

Magas hőmérsékleteken oxidált krómbevonatos Zr burkolatminták elektronsugaras vizsgálatai

Electron beam studies of Cr-coated Zr cladding samples after high temperature oxidation

Pintérné Csordás-Tóth Anna^a, Illés Levente^b, Perez-Feró Erzsébet^c, Novotny Tamás^d, Hózer Zoltán^e, J. Stuckert^f, Martin Ševeček^g

^aHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, nyugdíjas tud. főmunkatárs, pinterne.csordas.anna@ek.hun-ren.hu

^bHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, villamosmérnök, illes.levente@ek.hun-ren.hu

^cHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, perez-fero.erzsebet@ek.hun-ren.hu

^dHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, novotny.tamas@ek.hun-ren.hu

^eHUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, laboratóriumvezető, hozer.zoltan@ek.hun-ren.hu

^fKarlsruhe Institute of Technology, juri.stuckert@kit.edu

^gCzech Technical University in Prague, martin.sevecek@tjfi.cut.cz

Kulcsszavak

pásztázó elektronmikroszkópia, elektronsugaras mikroanalízis, mikroszerkezet, bevonatok, fűtőelem burkolatok

Keywords

SEM, EDX, microstructure, coatings, fuel claddings

Absztrakt

A krómmal bevont Zr-alapú burkolatok fejlesztése fontos lépés a könnyűvízes atomreaktorok fűtőelem burkolatai oxidációs ellenállásának növelésében. Elektronsugaras vizsgálati módszerekkel tanulmányoztuk négyféle, kísérleti Cr réteggel bevont burkolat – E110, Zircaloy-4, ZIRLO és optimalizált ZIRLO – mikroszerkezetét vízgőz atmoszférában 1000, illetve 1200 °C hőmérsékleten történő oxidáció után. Vizsgáltuk a Cr és a képződött Cr-oxid(ok) vastagságát és összetételét. A leghomogénebb, 12-16 µm vastagságú Cr bevonatot az E110 burkolatmintán találtuk 2,1-5 µm-es Cr-oxiddal. A Zircaloy-4 és a ZIRLO mintáknál a Cr-réteg alatt is képződött Zr-oxid 1200 °C-on.

Abstract

Development of Cr coated Zr-based claddings is an important task to increase the oxidation resistance of the fuel claddings in light water reactors. Electron beam methods were applied to investigate the microstructure of 4 types of experimental Cr-coated claddings – E110, Zircaloy-4, ZIRLO and optimised ZIRLO after steam oxidation at 1000 and 1200 °C, resp. Thickness and composition of the Cr and Cr-oxide layers were studied. The most homogeneous, 12-16 µm thick Cr coating was found for E110 cladding with 2.1-5 µm Cr-oxide. At Zircaloy-4 and ZIRLO claddings Zr-oxide was formed even below the Cr layer at 1200 °C.

1. Bevezetés

A fukushimai atomreaktor balesetnél bebizonyosodott, hogy egy könnyűvízes reaktorban (LWR) történő súlyos balesetnél a hidrogén által okozott robbanás jelent komoly biztonsági kockázatot. A hidrogén a Zr-alapú ötvözetekből készült alkatrészek – mint amilyen a burkolat, a vezetőcső és a távtartórács – oxidációja során képződik. A Zr-alapú ötvözetek magas hőmérsékletű oxidációs sebességének csökkentése az egyik legfontosabb cél a balesetálló fűtőelemek (ATF) fejlesztésében [1-3]. Sokféle ATF koncepciót tekintettek át és fejlesztettek ki, hogy megnöveljék az oxidációval szembeni ellenállást és javítsák a burkolatok mechanikai tulajdonságait LOCA (hűtővízvesztéses baleset) körülmények között, és az így kapott eredményeket összehasonlították a hagyományos Zr-alapú ötvözetekével.

Az egyik ígéretes technológia a Zr burkolat krómmal való bevonása [4-6]. Ez a technológia előnyös a burkolatanyagok oxidációs viselkedése és mechanikai tulajdonságai szempontjából. Mindazonáltal a gyártási paramétereket és a krómréteg vastagságát optimalizálni kell.

Vizsgálataink célja négyféle típusú, bevonat nélküli és kísérleti krómbevonattal ellátott burkolatminta mikroszerkezetének vizsgálata 1000 illetve 1200 °C-os, vízgőz atmoszférában történő oxidáció után. Ebben a cikkben elsősorban a bevonatos minták eredményeit mutatjuk be, és összehasonlítjuk a különböző típusú krómbevonattal ellátott burkolatanyagok oxidáció utáni mikroszerkezetét.

