

Óbudai Egyetem

Tézisfüzet



Cirkónium ötvözetek hidrogénezése és oxidálása

Novotny Tamás

okleveles kémia-fizika tanár

Témavezető:

Dr. Hózer Zoltán, tudományos tanácsadó

Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Készült:

Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont



2019.

Összefoglaló

Az értekezés az atomerőművekben használt cirkóniumötvözetekben üzemzavari állapotokban végbemenő változásokkal foglalkozik. A szerző új berendezéseket és eljárásokat hozott létre a cirkónium hidrogénnel történő feltöltésére, illetve a cirkóniumban elnyelt hidrogén mennyiségének meghatározására. Kísérleti programokat hajtott végre és meghatározta, hogy milyen sebességgel tud hidrogént felvenni normál üzemi hőmérsékleten a cirkóniumburkolat és milyen sebességgel oxidálódik a hidrogénezett fém magas hőmérsékletű gőzben. Mechanikai vizsgálatok eredményeinek kiértékelésével meghatározta az egyoldalon oxidált cirkóniumburkolat képlékeny-rideg átmeneti tartományát és azt a küszöbértéket, ami felett a hidrogénezett cirkónium ridegnek tekinthető. Részletes vizsgálatok alapján meghatározta a cirkóniumkomponensek hidrogéneloszlását azokban a kötegekben, amelyek egy megtörtént üzemzavart modelleztek.

Abstract

This thesis deals with the behavior of zirconium alloys under accident conditions in nuclear power plants. The author has created new devices and procedures for the charging of zirconium with hydrogen and for determining the quantity of hydrogen absorbed by the zirconium. He has carried out experimental programs and determined the speed at which the zirconium cladding can absorb hydrogen at normal operational temperature, and also the speed at which the hydrogenated metal is oxidized in high temperature steam. By evaluating the results of mechanical tests he has determined the ductile-brittle transitional interval of zirconium cladding oxidized on one side, and also the threshold above which the hydrogenated zirconium can be considered brittle. Based on detailed tests he has determined the distribution of hydrogen in the zirconium components of those bundles that were simulating an earlier, real life malfunction.

I. A kutatás előzményei

Az atomreaktorokban a cirkónium ötvözeteket széles körben használják a nukleáris fűtőanyag burkolatanyagaként, mivel nagyon alacsony a termikus neutronbefogási hatáskeresztmetszetük, jó a korrózióállóságuk és kiválóak a mechanikai tulajdonságaik (Geraszimov, 1981)^a. A burkolat fontos védelmi gátat képez a reaktorban, hiszen megakadályozza a radioaktív izotópok kikerülését a fűtőelemekből.

Az 1960-as években amerikai laboratóriumokban és kutatóreaktorokban végzett kísérletekben megfigyelték, hogy az oxidált burkolat már jóval a cirkónium olvadáspontja alatt elridegedik a vízgőzös oxidáció következtében (Parker, 1965; Hobson, 1973; OECD, 2009)^{b,c,d}. Az oxidáció során a burkolatban fontos mikroszerkezeti változások lépnek fel (Hache, 2000)^e. A kiegészítő üzemanyaggal végrehajtott későbbi kísérletek azt mutatták, hogy a normál üzemelés során a fűtőelemburkolat hidrogént vehet fel és a hidrogén jelenléte a fémbe gyorsítja az ötvözet elridegedését (Billone et al., 2008)^f.

Az atomerőművekben használt cirkónium burkolat kísérleti vizsgálata Magyarországon az 1990-es években kezdődött az MTA EK elődjében, az AEKI-ben. Az első vizsgálatokban az orosz és nyugati ötvözeteket hasonlították össze (Maróti, 1997;)^g. Meghatározták azokat a paramétereket, amelyek a számítógépes modellekhez kellett az orosz ötvözetben végbemenő változások megbízható előrejelzéséhez. Kisléptékű mérésekben vizsgálták a besugárzás, oxidáció hatását, valamint az aktív zóna különböző anyagainak kölcsönhatásait (Hózer, 2008)^h. Integrális kísérletekben a CODEX berendezésen elektromosan fűtött fűtőelem-kötegekkel modelleztek különböző üzemzavarokat és baleseteket (Hózer et al., 2003; Hózer et al., 2006)^{i,j}.

