

A Zr-1%Nb ötvözet magas hőmérsékletű oxidációjának modellezése anyagvizsgálati módszerek alapján

Barsy Eszter^a, Hózer Zoltán^b

^aEnergiatudományi Kutatóközpont, tudományos segédmunkatárs, barsy.eszter@ek-cer.hu

^bEnergiatudományi Kutatóközpont, laborvezető, hozzer.zoltan@ek-cer.hu

Absztrakt

A Paksi Atomerőműben jelenleg használt fűtőelem burkolat Zr-1%Nb ötvözetből készült, melynek egy újabb változatát tervezi bevezetni a gyártó. Az Energiatudományi Kutatóközpontban az elmúlt években számos kísérletet végeztünk az új ötvözet vizsgálatára. A kísérleti eredményeket felhasználva készítettünk egy programot, ami azt számolja, hogy tervezési üzemzavar esetén lejátszódó folyamatok során hogyan viselkedik ez a burkolat.

Kulcsszavak

Burkolat, cirkónium, E110G, oxidáció, LOCA

1. Bevezetés

A Paksi Atomerőműben a fűtőelem pálca jelenleg használt burkolata E110 jelű cirkónium ötvözetből készül, ami normál üzemi körülmények között nagyon jól ellenáll a korróziónak. A burkolat gyártója új ötvözetet vezet be, amelyre az E110G elnevezést használjuk. Ennek normál üzemi korróziós tulajdonságai lényegében megegyeznek az E110-zel, magas hőmérsékletű vízgőzben mért oxidációs kinetikája azonban kedvezőbb.

Az Energiatudományi Kutatóközpontban az elmúlt években számos kísérletet végeztünk az új ötvözet vizsgálatára. Többek között magas hőmérsékletű vízgőzös oxidációnak is alávetettük az E110G-t, hogy vizsgálhassuk a hűtőközegvesztéses üzemzavar (LOCA) hatását a burkolatra. LOCA során a fűtőelem szárazra kerül, magas hőmérsékleten és növekvő belső nyomáson felfűvódhat és felhasadhat a legmelegebb szakaszon. A cirkónium mindeközben reagál a magas hőmérsékletű vízgőzzel, cirkónium-dioxid és hidrogén keletkezik.

Jelen kutatásunkban azt vizsgáljuk, hogy a LOCA során lokálisan felfűvódott és felhasadt fűtőelem-burkolat inhomogén oxidációja és tulajdonságainak ebből származó megváltozása hogyan viszonyul ahhoz, ami a LOCA-ra vonatkozó biztonsági előírások teljesülésénél alkalmazott „egyenletes felfűvódás” feltételezéséből következne. Ezt oly

módon tettük, hogy készítettünk egy szimulációt, ami kiszámolja, hogy a felhasadás után hogyan jut be a vízgőz a burkolat alá, és a nem egyenletesen felfűvódott és felhasadt burkolat hogyan oxidálódik (mindkét oldalán), valamint ez hogyan befolyásolja a teherbíró képességét. Az eredményeket összevetettük kísérleti adatokkal és a számításokban feltételezett egyenletes felfűvódásra vonatkozó eredményekkel, amikre a kritériumok vonatkoznak.

2. Elméleti háttér

2.1 A burkolat oxidációja

A vízhűtésű atomerőművekben normál üzemelés során a burkolatok kis mértékben oxidálódnak. A VVER típusú atomerőművekben (például Pakson) a fűtőelem felületén az élettartama során mintegy 10 µm vastag oxidréteg keletkezik. Üzemzvari körülmények között azonban a fűtőelemek cirkónium burkolata magas hőmérsékletű vízgőzben oxidálódhat, ami több nagyságrenddel gyorsabb oxidációt jelenthet. A fém szilárdsága és képlékenysége az oxidáció előrehaladtával csökken a fém mennyiségének csökkenése és a kémiai változások miatt.

