a megkívánt CMOD-t lehessen mérni (extensométerrel).
- A meghúzó csavarok végét gömbölyíteni kell, annak érdekében, hogy a terhelés egy ponton, a furat közep-vonalában keletkezzen.
- A próbatestek előfeszítését úgy kell megvalósítani, hogy különböző mértékű feszültségintenzitási tényező (KI) ébredjen a repedések csúcásában. Ennek javasolt tartománya $15\text{--}40\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Az előreperesztés során 4 terhelési szintet alkalmaztunk ($15, 20, 30, 35\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) anyagminőségenként és terhelési szintenként 3 próbatestet használtunk. Ahhoz, hogy az előfeszítést pontosan be tudjuk állítani, végeselem szimulációk készítésére volt szükség a különböző repedésméretnél, amelyből meghatározható az adott feszültségintenzitási tényező eléréséhez szükséges erő nagysága. A végeselem hálót és az alkalmazott peremfeltételeket a 6. ábra szemlélteti.

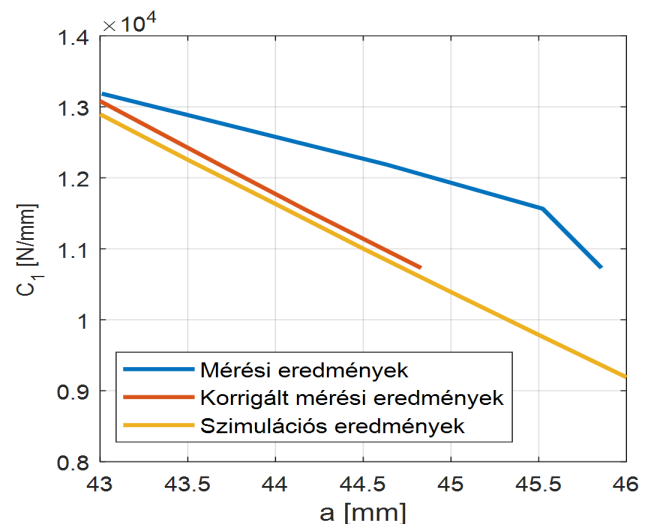
A szimulációhoz negyed modellt készítettünk. Az ábrából látható, hogy a próbatest egy merev test segítségével lett megterhelve, amely jól közelíti a valós előfeszítési eljárást. A K_I feszültségintenzitási tényező meghatározásához



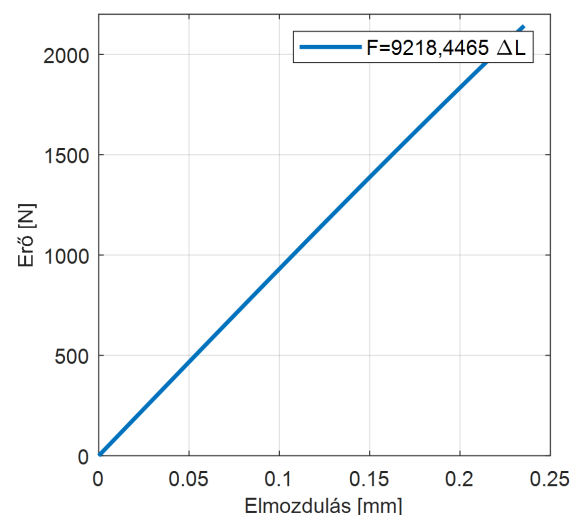
7. ábra: Erő-feszültségintenzitási tényező (bal), erő-elmozdulás (jobb) diagram $a=46\text{ mm}$ esetében menetes próbamérésnél

szükség volt a J integrál számítására. Ezt az ábrán jelölt pontokban valósítottuk meg. Majd ezek átlagát véve meghatároztuk a különböző időpillanatokban vett elmozdulás-K diagramot.