2. Kísérleti rész

Közleményünkben olyan eredményeket mutatunk be, amelyeket főként elektronsugaras módszerekkel, pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) és energiadiszperzív

röntgensugaras mikroanalizátor (EDX) alkalmazásával kaptunk. Ez a két mérési módszer régóta használatos a tudomány és az ipar területén, és az Anyagvizsgálók Lapja 2021/III. lapszámában Herbáth Beáta és Kovács Kristóf cikkében [7] részletes ismertetés jelent meg róluk.

A vizsgálatokat részben a burkolatminták palástján, részben a minták keresztmetszeti csiszolatain végeztük. Ez utóbbiakat a szokásos minta előkészítési eljárásokkal (epoxi műgyantába ágyazás, csiszolás, polírozás, vezető szénréteggel való párologtatás a minták elektromos töltődésének csökkentésére) készítettük el.

2.1 Alkalmazott berendezések és vizsgált minták

A morfológiai vizsgálatokhoz egy ThermoScientific Scios 2 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtunk. Másodlagos és visszaszórt elektronképeket (SEI és BEI) egyaránt készítettünk a burkolatminták palástjáról, amelyhez 5 kV gyorsító feszültséget alkalmaztunk. A keresztmetszeti csiszolatmintákon a rétegek vastagságát a visszaszórt elektronképeken tanulmányozhattuk a legjobban.

A vizsgált minták elemi összetételét és a legfontosabb elemek eloszlását egy Oxford X-MAX 20 típusú energiadiszperzív röntgensugaras mikroanalizátorral vizsgáltuk. Ez az analizátor olyan szilícium detektorral rendelkezik, amely nagy mintaáramokkal is használható. Így rövid mérési idő (néhányszor 10 sec) alatt lehet megfelelő mikroanalízis vizsgálatokat végezni. Ezekhez a mérésekhez általában 30 kV gyorsító feszültséget alkalmaztunk. Az EDX spektrumokat különböző méretű mintaterületekről készítettük.

A krómmal bevont ZIRLO burkolatminták esetén gallium fókuszált ionsugarat (FIB) is alkalmaztunk, hogy mélységi

információkat nyerjünk a mintákról. A FIB használatánál először általában egy vékony platina réteget vittünk fel a mintára a mintafelület megvédésére, majd egy kiválasztott területen elvégeztük a minta bemetszését. A bemetszés mélysége néhány μm -tól 10-20 μm -ig terjedt. Ezekhez a vizsgálatokhoz a mintákat 52 fokra döntöttük. A SEM felvételeken látható rétegvastagságokat erre a döntési szög-re kellett korrigálni.

A FIB segítségével fel tudtuk tární a különböző rétegeket, nevezetesen a Cr-oxid, Cr, vegyes Cr-Zr tartalmú, valamint esetenként a Zr-oxid rétegeket.

Az általunk vizsgált minták külföldről, a Karlsruhe Műszaki Intézetből és a Cseh Műszaki Egyetemről származtak. Az E110 jelű ötvözet orosz szivacsos alapú termék, amely 1 tömegszázalék Nb ötvözt tartalmaz. A Zircaloy-4 (Zry-4) hagyományos burkolatanyag, amelyet gyakran használnak a nyugati atomreaktorokban. Körülbelül 1,4 tömegszázalék Sn ötvözt tartalmaz. A ZIRLO és az optimalizált ZIRLO újonnan fejlesztett burkolatanyagok, amelyeket nióbiummal és ónnal egyaránt ötvöznek.

A vizsgálandó minták oxidációját a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban végeztük 12 térfogatszázalék argon vivőgázt tartalmazó vízgőzben, egy csökemencében 1000 és 1200 °C hőmérsékleteken 1 illetve 1/2 óráig.

Az 1. táblázatban összesítettük a vizsgált minták legfontosabb adatait. Az utolsó oszlop a minták egységnyi felületére eső tömegnövekedését ($\Delta m/A$) tartalmazza. Ez utóbbi értékekben a minták teljes felülete szerepel, azaz a bevonat nélküli belső felületek is. Mivel az oxidáció során a burkolatminták belső felületén viszonylag vastag oxidréteg (egyes mintáknál 120-130 μm) is képződhet, az egységnyi felületre eső tömegnövekedés nagy szám lehet. Ez állapítható meg elsősorban a bevonat nélküli burkolatminták 1200 °C-os oxidációja után.