A hűtőközegvesztés (pl. primer köri csőtörés) okozta üzemzavar (LOCA) az egyik legfontosabb tervezési üzemzavar, így az elmúlt évtizedek során több nemzetközi kutatás vizsgálta a burkolatanyagok oxidációját vízgőzben. A cirkónium magas hőmérsékleten vízgőz jelenlétében képes oxidálódni, miközben hidrogént fejleszt.

A burkolat oxidációjának mértékét az ECR (Equivalent Cladding Reacted avagy Ekvivalens Elreagált Burkolat, a fém eredeti vastagságának eloxidálódott hányada) mennyiséggel jellemezzük, ami megadja, hogy a fém eredeti tömegének/vastagságának hány százaléka alakult át cirkónium-dioxiddá, azzal a feltételezéssel, hogy csak sztöchiometrikus oxid keletkezik. A kritikus oxidációfok, ami fölött a burkolat elridegedik, az oxidáló atmoszféra összetételén és az oxidáció időtartamán

kívül a hőmérséklettől és a burkolat hidrogénfelvételétől is függ [1].

A 800°C fölött kezdődő fázisátalakulás a fémekben jelentősen megváltoztathatja az oxidáció kinetikáját. Szobahőmérsékleten a cirkóniumban a sűrű illeszkedésű hexagonális α fázis dominál, az a stabilabb alacsony hőmérsékleten. Összetételtől függően általában 800°C fölött (tiszta cirkónium esetén 866°C-on, ötvözettől függően akár jóval ezalatt) megkezdődik a fém átrendeződése a tércentrált köbös β kristályrácsba. Ez az átrendeződés nem csökkenti ugyan az ötvözet képlékenységét, azonban a β fázis eltérően viselkedik az oxigénnel, a hidrogénnel és az ötvözőkkel, elsősorban a nióbiummal szemben.

A β fázisban (ami 900°C fölött stabilabb) az oxigén oldhatósága igen csekély, így amint az oldott oxigén mennyisége elérte a 0,7 tömeg%-os határt, megkezdődik az oxigén-stabilizált α fázisba való átalakulás, ami sokkal kisebb teherbíró képességgel rendelkezik. Az oxigén egyre beljebb diffundál a fémbe és feltölti azt. Először szuboxidok alakulnak ki, majd amint az oxigén aránya eléri a 30 tömeg%-ot, kialakul a ZrO_2 . Ennek köszönhetően háromrétgű szerkezet jön létre, a felületen az oxidréteg, a fém határfelület közelében szuboxidokkal, utána egy oxigén-stabilizált α cirkónium-fázis következik, belül pedig az alacsony oxigéntartalmú β fázisú fém marad.

2.2 Oxidációs kritérium

A 17 ECR%-os oxidációs kritériumot 1973-ban az amerikai Nuclear Regulatory Commission (US NRC) elődje fogalmazta meg [2]. A kritérium azt hivatott biztosítani, hogy egy LOCA végén a fűtőelemek gyors lehűtése (hirtelen vizes elárasztás, quench) során a burkolat még megőrizze szerkezeti integritását, vagyis a részben oxidálódott fűtőelem még képes ellenállni a gyors lehűtésekor fellépő hősokknak (ami főleg az oxidáció és a hidrogénfelvétel mértékétől függ), valamint a későbbi mozgás során se törjön szét, hűthető maradjon a geometria.

A kritérium alapjául szolgáló kísérletekhez burkolat gyűrűket oxidáltak vízgőzben, amit gyors vizes lehűtés követett. Az így előkészített gyűrűket 135°C-on gyűrűtörő vizsgálatnak vetették alá és meghatározták a képlékeny-rideg átmeneti tartományt. A képlékeny burkolatról kijelenthető, hogy nem tud olyan – a rideg állapotra jellemző – módon sérülni, ami a zónában hűthetőségi problémát okozna.

Ezért a rideg állapot elkerülését célozták az első kritériumok.

A gyűrűk metallográfiai vizsgálatai alapján sikerült azonosítani azokat a szerkezeti változásokat, amik az elridegedéshez vezettek. Az egyik ilyen paraméter például az oxidáció során képződött oxid- és α -réteg együttes, a burkolat eredeti vastagságához viszonyított relatív vastagsága volt, ami 0,44 fölött jelzett rideg állapotot.