Annak érdekében, hogy a szimuláció ellenőrizhető legyen próbaméréseket készítettünk, amelynél a terhelést nem csavarokkal, hanem egy menetes szár segítségével végeztük el. Ez az eredeti modellkialakítást annyiban módosította, hogy a terhelést függőleges irányban mintegy 75 mm -rel felfelé eltoltuk. Az így kapott görbéket mutatja a 7. ábra. Ezekből meghatározható volt egy A és egy C1 konstans érték, amelyeket a görbékre illesztett lineáris egyenesek meredekségei adtak. Ezt követően a 8. ábrán összevetettük a mért és a szimulált eredményeket, amely során egy közel 10% -os eltérést tapasztaltunk. Ez egy ilyen típusú szimuláció során túl magas érték, ezért a mérést egy olyan próbatesten is elvégeztük, amelynél még az előreperesztés nem volt elvégezve. Ennek során az eltérés a mérés és a végeselem szimuláció között kisebb volt, mint $1,5\%$ ($C_{1\text{VEM}}=12896$, $C_{1\text{mért}}=13186$). Ebből az a következtetés vonható le, hogy a repedés alakja konkáv.



8. ábra: Eltérés a mért és szimulált értékek között



Így a számításból visszavezetve megállapítható, hogy a vizsgált előrepesztések hossza kb. 1mm-rel kisebb egyenes repedéssel korrelál.

Így a szimulációban meghatározott adatok segítségével már elvégezhető volt az előfeszítés. Az ehhez kapcsolódó fontosabb adatok a 3. és a 4. táblázatban kerültek felsorolásra.

3. táblázat: Szimulációs eredmények

c [mm]	a [mm]	A	C1
17	43	0,007	12928
16,5	43,5	0,0073	12283,3
16	44	0,00765	11658
15,5	44,5	0,00804	11029,89
15	45	0,0084	10369
14,5	45,5	0,0089	9813,89
14	46	0,0094	9218,44
13,5	46,5	0,00994	8636,4
13	47	0,01054	8065,92
12,5	47,5	0,0112	7482,85
12	48	0,01193	6935,579

4. táblázat: Ausztenites acélból készült próbatetest előfeszítéséből származó adatok

Azonosító	K [MPa√m]	A	P [N]	C1	ΔL [mm]
R1	15	0,009647	1554,927	9181,26	0,169
R2	15	0,009452	1586,993	9395,921	0,169
R3	15	0,007883	1902,864	11512,38	0,165
R4	20	0,008281	2415,182	10885,28	0,222
R5	20	0,008975	2228,482	9955,486	0,224
R6	20	0,008792	2274,725	10184,62	0,223
R7	30	0,008589	3492,818	10451,74	0,334
R8	30	0,008723	3439,27	10274,46	0,335
R9	30	0,009564	3136,641	9271,104	0,338
R10	35	0,008194	4271,606	11015,52	0,388
R11	35	0,008249	4242,774	10932,05	0,388
R12	35	0,008605	4067,208	10429,73	0,390

6. Vizsgálat leírása és eredményei

6.1 Ausztenites próbatestek vizsgálati terve

Az ausztenites acélból készült próbatestekre vonatkozó vizsgálati terv a következő volt:

- Vizsgálat körülménye: primer körülmények
- Vizsgált anyagminőség: 1.4541 ausztenites acél
- Vizsgálati idő:
 - 30 nap
 - 15. nap letelte után 3 nap leállás tervezve, amikor az egyik kapszula kibontásra kerül és megvizsgáljuk a próbatesteket
- Vizsgálati körülmények:
 - Nyomás: 123 bar
 - Hőmérséklet: 297 °C



9. ábra: A mérőberendezés felépítése
bal: szigetelés nélkül, jobb: első réteg szigeteléssel

- Próbatestek elhelyezése a kapszulákban:
 - 1. kapszula: R1, R4, R7, R10
 - 2. kapszula: R2, R6, R9, R11
 - 3. kapszula: R3, R5, R8, R12