Amikor 2006-ban az AEKI-be kerültem, a cirkóniumos kísérleti kutatásokba kapcsolódtam be. Abban az időszakban számos kérdés merült fel azzal kapcsolatban, hogy a cirkónium burkolat elridegedését milyen tényezők, milyen mértékben befolyásolják. Az integrális kísérletekből származó mintadarabok korábbiaknál részletesebb vizsgálatára volt szükség. Külföldi kutatások (Billone et al., 2008)^f rámutattak, hogy az oxidált cirkónium teherbíró képességét jelentősen befolyásolja, hogy milyen hidrogéntartalommal rendelkezett a fém az üzemzavar előtt. Az orosz fűtőelemgyár továbbfejlesztette a Paksi Atomerőműben is használt, 1%Nb-ot tartalmazó E110 jelű ötvözetet és az első mérések az mutatták, hogy az új E110G jelű burkolat jobban viseli az üzemzavari terheléseket (Yegorova et al., 2005; Salatov, 2009; Niklulin et al, 2011)^{k,l,m}. Az orosz ötvözetek további hazai kutatásaihoz új módszereket, eszközöket kellett létrehozni a Zr mintadarabok hidrogénnel történő feltöltéséhez és az oxidált és hidrogénezett minták vizsgálatához. A dolgozatban ezekről az eredményekről számolok be.

II. Célkitűzések

Munkám során olyan berendezések és kísérletsorozatok tervezésére törekedtem, amelyek általános célja az volt, hogy a Paksi Atomerőműben használt cirkónium burkolatok részletes vizsgálatával olyan információkat, adatokat állítsunk elő, amelyek közvetve (azaz numerikus modellekbe építve), vagy akár közvetlen módon elősegítsék az atomerőmű biztonságos és gazdaságos üzemelését. A kísérletekben hangsúlyosan jelenik meg azon üzemzavari állapotok szimulációja, amelyek során a fűtőelemek épségét is veszélyeztető folyamatok felléphetnek.

Az értekezésben bemutatott kutatási programok indításakor az alábbi célokat fogalmaztuk meg munkatársaimmal:

- 1) Mérési eljárást és kísérleti eszközt kellett létrehozni a cirkónium mintadarabok által – különböző oxidációs, korróziós folyamatok során – elnyelt hidrogén mennyiségének meghatározására. A hidrogéntartalom jelentősen befolyásolja a fém elridegését, ezért ennek a mennyiségnek az ismerete nagyon fontos az oxidációs mérések kiértékeléséhez.
- 2) Olyan kísérleti berendezést kellett megtervezni és létrehozni, amellyel hidrogént lehet tölteni cirkónium mintadarabokba. A berendezéssel az üzemzavari állapotokat megelőző folyamatok során történő hidrogénfelvételt lehet modellezni.
- 3) Meg kellett vizsgálni, hogy a cirkóniumötvözetek által felvett hidrogén milyen hidrogéntartalomnál vezet az ötvözet elridegéséhez. Ez fontos információt jelent a hidrogénfelvétellel járó oxidációs folyamat során fellépő elridegés értelmezéséhez is.
- 4) Korábbi mérési sorozatok kiegészítéseként meg kellett vizsgálni, hogy a cirkónium burkolatok kezdeti hidrogéntartalma milyen hatással van az ötvözet magas hőmérsékletű vízgőzös oxidációjára, illetve az oxidált minták elridegésére.
- 5) Korábban végzett kétoldalú oxidációs kísérletek folytatásaként olyan mérési programot kellett megtervezni és végrehajtani, amelyben csak a burkolat külső felülete oxidálódott. A kísérletsorozat célja az oxidált cirkónium képlékeny-rideg átmenetének meghatározása volt egyoldalú oxidáció esetére.
- 6) A 2003. évi paksi üzemzavar során fűtőelemek rideg sérülést szenvedtek a tisztítótartályban. A fűtőelemek közvetlen vizsgálatára nem volt lehetőség. Ezért nagyon fontos volt a CODEX berendezésen végrehajtott integrális kísérletekből származó kötegek cirkónium részegységei által elnyelt hidrogén mennyiségének és térbeli eloszlásának feltérképezése. A mérési adatok pontosíthatják az üzemzavar lefolyásáról alkotott elképzeléseket.