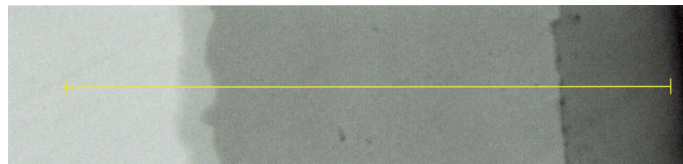
1. táblázat: A vizsgált burkolatminták néhány adata

A burkolat típusa	Minta jele	Oxidációs hőmérséklet (°C)	Oxidációs idő (s)	$\Delta m/A$ (g/m ²)
Cr bevonatos E110	IAEA-08	1200	3600	18,8
Bevonat nélküli Zircaloy-4	ATFTS-01	1000	3600	111,9
Cr bevonatos Zircaloy-4	ATFTS-02	1000	3600	56,0
Cr bevonatos ZIRLO	ATFTS-03	1000	3600	46,4
Bevonat nélküli opt. ZIRLO	ATFTS-04	1000	3600	84,2
Cr bevonatos opt. ZIRLO	ATFTS-05	1000	3600	44,0
Bevonat nélküli Zircaloy-4	ATFTS-06	1200	1800	257,0
Cr bevonatos Zircaloy-4	ATFTS-07	1200	1800	189,2
Cr bevonatos ZIRLO	ATFTS-08	1200	1800	156,7
Bevonat nélküli opt. ZIRLO	ATFTS-09	1200	1800	264,1
Cr bevonatos opt. ZIRLO	ATFTS-10	1200	1800	137,1

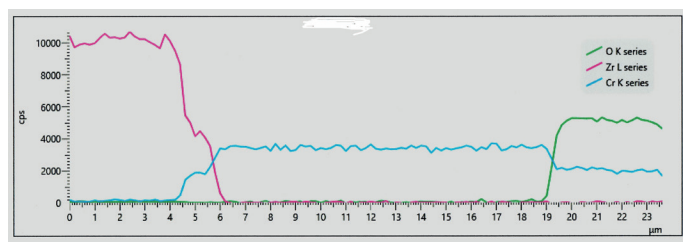
3. A mikroszerkezet vizsgálatok eredményei

3.1 Cr bevonatos E110 burkolatminta

Egyenletes, kompakt, 12-16 μm vastagságú Cr réteget és 2,1-5 μm -es Cr-oxid réteget figyeltünk meg a minta keresztmetszeti csiszolatán (1.a ábra). A Cr-oxid összetétele megközelíti a Cr_2O_3 összetételt. Egy 0,8-1 μm vastagságú határfelületi réteget lehetett azonosítani a Cr réteg és a Zr fém között. Ezt mutatja be az 1.b ábra.



1.a ábra: Az IAEA-08 jelű burkolatminta SEM felvétele

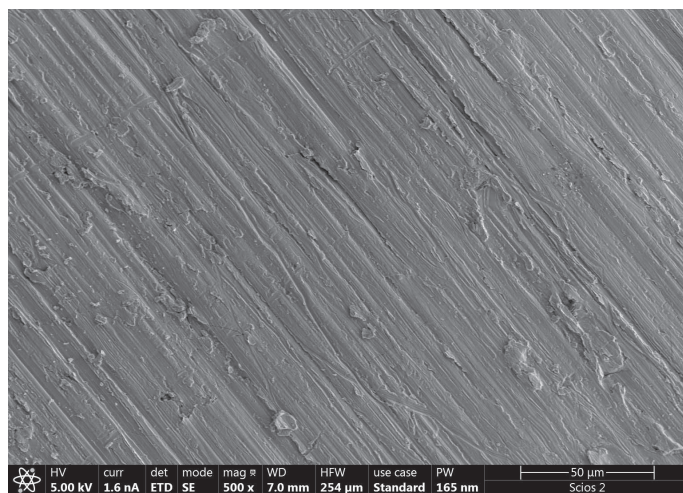


1.b ábra: Az 1.a ábrán látható mintarészleten a fő elemek röntgen vonalprofiljai

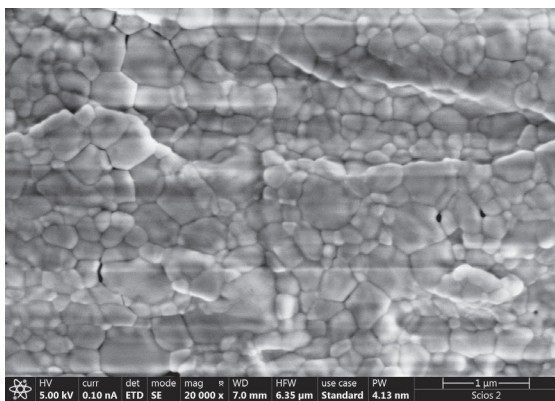
Az 1.a ábra világos kontrasztú, a Zr fémhez tartozó részletéből (a kiválasztott vonal mentén) a Cr felé haladva a világosszürke kontraszttal megjelenő határfelületi rétegben kevesebb Zr és növekvő Cr figyelhető meg. A határfelületi réteg összetétele diffúziós folyamatokra utal.