A hatósági kritérium bevezetésének előkészítésekor kiderült, hogy az említett relatív rétegvastagságok előrejelzése meglehetősen bonyolult. Ezért egy olyan oxidációs állapot került a kritériumba, ami a 0,44 relatív oxid+ α rétegvastagságot konzervatívan lefedte. A számításhoz a Baker-Just oxidációs kinetikai korrelációt használták. A gyűrűtöréses vizsgálatok szerint a 17 ECR% oxidációfok alatti minták megfelelően képlékenyek maradtak.

Mivel a kísérleti eredményekben a konzervatív Baker-Just korrelációval számolt oxidációfok szerepelt, ezért a kritérium teljesítésének vizsgálatakor is ezzel a korrelációval kellett számolni. A kritérium megfogalmazásakor feltételezték, hogy a különböző cirkónium ötvözetek magas hőmérsékletű vízgőzös oxidációjának kinetikája nem tér el lényegesen egymástól, ami az akkori nyugati gyakorlatban szereplő ötvözetekre (Zircaloy-2 és Zircaloy-4) fennállt. Idővel ismertté vált, hogy a Baker-Just korreláció 900°C-nál magasabb hőmérsékleteken hajlamos jelentősen, akár 20-30%-kal is túlbecsülni az oxidáció mértékét. 1989-ben ezért a US NRC nagyobb mennyiségű ismeretanyag alapján a hatósági útmutatóban már elfogadta a Cathcart-Pawel best-estimate oxidációs modell alkalmazását 1040 °C fölötti hőmérsékletekre a tömegnövekedés számítására. Az így számolt oxidációfokra továbbra is a 17 ECR%-os korlát maradt érvényben, a korreláció alkalmazásának azonban az a feltétele, hogy kísérletekkel támasszák alá, hogy a burkolat valóban képlékeny marad a megfelelő oxidációfokig, valamint hogy a számítások bizonytalanságait is vegyék figyelembe a kritérium teljesítése szempontjából. Az amerikai oxidációs korlátot a legtöbb ország nukleáris hatósága kisebb módosításokkal átvette.

2.3 Magyar szabályozás

A Nukleáris Biztonsági Szabályzat harmadik köteté [3] tartalmazza a Magyarországon, tervezési üzemzavarok esetére érvényes oxidációs kritérium értékét:

„Az oxidáció mértéke – a teljes burkolatvastagság hányadában kifejezve – sehol sem haladhatja meg a 17%-ot. Oxidáció mértéke alatt a teljes rétegvastagságnak azt a hányadát értik, amely oxiddá alakulna át, ha az összes lokálisan elnyelődött oxigén ZrO_2 keletkezésére vezető reakcióban használná el. A teljes oxidáció meghatározásánál mind a külső, mind pedig a lehetséges belső oxidációt figyelembe veszik.”

A hazai szabályozás a kritérium számértékét tekintve követi az eredeti amerikai kritériumot, amely a burkolat eredeti geometriájára vonatkozott, azaz nem számol a felfúvódással. A magyar szabályozásban ugyanakkor nincs meghatározva, hogy az eredeti vagy a felfúvódott geometriára kell-e kiszámolni az ECR értékét. A Paksi Atomerőmű LOCA üzemzavaraira végzett biztonsági elemzésekben a számított ECR érték konzervatívan a burkolat aktuális, azaz esetleg felfúvódott méreteire (átmérő, falvastagság) vonatkozik.

Ha a hazai szabályozás figyelembe venné a felfúvódott geometriát, akkor a kritériumban is hangsúlyozni kellene, hogy az oxidáció mértékét a burkolat kerülete mentén átlagolt értékből kell meghatározni, hiszen a felhasadásnál a burkolat elvékonyodása olyan mértékű lehet, hogy vékony oxidréteg is nagymértékű lokális oxidációt eredményez.