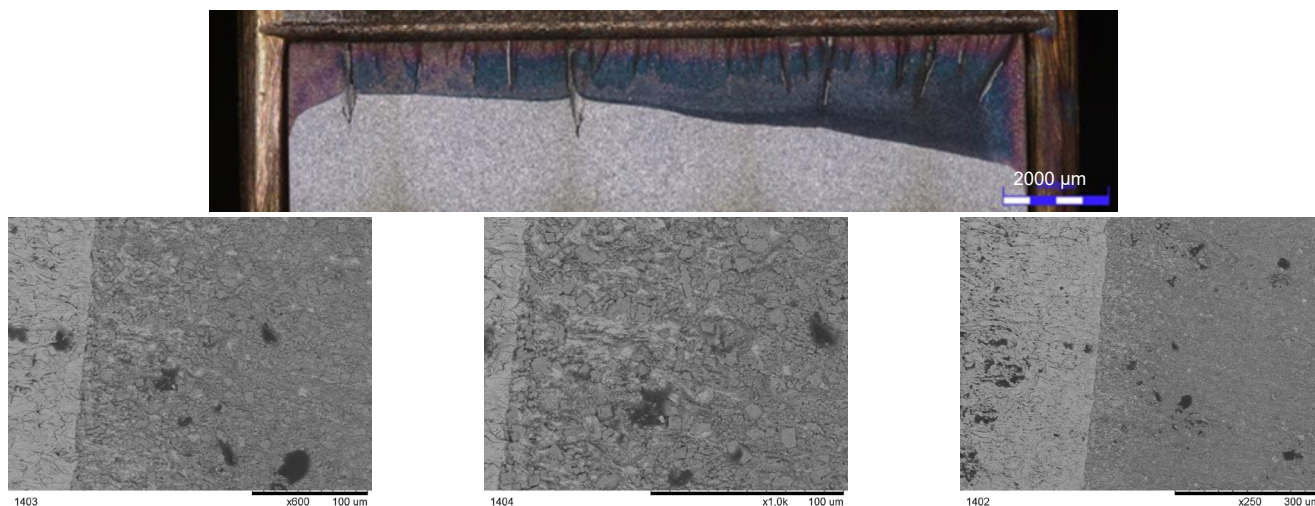
A 9. ábra szemlélteti a vizsgálat mérőberendezését, amelybe már behelyezésre került a három kapszula. A kapszulák tetején biztonsági szerelvény, illetve hőmérsékletmérők vannak elhelyezve. A megfelelő hőn tartás elérése érdekében a kapszulák felső eleme, illetve a kemence is több szigetelő réteggel lett ellátva.

6.2 Eredmények

Jelenleg a kapszulákba helyezett próbatestek közül minden terhelési szintből egy, ezáltal összesen 4 db kiértékelésre került sor. A vizsgálati tervnek megfelelően az ausztenites minták esetében 15 nap letelte után közbe iktattunk egy időközi vizsgálatot, mely során minden terhelési szintről 1-1 darab mintát kiválasztottunk és mikroszkóppal megvizsgáltuk, hogy a darab oldalán kialakított vajatban tapasztalható-e repedésnövekedés. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy 15 nap elteltével nem keletkezett mérhető repedésnövekedés, így a próbatestek visszakérültek további 15 napra a vizsgálóberendezésbe.

A tervezett teljes, 30 napos vizsgálati idő letelte után ismét kivettük a próbatesteket a berendezésből, és a korábban már vizsgált 4 próbatetest töretfelületét tártuk fel, hogy teljes keresztmetszetben vizsgálni tudjuk az esetleges repedés előrehaladást. Az R5-ös próbatest töretfelületéről készült felvételeket a 10. ábra szemlélteti.