3.2 Bevonat nélküli és Cr bevonatos Zircaloy-4 burkolatminták

A2.a ábra az ATFTS-01, míg a 2.b ábra az ATFTS-06 jelű burkolatminta palástjának felületét mutatja. Alacsonyabb hőmérsékleten a megmunkálás nyomai, míg magasabb hőmérsékleten kisméretű (néhány tízed μm -es) Zr-oxid kristályok láthatók a minták palástjain.

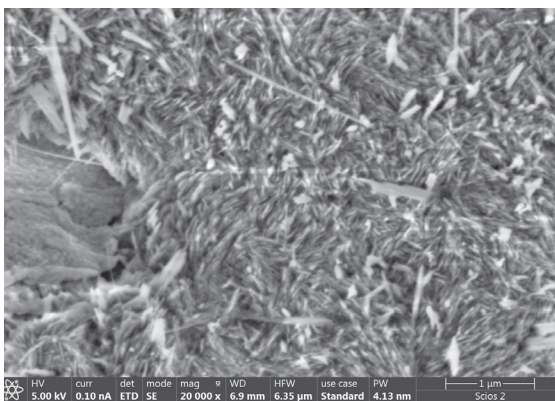


2.a ábra: Az ATFTS-01 jelű minta palástjáról készült SEM felvétel



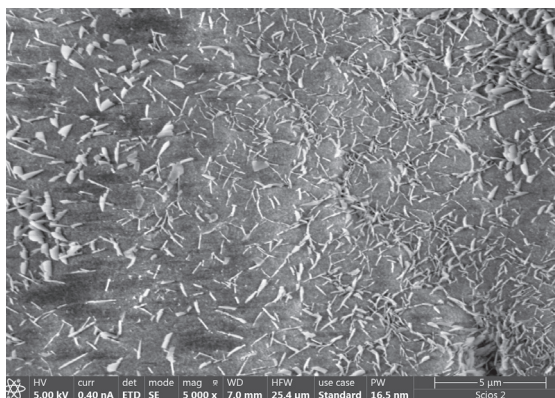
2.b ábra: Az ATFTS-06 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel

Az ATFTS-02 jelű, Cr-bevonatú, 1000 °C-on oxidált Zircaloy-4 minta palástja kisebb nagyításban simább felületet mutatott. Nagyobb nagyításban tús-lemezes kristályok és kevés számban kicsit nagyobb szemcsék figyelhetők meg (3. ábra). A minta keresztmetszeti csiszolatán 7-10 µm vastagságú Cr réteget mutattunk ki, és nem volt értékelhető Cr-oxid réteg.

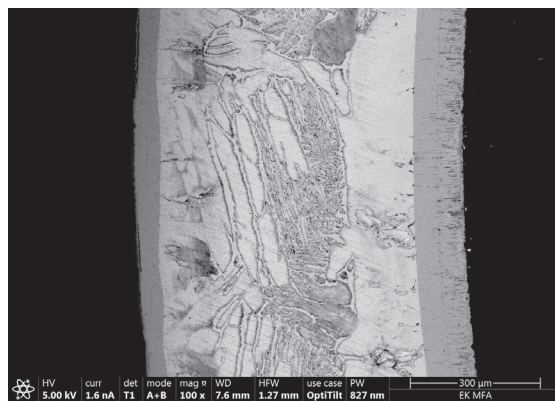


3. ábra: Az ATFTS-02 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel

A magasabb hőmérsékleten oxidált ATFTS-07 jelű minta felületén kevesebb számú tús-lemezes Cr-oxid kristály látható (4.a ábra), mint az alacsonyabb hőmérsékleten oxidált ATFTS-02 mintánál. A tús kristályok hosszúsága 1-2 µm is lehet, szélességük néhány tized µm.