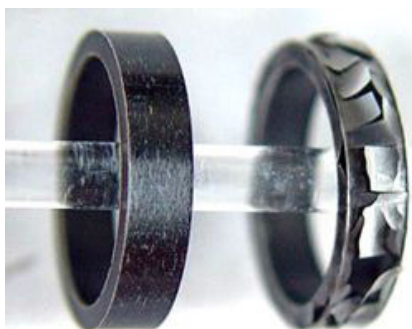
3. Vizsgálati eredmények

3.1 Az ötvözetek

Az új orosz E110G cirkónium burkolatanyag geometriai jellemzőit tekintve megegyezik az E110-zel, anyagi összetételét tekintve is hasonló (1. táblázat).

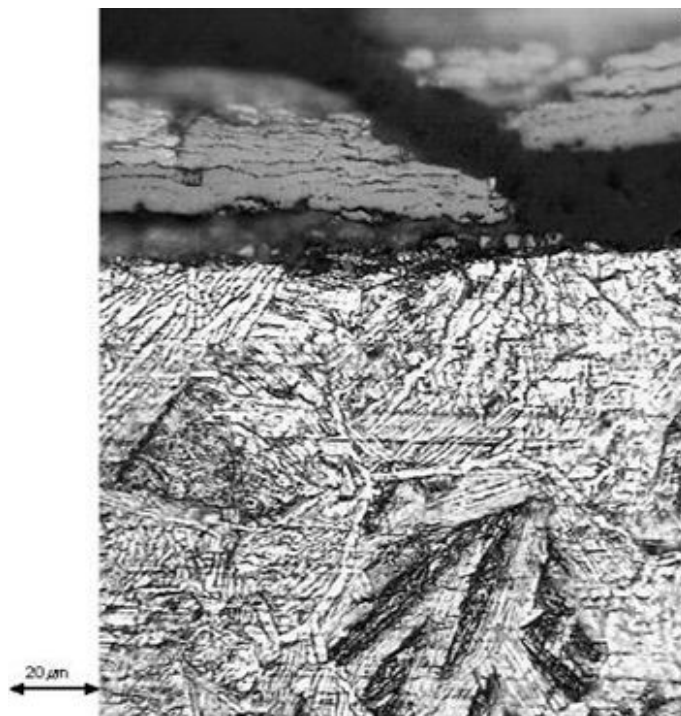
1. táblázat: A régi és az új burkolat összetétele (tömeg ppm)

	Nb	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Hf
E110G	10000	1,5	10	35	30	5	500	15	5	10
E110	10000	0,5	0,5	1	10	0,1	45	15	0,5	100



1. ábra: E110G (bal) és E110 (jobb) burkolatok azonos oxidációs körülmények után

Az Energiatudományi Kutatóközpontban számos oxidációs és felfúvódásos kísérletsorozatot végeztek mindkét burkolatanyaggal. Az eredmények azt mutatták, hogy eltér az oxidációs kinetikája az új E110G-nek, így új egyenletekre volt szükség az oxidréteg vastagság és oxigén tömegnövekedés számolásához [4]. Ugyanolyan körülmények között oxidálva 800°C fölött az új burkolaton kompakt, míg a régin leváló (ún. breakaway) oxidréteg látható (1-2. ábra).



2. ábra: Metallográfás felvétel a leváló oxidrétegről egy E110 minta felszínén

3.2 Szekunder hidridizációs kísérletek

Az inhomogén oxidációs jelenséget nagyon jól meg lehetett figyelni az ún. szekunder hidridizációs kísérleteinkben [5], ahol a pálcá felhasadása közben a burkolat elvékonyodott, majd vízgőzös elárasztáskor a külső és a belső felülete is oxidálódott a felhasadás környezetében (3. ábra).

A kísérletek első fázisában a 302 mm hosszúságú, Al_2O_3 tablettákkal feltöltött modellpalcát 800°C -on, illetve 750°C -on inert atmoszférában a csökemencében felfűtöttük, majd a pálcá belső nyomását – minden kísérlet során egységesen – 0,08 bar/s nyomásnövekedési sebességgel növeltük úgy, hogy mindenképp bekövetkezzen a felhasadás.