III. Vizsgálati módszerek

Gázrendszer a cirkónium ötvözetek hidrogénnel történő feltöltéséhez

Az E110G és E110 jelű ötvözetek hidrogénezéséhez egy magas hőmérsékletű oxidációhoz használt háromzónás csökemencét, gázbeeresztő rendszerrel és vákuumrendszerrel építettem egybe. A hidrogénezés alatti nyomásváltozást folyamatosan regisztráltam. A nyomáscsökkenés jelezte, hogy a cirkónium hidrogént nyel el. A minták hidrogénfelvételének befejeződésekor a nyomáscsökkenés gyakorlatilag megszűnt, ekkor a mintatartót visszahúztam a kvarccső hideg részébe. Az elnyelt hidrogén mennyiségét tömegméréssel és forró extrakciós módszerrel ellenőriztem.

Oxidációs berendezés

A magas hőmérsékletű vízgőzös oxidációkat egy gőzfejlesztőből, háromzónás ellenállás-kemencéből, hőmérséklet-szabályozó rendszerből és kondenzáló rendszerből álló kísérleti berendezésben végeztem. A mintákat (E110G és E110) 1000 °C és 1200 °C hőmérsékleten oxidáltam, áramló vízgőz:argon (88:12 tf%) atmoszférában, izoterm körülmények között. Az oxidáció végén a mintát kihúztam a kvarccső hideg részére.

Hidrogéntartalom meghatározás forró extrakciós módszerrel

A burkolatmintákban abszorbeált hidrogén mennyiségét magas hőmérsékleten végzett deszorpció után CHROMPACK 438A típusú gázkromatográf hővezetőképességi detektorának (TCD) segítségével határoztam meg. Analitikai mérlegem lement tömegű mintadarabot kvarccsőnekben az előzőleg stabil hőmérsékletre melegített, 1150 °C-os kemencébe juttattam. Ezen a hőmérsékleten az összes hidrogén felszabadul a mintadarabból, amely a folyamatosan áramló argon vivőgáz segítségével közvetlenül a gázkromatográfba jut és a töltött oszlopon át a hővezetőképességi detektorba (TCD) kerül. A mérés során a hidrogén koncentrációval arányos TCD jelfeszültséget folyamatosan regisztráltam. A kiértékelésnél a TCD jel alapjel feletti részét integráltam és összevettem a kalibrációs görbe integráljával. Így kaptam meg az ismert tömegű mintából felszabadult hidrogén mennyiségét.

Gyűrűtörő vizsgálatok

Az E110G és E110 minták radiális gyűrűtörő vizsgálatait szobahőmérsékleten, INSTRON 1195 típusú univerzális szakítógéppel végeztük. Az erő-elmozdulás görbéket rögzítettük. Kiértékelésüket a görbék alakja és a fajlagos sérülési energia alapján végeztem el.

IV. Új tudományos eredmények, tézispontok

1. Kidolgoztam egy olyan forró extrakciós eljárást, amellyel az oxidált cirkónium ötvözetek hidrogéntartalmát meg lehet mérni. [1][2]

Ezzel az új eljárással viszonylag gyorsan és egyszerűen meg lehet mérni a cirkónium ötvözetek hidrogéntartalmát. 1100 °C felett az abszorbeálódott hidrogén felszabadul a mintából, ami a hővezetőképesség detektorral mérhető. A minta hidrogéntartalmából következtetni lehet arra, hogy az oxidálódott cirkónium burkolat képlékeny vagy rideg viselkedést mutat.