4.a ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel



4.b ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta keresztmetszetéről készült kissnagyítású SEM felvétel

A Cr-bevonatú Zircaloy-4 burkolat 1200 °C-on történő oxidációja során vastagabb rétegrendszer képződött a burkolatminta külső felületén. A 4.b ábra kissnagyítású SEM felvétele azt mutatja, hogy a külső szélén egy 41-55 µm vastagságú rétegrendszer van, amely az EDX vizsgálatok alapján Cr-oxid, Cr és Zr-oxid rétegeket tartalmaz (5. ábra, 2. táblázat).

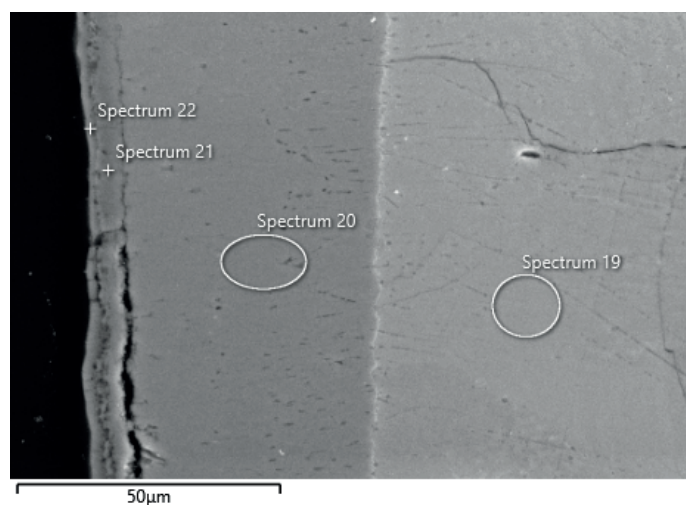
A minta belső, bevonat nélküli felületén ~120 µm vastagságú Zr-oxid réteg képződött.

A minta külső szélén lévő rétegeket nagyobb nagyításban mutatja az 5. ábra, amelyen bejelöltük azokat a területeket, amelyekről EDX analízist végeztünk.

A 2. táblázat a kiválasztott mintaterületek EDX adatait tartalmazza. CrO; Cr, O és Zr tartalmú réteg; Zr-dioxid és Zr kevés O tartalommal azonosítható.

2. táblázat: Az 5. ábrán bejelölt területek EDX adatai atomszázalékban

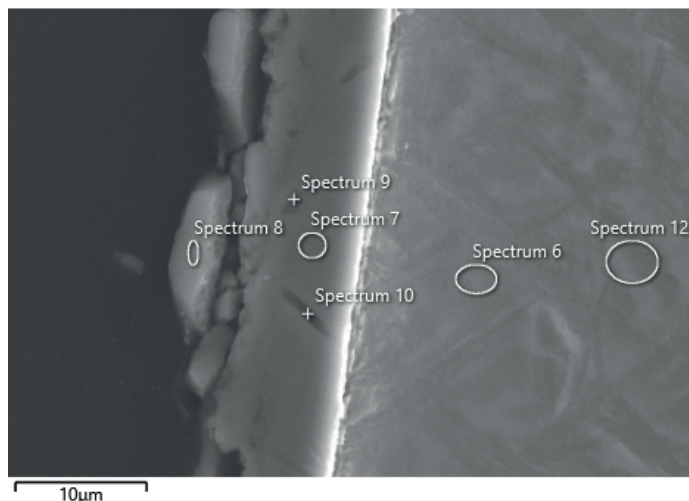
Elem	Spektrum 19	Spektrum 20	Spektrum 21	Spektrum 22
O	34,27	70,87	11,25	51,89
Cr	2,82	0,5	81,01	47,46
Fe	0,4	-	0,8	0,12
Zr	61,98	28,39	6,95	0,18
Sn	0,53	0,19	-	-



5. ábra: Az ATFTS-07 jelű burkolatminta külső szélénél lévő rétegek SEM felvétele

3.3 Cr bevonatos ZIRLO burkolatminták

Vékony, leváló Cr-oxid és 7-10 µm vastagságú Cr réteg jellemzi az ATFTS-03 jelű burkolatmintát. A 6. ábra a minta külső szélének SEM felvétele. CrO₂ képződése mellett a Cr kismennyiségű oxigénnel együtt fordul elő a Zr fémekben is. A Cr-nak a Zr-ba való diffúziója állapítható meg a 3. táblázat EDX adataiból.