A kísérletek következő fázisában a mintadarab hőmérsékletét – néhányszor 10perc időtartam



3. ábra: E110G mintadarab a szekunder hidridizációs kísérlet után

alatt – az oxidáció hőmérsékletére (1000°C, 1150°C) növeltük. A hőmérsékleti egyensúly beállta után a mintadarabokat előre meghatározott időtartamig ezen hőmérsékleten vízgőzben oxidáltuk. Ekkor a minták teljes külső felületükön és a felhasadáshoz közeli belső oldalukon is oxidálódtak, valamint a keletkező hidrogén is reakcióba lépett a burkolattal (szekunder hidridizáció). Az oxidációs időket tág határok között – 120 és 3600 s között – változtattuk. A kemencében elhelyezkedő mintadarabot ezután argon gázáramban, illetve quench-eléssel hűtöttük le.

A felhasadt és oxidált mintadaraboknak (3. ábra) lemértük a geometriáját majd 4-pontos hajlítás során vizsgáltuk a teherbírásukat. Ezután következett a minták műgyantás kiöntése és axiális darabolása a további vizsgálatokhoz:

- metallográfiás felvételek alapján meghatároztuk a rétegvastagságokat (α , β , oxid),
- prompt gamma aktivációs analízissel és forró extrakciós eljárással megállapítható volt a cirkónium és a benne elnyelt hidrogén aránya,
- a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat (SEM-IXRF EDX) jó képet adott az oxigén radiális eloszlásáról.

3.3 Modellalkotás

Ahogy már említettük, LOCA során a hűtőközeg-vesztés miatt a pálca felmelegszik, a belső nyomása nagyobb lesz, mint a külső, ezért felfúvódik és kihalad. Mindeközben, a hűtőközezből származó vízgőz oxidálni kezdi a burkolatot.

A modellünk [6] abból az állapotból indul, ahol a pálca már felfúvódott és felhasadt, a külső és belső nyomás kiegyenlített. A kezdőpontunk az időben tehát az, amikor a burkolat geometria nem változik tovább, magas a hőmérséklet és az oxidáció éppen megkezdődik. A modellezett minta egy 1 cm-es szelete a felfúvódott pálcának, közvetlenül a felhasadás közepén.

A felhasadt burkolat felületén a vízgőzből oxigén és hidrogén lesz, amelyek aztán tovább reagálnak a fémmel. Ez a folyamat két szállra bontható, hiszen míg a burkolat külső felülete a kezdő időpontban

már oxidálódni kezd, addig a belső felületéhez be kell diffundálnia a vízgőznek a résen keresztül, ami egy késleltetést ad a belső oldali oxidációnak. A modell az elnyelt hidrogén hatásait nem tartalmazza.

Az oxigén az új kinetikával [4] leírva oxidálja a fémet, egyre beljebb diffundálva, miközben fázisátalakulást indukál a cirkóniumban: a növekedő oxigéntartalom miatt a β fázisból oxigén-stabilizált α fázis lesz (aminek sokkal kisebb a teherbíró képessége), majd az α -réteg telítődik és oxidréteggé válik. A fázishatárok (oxigén határkoncentrációk) és a diffúzió is hőmérsékletfüggő, illetve a diffúzió sebessége az adott fázistól is függ. Az idő előrehaladtával kialakul egy jellegzetes radiális oxigénkoncentrácioprofil [7, 8].

Ez az oxigénprofil azimutálisan (a kerület mentén) más és más, mivel a felfúvódás inhomogén, nem egyforma a burkolat felhasadás utáni falvastagsága, ezért az oxidáció sem lesz egyenletes.

A modellünkben kétféle diffúziót is számolunk (vízgőz és oxigén), amik különböznek sebességben és diffúziós hosszban is, ezért kétféle időlépést használtunk: a vízgőz diffúziója 0,003 másodperces lépésekben történt, míg az oxidáció és oxigén diffúzió 0,0003 másodpercesekben.