2. Új technológiát dolgoztam ki a cirkónium ötvözetek hidrogénnel történő feltöltéséhez. [1]

Egy olyan - gázbeeresztőkkel és nyomásmérővel felszerelt - gázrendszert építettem, amelyben a cirkónium ötvözetbe kontrollált körülmények között lehet hidrogént abszorbeáltatni. A berendezésben E110G és E110 ötvözeteket hidrogéneztem, előre meghatározott hidrogéntartalomra.

3. A hidrogénnel feltöltött oxidálatlan Zr minták töréstesztje alapján rámutattam, hogy 3000 ppm felett ridegek a minták. [1][3][4]

E110G és E110 ötvözeteket hidrogéneztem kontrollált körülmények között és megállapítottam, hogy a burkolatok 3000 ppm hidrogéntartalom felett elvesztik a képlékenységet, ridegek lesznek. Ez a korlát alkalmazható a fűtőelem burkolatok képlékeny-rideg átmenetének meghatározásához.

Megállapítottam, hogy a fűtőelem burkolat normál üzemi hidrogén felvétele negatív hatást gyakorol annak mechanikai tulajdonságaira (elridegíti) LOCA esemény bekövetkezésekor.

4. Oxidációs kísérleteket végeztem hidrogénnel feltöltött E110 és E110G burkolatokkal. [1][4]

Megvizsgáltam, hogy a fűtőelem burkolat atomerőművi normál üzemi hidrogén felvétele milyen hatással van a burkolat további viselkedésére LOCA körülmények között. A korábban általam hidrogénezett E110G és E110 mintadarabokkal magas hőmérsékletű, vízgőzös oxidációs kísérleteket hajtottam végre. Megállapítottam, hogy a különböző hidrogéntartalmú, de azonos típusú burkolatminták oxidációs kinetikájában nem tapasztalható számottevő különbség.

5. Megállapítottam, hogy az oxidációs idő és hőmérséklet függvényében milyen tartományban őrzi meg a képlékenységet az E110 burkolat egyoldalú oxidáció esetén. [5]

Az egyoldalú oxidáció során kapott eredményeket összevettem az intézetben korábban végzett kétoldalú oxidációs tesztek eredményeivel. Megállapítottam, hogy a kétoldalú oxidációs tesztek konzervatívabb eredményt adnak, mint az egyoldalú oxidációs mérések, mivel egyoldalú oxidáció esetén a burkolatanyag elridegedése jóval hosszabb idő után jelentkezik, mint ami a kétoldalú oxidációs mérések alapján várható lenne. Ez reaktorbiztonsági szempontból nagyon kedvező, hiszen ameddig a képlékeny állapot fennáll, a fűtőelem burkolat rideg törése semmilyen körülmények között nem várható.

6. Megmértem a cirkónium ötvözetek axiális hidrogéneloszlását a 2003. évi paksi üzemzavarra reprezentatívnak tekinthető kísérleti mintákban. [3][6]

A CODEX berendezésen végrehajtott integrális mérések sikeresen modellezték a 2003. évi paksi tisztítótartállyal kapcsolatos üzemzavar lefolyását. A mérési adataim pontosították az üzemzavar lefolyásáról alkotott elképzeléseket, illetve jelezték, hogy a fémötvözet hidrogénfelvétele kismértékű oxidáció esetén arányos az oxidáció mértékével, míg nagymértékű oxidációnál a maradék fém mennyisége korlátozza a hidrogénfelvételt. A mérések adatokat szolgáltatottak a fűtőelemek baleseti viselkedését szimuláló kódok továbbfejlesztéséhez és validálásához.