6. ábra: Az ATFTS-03 jelű minta SEM felvétele az EDX elemzések területeivel

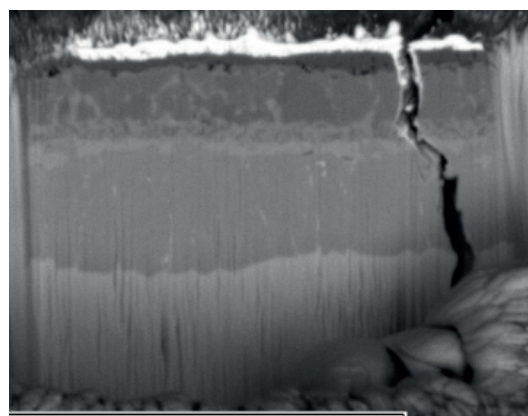
3. táblázat: A 6. ábrán jelölt területek EDX adatai atomszázalékban

Elem	Spektrum 6	Spektrum 7	Spektrum 8	Spektrum 9	Spektrum 12
O	21,9	3,84	71	-	-
Si	-	0,21	0,82	0,93	-
Cr	4,54	95,38	28	98,83	3,59
Zr	67,08	0,39	0,04	0,24	96
Nb	1,25	-	-	-	-
Sn	0,27	-	-	-	-

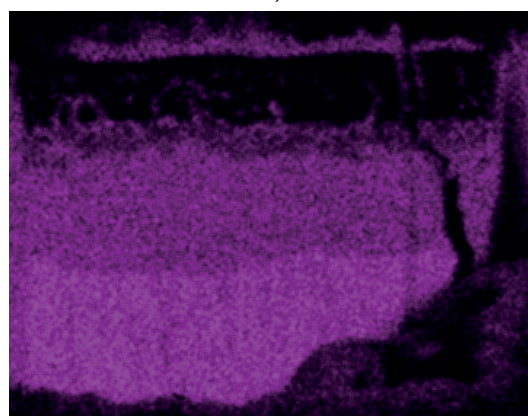
A Cr-bevonatú ZIRLO minta 1200 °C-on történő oxidációja során kisméretű, Zr-oxid tartalmú szemcséket figyelünk meg a 4,5-5 µm vastagságú Cr rétegben.

Az ATFTS-08 jelű minta FIB metszetének SEM felvételén és a hozzá tartozó Zr, O és Cr röntgentérképeken (7. ábra) jól megfigyelhetők a különböző rétegek. A legkülső réteg egy 0,4-1,3 µm vastagságú Cr-oxid. Ezt követi a 4,5-5 µm vastagságú Cr réteg Zr-oxid részecskéikkel. A határfelületi réteg 0,7-0,9 µm vastagságú. Alatta 6,6-8 µm vastagságú Zr-oxid réteg helyezkedik el, amely alatt van a Zr. A Cr-nak a Zr-ba történő diffúziója mellett a Zr is diffundál a Cr-ba. A felvétel jobb oldalán nagyméretű repedés látható, amely az összes rétegen áthalad. A FIB metszés előtt egy vékony Pt réteget vittünk fel a minta felületére. A nagyon fényes kontrasztú felső réteg Pt, amelynek Mα vonala átlapolja a Zr La vonalát. Ezért a Zr röntgen térképen lévő felső réteg Pt és nem Zr. A környezetből természetesen származhat Zr.

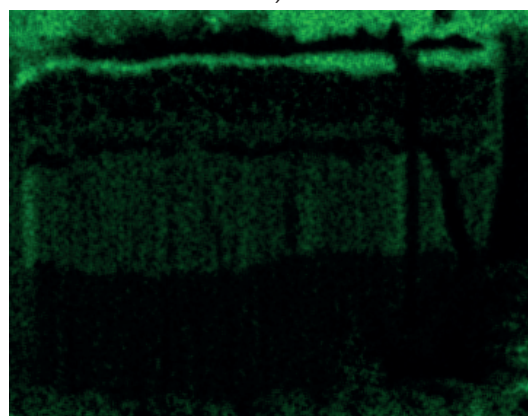
A Zr röntgentérkép jobb alsó részén hiányzik a Zr. Ez a jelenség a minta döntése miatt van, mert a detektor nem lát bele a metszet alsó részébe.