A fém oxidációja során még egy dolgot figyelembe kell venni, ami a Pilling-Bedworth szabály: a fénoxid térfogata nagyobb lesz, mint az eredeti féme, és az arányuk 1,51. Ezt a folyamatos térfogatváltozást a modellben leegyszerűsítettük, és az oxidáció során csak a fázishatár koncentrációkat szoroztuk meg vele, a rétegvastagságokat pedig csak a számolás legvégén.

A Fortran 95 nyelvben írt modell az alábbi értékeket számolja:

- a fém belső oldali oxidációjának időkésleltetése a gőz beáramlásának véges sebessége miatt,
- gőz koncentráció,
- radiális oxigén diffúzió,
- lokális ECR értékek,
- rétegvastagságok (α , β , oxid),
- teljes tömegnövekedés.

3.4 Modellszámítások

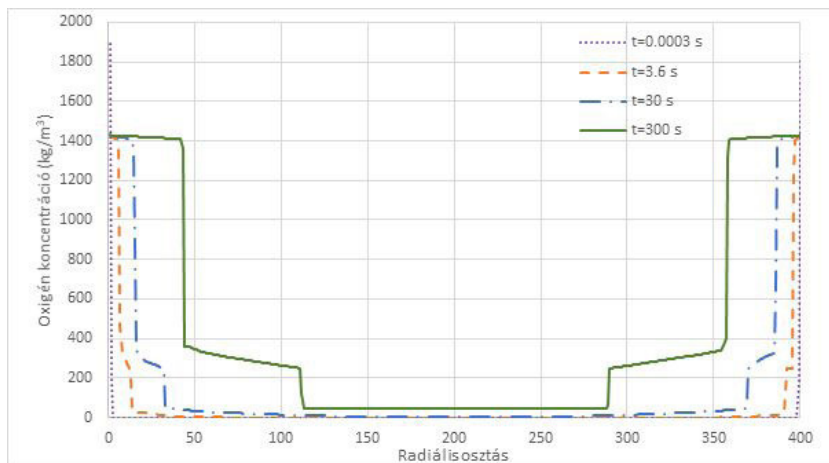
A számításokat hat különböző esetre végeztük el, amelyek különböző geometriai elrendezésekre, hőmérsékletekre és időtartamokra vonatkoztak. Az első számítás a felhasadás előtti, eredeti geometriával történt, négyet a szekunder hidridizációs kísérletek alapján készítettünk (ebből két esetben homogén felfúvódást feltételezve), az utolsó pedig egy fiktív erőművi esetet tartalmazott: a burkolat inhomogén oxidációja a Paksi Atomerőmű fűtőelemeiben olyan üzemzavarok során léphetne fel, amikor a burkolat felfúvódásakor az eredeti csőméret megváltozik, majd a felhasadást követően a fűtőelembe gőz jut be és a cirkónium burkolat mindkét felülete oxidálódik. Ilyen folyamat a tervezési üzemzavarok között nincs, a burkolat ugyanis még a legkedvezőtlenebb 200%-os hideg ági primer köri csőtörés során sem hasadhat fel. Ugyanakkor érdekes megvizsgálni, hogy egy ilyen üzemzavar alatt milyen mértékű lenne az oxidáció, ha bekövetkezne a felhasadás.

Az első esetben ellenőriztük, hogy megjelenik-e az eredményekben a jellegzetes radiális oxigén-eloszlás profil [8]. A 4. ábrán látható a profil időbeli fejlődése, vagyis ahogy az idő előrehaladtával az oxigén egyre beljebb jut a burkolatban, így kialakítva különböző szerkezeti rétegeket. A kapott értékek jól megfeleltethetők a kísérleti adatoknak (5. ábra).