V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

Az 1. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

A cirkónium ötvözetek hidrogéntartalmának mérésére kidolgozott módszer új lehetőséget nyújtott az oxidációs elridegedési kritérium megalapozásához. Az eljárással meghatározott hidrogénfelvétel adatok beépültek számos projektbe, publikációba.

A 2. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

A hidrogénezett minták előállítása lehetővé teszi a fűtőelem-burkolat maximális oxidációjára vonatkozó kritériumok felülvizsgálatát. Az általam hidrogénezett minták egy részének a besugárzása megkezdődött a Budapesti Kutatóreaktorban, hogy a besugárzás és hidrogénfelvétel együttes hatását is értékelni lehessen a burkolat jellemzőinek változására.

A 3. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

A fűtőelem gyártó által specifikált megengedhető maximális hidrogéntartalom 400 ppm a cirkónium burkolatban. Ezt a méréseimmel alátámasztottam, miszerint 400 ppm-ig valóban képlékeny az E110 és az E110G cirkónium fűtőelem burkolat.

A 4. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

A hidrogénnel feltöltött mintákkal elvégzett oxidációs mérések egyedi eredményei lehetővé teszik új oxidációs kinetikai modellek kidolgozását.

Az 5. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

A mérések igazolták, hogy az egyoldalú oxidációnál a szokásosnál kevésbé konzervatív megközelítés is elegendő, mint a kétoldalú oxidációs folyamatoknál, mert az elridegedés jóval hosszabb idő után következett be.

A 6. tézispontban leírt eredmények hasznosulása

Az általam megmért hidrogéntartalmakat hozzá lehet rendelni a nagyléptékű kísérletekben (CODEX) nyert adatokhoz, hogy milyen oxidációs fok és hidrogéntartalom mellett sérül ridegen a fűtőelem. A fűtőelemek baleseti viselkedését szimuláló kódok továbbfejlesztéséhez és validálásához a méréseim pontosító adatokat nyújtottak.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- a Geraszimov, V. V., Monahov, A. Sz., 1981, A nukleáris technika anyagai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, ISBN 963-10-3861-0
- b Parker, J.W., et al., 1965, "Release of fission products from reactor fuels during transient accidents simulated in TREAT", International Symposium on Fission Product Release and Transport under Accident Conditions., Oak Ridge
- c Hobson, D. O., 1973, Ductile-brittle behavior of Zircaloy fuel cladding, in: Proceedings of the ANS Topical Meeting on Water Reactor Safety, Salt Lake City, pp. 274-288
- d OECD, 2009, Nuclear Safety, Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions, State-of-the-art Report NEA No. 6846, ISBN 978-92-64-99091-3
- e Hache, G., Chung, H.M., 2000, The History of LOCA Embrittlement Criteria, NUREG/CP-0172., 28th Water Reactor Safety Information Meeting. Bethesda, Maryland (USA): U.S. Nuclear Regulatory Commission
- f Billone, M., Yan, Y., Burtseva, T., Daum, R., Scott, H, 2008, Cladding Embrittlement during Postulated Loss-of-Coolant Accidents, NUREG/CR-6967, ANL-07/04,
- g Maróti, L., 1997, Chemical Interaction between VVER Core Components under Accidental Conditions, Nucl. Eng. and Design, 172, pp. 73-81
- h Hózer, Z., Győri, Cs., Matus, L., Horváth, M., 2008, Ductile-to-brittle transition of oxidized Zircaloy-4 and E110 claddings, Journal of Nuclear Materials Vol. 373., pp. 415-423
- i Hózer, Z., Maróti, L., Windberg, P., Matus, L., Nagy, I., Gyenes, Gy., Horváth, M., Pintér, A., Balaskó, M., Czitrovsky, A., Jani, P., Nagy, A., Prokopiev, O., Tóth, B., 2006, Behavior of VVER fuel rods tested under severe accident conditions in the CODEX facility, Nuclear Technology, 154, pp. 302-317
- j Hózer, Z., Windberg, P., Nagy, I., Maróti, L., Matus, L., Horváth, M., Pintér, A., Balaskó, M., Czitrovsky, A., Jani, P., 2003, Interaction of failed fuel rods under air ingress conditions, Nucl. Technology, 141, pp. 244-256
- k Yegorova, L., Lioutov, K., Jouravkova, N., Konobeev, A., Smirnov, V., Chesanov, V., Goryachev. A., 2005, Experimental Study of Embrittlement of Zr-1%Nb VVER Cladding under LOCA-Relevant Conditions, NUREG/IA-0211, IRSN 2005-194, NSI RRC KI 3188
- l Salatov, A.V., et al., 2009, Evaluation of E110 alloy claddings behaviour under LOCA conditions in a view of fuel safety criteria, International scientific and technical meeting „Computational and experimental studies of LWR fuel element behavior under beyond design basis accidents and reflood conditions”, I. RAN, Editor, Moscow (Russia)
- m Nikulin, S. A., Rozhnov, A. B., Belov, V. A., Li, E. V., and Glazkina, V. S., 2011, "Influence of Chemical Composition of Zirconium Alloy E110 on Embrittlement Under LOCA Conditions – Part 1: Oxidation Kinetics and Macrocharacteristics of Structure and Fracture," Journal of Nuclear Materials, Vol. 418, pp. 1-7