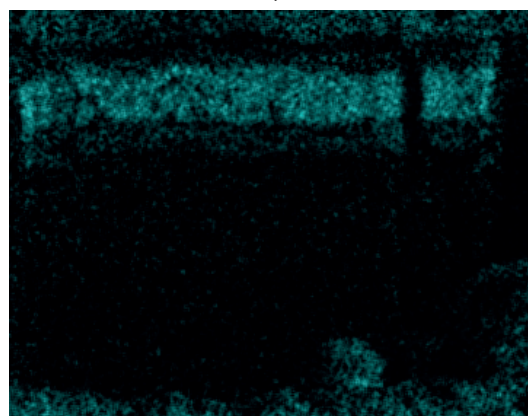
a)



b)



c)



d)

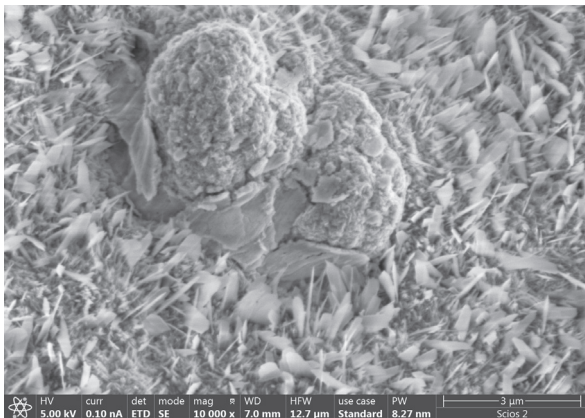
7. ábra: Az ATFTS-08 jelű burkolatminta FIB metszetének
a) SEM felvétele, b) a Zr La,
c) az O Kα és d) a Cr La röntgentérképek

3.4 Cr bevonatos optimalizált ZIRLO burkolatminták

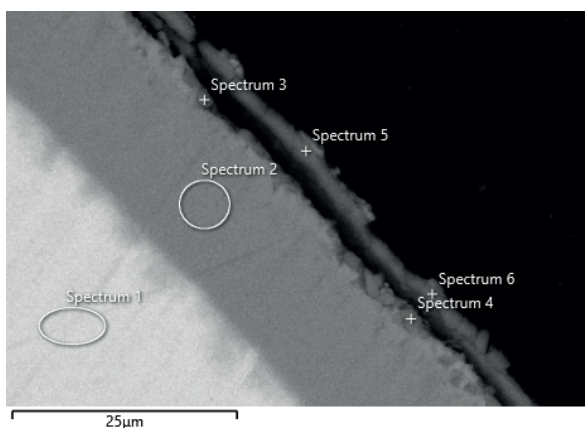
Az ATFTS-05 jelű minta palástjának SEM vizsgálata tű alakú krisztallitokat, nagyobb méretű lemezeket és gömb alakú aggregátumokat mutat (8. ábra).

A tű alakú krisztallitok Cr-ban dúsultak, míg a lemezek és a gömb alakú aggregátumok főként Zr-oxidok. A minta keresztmetszeti csiszolatának külső szélét mutatja a 9. ábra. A Cr-réteg vastagsága $\approx 15\mu\text{m}$, míg a Cr-oxid tartalmú szemcséké $3-5\mu\text{m}$. Néhány terület EDX adatait a 4. táblázat tartalmazza. A 9. ábra a gyűrűminta külső széléhez közeli részletet mutat.

A Cr-rétegben kevés Zr is van (Spektrum 2). Kétféle összetételű Cr-oxidot azonosítottunk: CrO-t (Spektrum 4 - Spektrum 6) és Cr₂O₃-t (Spektrum 3). Az α -Zr O-t is tartalmaz és helyenként kimutatható az ötvözőként szolgáló Nb és Sn (Spektrum 1).



8. ábra: Az ATFTS-05 jelű burkolatminta palástjáról készült SEM felvétel



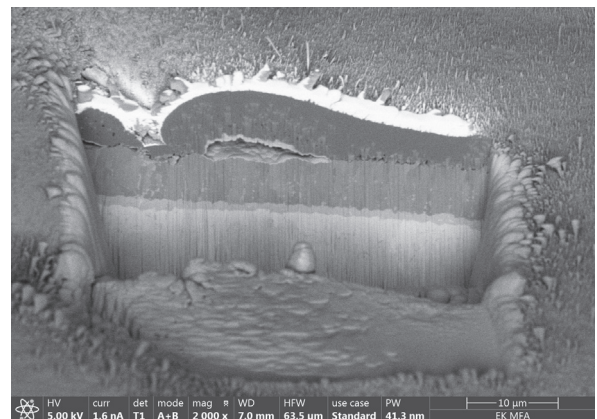
9. ábra: Az ATFTS-05 jelű burkolatminta keresztmetszeti csiszolatának SEM felvétele