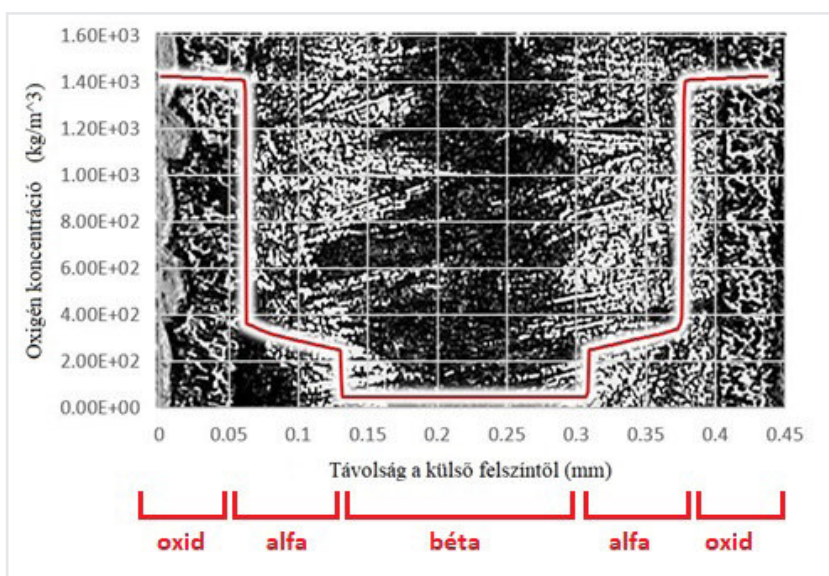
3.5 A modellezés eredményei

Számításaink célja az volt, hogy megvizsgáljuk a különböző kapott lokális és átlagos ECR értékeket, miként viszonyulnak egymáshoz és a 17 ECR%-os határhoz (6. ábra):

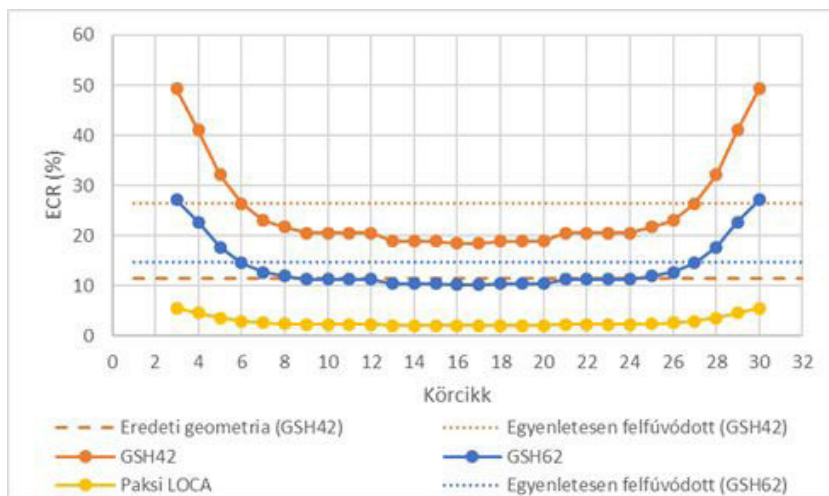
- az egyértelmű, hogy a felfúvódott burkolat nagyobb mértékben oxidálódik, mint a normál gyári geometriájú, hiszen nagyobb felületen oxidálódik,
- az inhomogén oxidációval kapcsolatban azt a következtetést vonhatjuk le, hogy több helyen is nagyobb lokális ECR értékeket kapunk, ha nem



4. ábra: Az oxigén radiális eloszlásának változása időben



5. ábra: A különböző rétegek vastagságára számítással kapott eredmények összevetése a kísérleti minta metallográfias képével



6. ábra: ECR értékek különböző számítások esetén (a GSH42 és GSH62 görbék a szekunder hidridizációs kísérletek szimulációi)

homogén a felfúvódás,

- a fiktív felhasadással módosított erőművi LOCA során, még inhomogén felfúvódást figyelembe véve sem olyan jelentős az oxidáció, hogy a 17 ECR%-os határ fölé menjen az oxidáció mértékének lokális értéke,
- bizonyos esetekben a homogén eset határérték alatti, míg az inhomogén eset határérték feletti ECR-t ad eredményül.

Összességében tehát pontosabb képet kapunk az oxidációról, ha az inhomogén felfúvódást is figyelembe vesszük az oxidáció mértékének számolásakor. Indokolt az inhomogén felfúvódás figyelembe vétele az oxidációs kritérium számolásakor, mivel vannak olyan esetek, amikor az egyenletes felfúvódásra számolt átlagos oxidációfok határérték alatti ugyan, de a valós lokális értékek meghaladják azt.