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] **Novotny T.**, Perez-Feró E., Horváth L.: Hydrogenation and high temperature oxidation of zirconium claddings, Proceedings of the 11th International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support. 2015: Varna (Bulgaria), pp. 364-369
- [2] Z. Hózer, E. Perez-Feró, **T. Novotny**, I. Nagy, M. Horváth, A. Pintér-Csordás, A. Vimi, M. Kunstár, T. Kemény: Experimental Comparison of the Behavior of E110 and E110G Claddings at High Temperature, Zirconium in the Nuclear Industry: 17th International Symposium, STP 1543, Robert Comstock and Pierre Barberis, Eds., pp. 932-951, ASTM International, West Conshohocken, PA 2014
- [3] Z. Hózer, M. Horváth, M. Kunstár, L. Matus, I. Nagy, **T. Novotny**, E. Perez-Feró, A. Pintér-Csordás, N. Vér, A. Vimi, P. Windberg: Experimental simulation of the Paks-2 cleaning tank incident through separate effect and integral tests. Nuclear Engineering and Design, 2011. 241(3): pp. 573-581
- [4] **Novotny T.**, Perez-Feró E.: High temperature oxidation of hydrogenated E110G cladding. 18th International QUENCH Workshop. 2012. Karlsruhe (Germany), KIT Scientific Publishing, Paper B05, ISBN: 978-3-923704-79-8
- [5] **Novotny T.**, Perezné Feró E.: E110 burkolat rideg-képlékeny átmenetének meghatározása egyoldalú gőz oxidáció alapján. Magyar Energetika, 2007. 15(5): pp. 110-112.
- [6] Perez-Feró E, Hózer Z, Windberg P, Nagy I, Vimi A, Vér N, Matus L, Kunstár M, **Novotny T.**, Horváth M, Győri Cs.: Behavior of Zr1%Nb Fuel Cladding under Accident Conditions. in International LWR Fuel Performance Meeting/Top Fuel 2007., San Francisco, California (USA): American Nuclear Society, Paper 1018. 7 p.