A próbatesten az elszíneződött rész az előrepesztett területet jelöli. Mind a négy mintán megfigyelhető, hogy a repedés vonala aszimmetrikus, ami azzal hozható összefüggésbe, hogy előrepesztés során nem volt egytengelyű a terhelés. A repedéshosszakat a megfelelő szabványok szerint 9 pontban lemértük mérőmikroszkóppal, az eredményt az 5. táblázat tartalmazza.



10. ábra: 20 MPa \sqrt{m} -rel előfeszített R5-ös próbatetest töretfelülete

5. táblázat: R5 próbatetest repedéshossz méretei

R5 próbatetest	Mérési pontok								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Repedéshossz a bemetszés végétől (mm)	1,456	1,086	1,157	1,179	1,386	1,687	1,834	2,162	2,572
Repedéshossz a terhelés vonalától (mm)	44,435	44,07	44,136	44,158	44,365	44,666	44,813	45,141	45,551

A minták töretfelületének pontosabb megismerése érdekében sztereomikroszkópos, optodigitális mikroszkópos és pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatokat végeztünk, azonban ezeken sem volt található feszültségkorróziós repedésre utaló jel. A vizsgálatokat követően arra a megállapításra jutottunk, hogy a töretfelületen nem találhatóak feszültségkorróziós repedésterjedésre utaló nyomok.

7. Összefoglalás

Az előzőekben feszültségkorróziós méréshez készített egyedi próbatestek vizsgálati előkészítése került bemutatásra, melynek során a legnagyobb problémát a vizsgálóberendezés befogadóképességének véges kapacitása jelentette. A henger alakú kapszulák belső átmérője 60 mm, ezért a hagyományos CT próbatestek nem voltak betehetők. Ezáltal egy módosított CT próbatestet hoztunk létre, amely behelyezhető volt a mérőberendezésbe, és az előfeszítés során az anyag alakváltozása a rugalmas tartományban mozgott. Ennek során számos szimulációt készítettünk el az előfeszítési körülmények pontos meghatározásához. Az ausztenites acélból készült próbatestek 1 hónapon keresztül voltak benne a berendezésben. A kutatás során három kapszulában helyeztük el a 12 db próbatestet, így a mérés felénél egy kapszulából a minták időközi megvizsgálását végeztük el, annak érdekében, hogy több adatunk legyen a repedésterjedés időbeni változásáról, azonban ennek során a próbatestek két oldalán repedésterjedésre utaló jelek nem voltak tapasztalhatók.

A vizsgálat elvégzését követően sem voltak a próbatesteken repedésterjedésre utaló jelek. Azonban azt fontos megemlíteni, hogy a primer körüli körülmények esetén a víz kémiaja mellett a sugárzásból származó terhelések figyelembe vétele is ajánlott, amely azonban további vizsgálatokat igényel.

Köszönetnyilvánítás:

A kutatás az Alkalmazás orientált anyag-, technológia-, elméleti és vizsgálati módszerek fejlesztése - a tudásintenzív hazai ipar fejlődésének szolgálatában című és TKP-7-1/PALY-2020 számú projekt támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] ASTM E399-20a: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
- [2] Dietzel, W., Bala Srinivasan, P., Atrens, A.: Stress Corrosion Cracking Theory and Practice, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2011. pp. 133-166 <https://doi.org/10.1533/9780857093769.2.133>.
- [3] Jenks, A. R., White, G. A., Crooker, P.: Scoring Process for Evaluating Laboratory PWSCC Crack Growth Rate Data of Thick-Wall Alloy 690 Wrought Material and Alloy 52, 152, and Variant Weld Material, Jackson J., Paraventi D., Wright M. (eds) Proceedings of the International Conference on 18th Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04639-2_1
- [4] Andresen, P.L., Morra, M.M., Ahluwalia, K.: SCC of Alloy 690 and its Weld Metals, Busby J.T., Ilevbare G., Andresen P.L. (eds) Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48760-1_11
- [5] PNAE G-7-002-86: Нормы расчета иа прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, 1990.