4. Összefoglalás

Atomerőművi fűtőelem burkolatokkal végzett szekunder hidridizációs kísérletek utóvizsgálatai alapján (metallográfia, négyponos hajlítás, forró extrakció, SEM-EDX) megállapítottuk többek között a keletkező oxidréteg vastagságát, az oxigén eloszlását a fémben, valamint a minták teherbíró képességét.

A kísérleti eredményeket felhasználva készítettünk egy modellt, ami számolja, hogy a felhasadás után hogyan jut be a vízgőz a burkolat alá, és az inhomogén módon elvékonyodott, felfúvódott és felhasadt burkolat hogyan oxidálódik (mindkét oldalán), valamint ez hogyan befolyásolja a teherbíró képességét. A megírt program segítségével kiszámoltuk különböző geometriákra és esetekre az oxidáció mértékét. Eredményeinkből egyértelműen kiderül, hogy jelentősen eltérnek a lokális értékek a homogén és inhomogén oxidáció esetén. Vizsgáltuk a burkolat teherbíró képességének változását is különböző esetekben, és azt tapasztaltuk, hogy a burkolat képlékenységének megőrzésében döntő szerepet játszó β -réteg az erőművi tervezési LOCA baleset

során az inhomogén oxidáció következtében sem vékonyodik el annyira, hogy az a burkolat rideg sérüléséhez vezessen.

A program nagy előnye, hogy tetszőlegesen továbbfejleszthető, így a jövőbeni terveink között szerepel például tranziens üzemállapotok számolása, valamint a modell axiális kiterjesztése, hogy a pálcák teljes hosszukban szimulálhatók legyenek. A geometriai paraméterek is könnyen változtathatók, így eltérő geometriájú, például vékonyabb falú pálcák viselkedése is számolható.

Irodalomjegyzék

- [1] Z. Hózer, Cs. Győri, L. Matus, M. Horváth: Ductile-to-brittle transition of oxidized Zircaloy-4 and E110 claddings, *Journal of Nuclear Materials*, 373, 2008, pp. 415-423
- [2] D.O.Hobson: Ductile-brittle behavior of Zircaloy fuel cladding, *Proceedings of the ANS Topical Meeting on Water Reactor Safety, Salte Lake City (1973)* 274.
- [3] Atomerőművi üzemanyag tervezése, A3.6v4. sz. útmutató, OAH (2018)
- [4] M. Király, K. Kulacsy, Z. Hózer, E. Perez-Feró, T. Novotny, High-temperature steam oxidation kinetics of E110G cladding alloy, *J. Nucl. Mater.* 475 (2016) 27-36
- [5] E. Kozsda-Barsy, K. Kulacsy, Z. Hózer, M. Horváth, Z. Kis, B. Maróti, I. Nagy, R. Nagy, T. Novotny, E. Perez-Feró, A. Pintér-Csordás, L. Szentmiklósi: Post-test examinations on Zr-1%Nb claddings after ballooning and burst, high-temperature oxidation and secondary hydriding, *Journal of Nuclear Materials* 508 (2018) 423-433
- [6] E. Barsy, P. Szabó, K. Kulacsy, Z. Hózer: The non-uniform high-temperature oxidation of Zr-1%Nb cladding – A numerical model, *Progress in Nuclear Energy, Volume 133*, 2021, 103613, ISSN 0149-1970
- [7] M. Négyesi, T. Chmela, T. Veselsky, J. Krejčí, L. Novotny, A. Pribyl, O. Bláhová, J. Burda, J. Siegl, V. Vrtílková: Assessment of oxygen diffusion coefficients by studying high-temperature oxidation behaviour of Zr1Nb fuel cladding in the temperature range of 1100–1300 °C, *Journal of Nuclear Materials* 456 (2015) 211–219
- [8] G. Hache, H. M. Chung: The history of LOCA embrittlement criteria, *NUREG/CP-0172 (2001)* 205-237.