VIII. További tudományos közlemények

- [7] M. Király, Z. Hózer, M. Horváth, T. Novotny, E. Perez-Feró, N. Vér: Impact of thermal and chemical treatment on the mechanical properties of E110 and E110G cladding tubes, Nuclear Engineering and Technology, Volume 51, Issue 2, 2019, pp. 518-525, ISSN 1738-5733
- [8] Kozsda-Barsy E, Kulacsy K, Hózer Z, Horváth M, Kis Z, Maróti B, Nagy I, Nagy R, Novotny T, Perez-Feró E, Pintér-Csordás A, Szentmiklósi L: Post-test examinations on Zr-1%Nb claddings after ballooning and burst, high-temperature oxidation and secondary hydriding, Journal of Nuclear Materials 508: pp. 423-433, (2018)
- [9] Petrik P, Sulyok A, Novotny T, Perez-Feró E, Kalas B, Agócs E, Lohner T, Lehninger D, Khomenkova L, Nagy R, Heitmann J, Menyhárd M, Hózer Z: Optical properties of Zr and ZrO₂, Applied Surface Science 421: pp. 744-747, (2017)
- [10] Petrik P, Agócs E, Kalas B, Fodor B, Lohner T, Nádor J, Saftics A, Kurunczi S, **Novotny T.**, Perez-Feró E, Nagy R, Hámori A, Horváth R, Hózer Z, Fried M: Nanophotonics of biomaterials and inorganic nanostructures, Journal of Physics-Conference Series 794:(1) Paper 012004. 10 p. (2017), 19th International School on Condensed Matter Physics - Advances in Nanostructured Condensed Matter: Research and Innovations, ISCMP 2016;. Várna, Bulgária: 2016.08.28-2016.09.02.

- [11] Hózer Z, Nagy I, Vimi A, Kunstár M, Szabó P, **Novotny T**, Perez-Feró E, Kis Z, Szentmiklósi L, Horváth M, Pintér-Csordás A, Barsy E, Kulacsy K, Grosse M: High Temperature Secondary Hydriding Experiments with E110 and E110G Claddings, In: 18th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, Hilton Head Island (SC), Amerikai Egyesült Államok, 2016.05.15-2016.05.19. Paper B10. 30 p.
- [12] Király M, Kulacsy K, Hózer Z, Perez-Feró E, **Novotny T**: High-temperature steam oxidation kinetics of the E110G cladding alloy, *Journal of Nuclear Materials* 475: pp. 27-36, (2016)
- [13] Király M, Hózer Z, Antók DM, Horváth M, Nagy I, Nagy R, **Novotny T**, Perez-Feró E, Vér N: Overview of the experiments performed with Russian claddings at MTA EK, Top Fuel 2016: LWR Fuels with Enhanced Safety and Performance, Boise (ID), Amerikai Egyesült Államok, 2016.09.11-2016.09.15. La Grange Park (IL): American Nuclear Society, 2016. pp. 41-49
- [14] Perez-Feró E, **Novotny T**, Pintér-Csordás A, Kunstár M, Hózer Z, Horváth M, Matus L: Experimental results on the breakaway oxidation of the E110 cladding alloy under high-temperature isothermal conditions, *Progress in Nuclear Energy* 93: pp. 89-95, (2016)
- [15] Hózer Z, Nagy I, Kunstár M, Szabó P, **Novotny T**, Perez-Feró E, Horváth M, Pintér-Csordás A, Vimi A: Mechanical Testing of Balloned E110 and E110G Claddings after High Temperature Oxidation in Steam, TopFuel Reactor Fuel Performance 2015: Conference Proceedings. 580 p., Zürich, Svájc, 2015.09.13-2015.09.17. Brussels: European Nuclear Society (ENS), 2015. pp. 373-379
- [16] Perez-Feró E, **Novotny T**, Horváth M, Kunstár M, Vér N, Hózer Z: High Temperature Behaviour of E110G and E110 Fuel Claddings in Various Mixtures of Steam and Air, Proceedings of 2014 water reactor fuel performance meeting/ top fuel / LWR fuel performance meeting (WRFPM 2014). 784 p., Sendai, Japán, 2014.09.14-2014.09.17. Tokió: Atomic Energy Society of Japan, 2014. pp. 1-4
- [17] Perez-Feró E, **Novotny T**, Hózer Z, Kunstár M: High temperature oxidation experiments with sponge base E110G cladding, In: 10th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Sandanski, Bulgária, 2013.09.07-2013.09.14. Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy (INRNE), pp. 274-278
- [18] Perez-Feró E, Horváth L, Hózer Z, Kraczk G, Kunstár M, Nagy I, **Novotny T**, Pintér-Csordás A, Vimi A, Windberg P: E110G jelű üzemanyag burkolat viselkedése LOCA körülmények között, *Nukleon* 6: Paper 129. 5 p. (2013)
- [19] **Novotny T**, Somfai B, Hózer Z, Nagy I, Perez-Feró E, Vimi P, Windberg P: High Temperature Behaviour of E110 Cladding Produced by New Technology, In: 2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Chengdu, Kína, 2011.09.11-2011.09.14. Paper Paper ID P3-001. 5 p.
- [20] Pintér Csordás A, Perez-Feró E, **Novotny T**: Some examples from SEM-EDX studies related to the nuclear research, In: Magyar Mikroszkópos Konferencia. Siófok, Magyarország, 2010.05.13-2010.05.15.
- [21] Perez-Feró E, Győri C, Matus L, Vasáros L, Hózer Z, Windberg P, Maróti L, Horváth M, Nagy I, Pintér-Csordás A, **Novotny T**: Experimental database of E110 claddings exposed to accident conditions, *Journal of Nuclear Materials* 397:(1-3) pp. 48-54, (2010)

- [22] Hózer Z, Balaskó M, Horváth M, Kunstár M, Matus L, Nagy I, **Novotny T**, Perez-Feró E, Pintér A, Vér N, Vimi A, Windberg P: Quenching of high temperature VVER fuel after long term oxidation in hydrogen rich steam, *Annals of Nuclear Energy* 37: pp. 71-82, (2010)
- [23] **Novotny T**, Perez-Feró E, Pintér-Csordás A, Vér N, Matus L: Steam Oxidation Experiments for Study of Breakaway Phenomena on Zirconium Surface, 15th International QUENCH Workshop Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Németország, 2009.11.03-2009.11.05. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2009. Paper M14.
- [24] Vimi A, Hózer Z, Nagy I, Windberg P, Perezné Feró E, **Novotny T**, Pintérné Csordás A: A paksi üzemzavarhoz kapcsolódó rugós és kazettafelütközéses kísérletek, *Nukleon* 2: Paper 46. 6 p. (2009)
- [25] Hózer Z, **Novotny T**, Perez Feró E, Horváth M: Failure and Ductile-to-Brittle Transition of Oxidized Zirconium, In: Proceedings of the 2008 Water Reactor Fuel Performance Conference, Seoul, Dél-Korea, 2008.10.19-2008.10.23. Paper 8018. 7 p.
- [26] Hózer Z, Windberg P, Nagy I, Matus L, Vér N, Kunstár M, Vimi A, **Novotny T**, Perez-Feró E, Horváth M, Pintér A, Balaskó M: CODEX-CT-1 experiment: Quenching of fuel bundle after long term oxidation in hydrogen rich steam, *KFKI 2008:(01/G)* pp. 1-93, (2008)
- [27] Hózer Z, Windberg P, Nagy I, Matus L, Vér N, Kunstár M, Vimi A, **Novotny T**, Perez-Feró E, Horváth M, Pintér A, Balaskó M: CODEX-CT-2 experiment: Long term treatment in high temperature hydrogen and water quenching of a fuel bundle, *KFKI 2008:(02/G)* pp. 1-78, (2008)
- [28] **Novotny T**, Perez-Feró E: Oxidréteg felhasadása cirkónium felületen, VII. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, Magyarország, 2008.12.04-2008.12.05. Budapest: Magyar Nukleáris Társaság, 2008. Paper A04.
- [29] Hózer Z, Windberg P, Nagy I, Vimi A, Kunstár M, Vér N, Matus L, Perezné Feró E, **Novotny T**, Balaskó M: A paksi üzemzavar modellezése a CODEX berendezésen, *Magyar Energetika* 15:(5) pp. 20-23, (2007)