4. táblázat: A 9. ábrán jelölt területek EDX adatai atomszázalékban

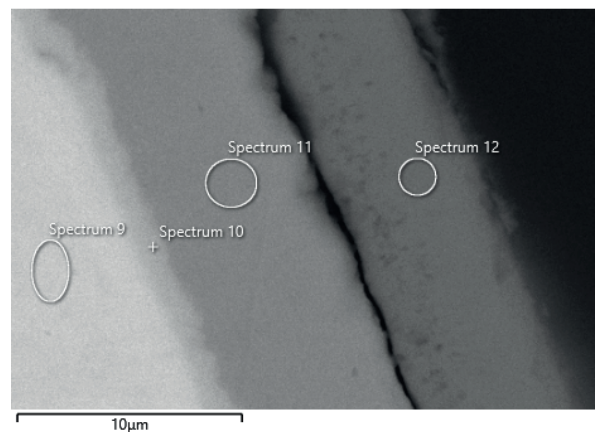
Elem	Spektrum 1	Spektrum 2	Spektrum 3	Spektrum 4	Spektrum 5	Spektrum 6
O	17,14	-	58,15	46,4	48,25	46,98
Cr	2,53	97,5	39,42	46,73	47,42	47,54
Fe	0,32	0,18	-	-	-	-
Zr	77,9	1,95	1,21	5,27	1,06	1,34
Nb	1,7	-	-	-	-	-
Sn	0,42	-	-	-	-	-

A Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolatminta 1200 °C-on történő oxidációja során esetenként kétféle Cr-oxid réteg képződött. A külső nagyobb, a belső kisebb O tartalommal rendelkezett. A Cr-oxid és a Cr rétegekben kisméretű Zr-oxid részecskék találhatók. Ez látható a 10. ábrán, amely a minta FIB metszetének SEM felvétele.

A minta keresztmetszeti csiszolatának SEM és EDX vizsgálata azt mutatta, hogy a képződött Cr-oxid és a Cr réteg közel azonos vastagságú: a Cr-oxid réteg $6,5-7\mu\text{m}$ -es, a Cr réteg $7,5-8\mu\text{m}$ -es. Ez figyelhető meg a 11. ábrán, amelyen egy $\approx 1\mu\text{m}$ vastagságú határfelületi réteg is látható a Cr és a Zr között. Úgy tűnik, hogy a Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolaton homogénebb Cr-oxid és Cr rétegek voltak, mint a Cr bevonatú Zircaloy-4 és ZIRLO burkolatokon.



10. ábra: Az ATFTS-10 jelű burkolatminta FIB metszetének SEM felvétele



11. ábra: Az ATFTS-10 jelű burkolatminta keresztmetszeti csiszolatának SEM felvétele

4. Összefoglalás

SEM és EDX vizsgálatokat végeztünk az alábbi négyféle típusú fűtőelem burkolaton: E110, Zircaloy-4D, ZIRLO és optimalizált ZIRLO. A burkolatanyagokat két külföldi intézetben látták el Cr réteggel. A burkolatminták magas hőmérsékletű oxidációját vizsgáló atmoszférában az intézetünkben hajtottunk végre. Vizsgálataink célja a burkolatminták morfológiai jellemzőinek és elemi összetételének tanulmányozása volt. A SEM és EDX vizsgálatokból az alábbiakat állapítottuk meg:

1. A Cr-bevonatú, 1200 °C-on oxidált E110 burkolat 12-16 µm vastagságú Cr rétege tömör és jól tapad a Zr fémhez. 2,1-5 µm vastagságú Cr₂O₃ réteg képződött a burkolat felületén az oxidáció hatására. A Cr réteg és a fém között egy vékony, vegyes Cr–Zr összetételű határfelületi réteg utal a diffúziós folyamatokra. Ilyen réteg a többi, főként 1200 °C-on oxidált burkolatmintában is képződött.
2. A Cr réteg vastagsága csak 7-10 µm volt a Cr-bevonatú Zircaloy-4 és ZIRLO burkolatmintáknál.
3. Az 1000 °C-on oxidált Zircaloy-4, ZIRLO és optimalizált ZIRLO minták Cr rétegei csak kis mértékben oxidálódtak és a Cr-oxid rétegek helyenként leváltak.
4. A 3. pontban említett minták 1200 °C-on történő oxidációja során kisméretű Zr-oxid részecskék jelentek meg a Cr vagy a Cr-oxid rétegben. Különböző összetételű – úgymint CrO, CrO₂ és Cr₂O₃ – krómoxidok képződtek. A Cr-bevonatú Zircaloy-4 és a ZIRLO bevonatokban Zr-oxid réteg is kialakult a Cr réteg alatt. Intenzív diffúziós folyamatok játszódtak le a Cr és a Zr fém között mindkét irányban. A Zr-oxid réteg vastagsága sokkal kisebb volt, mint a gyűrűminták belső oldalán képződött Zr-oxid.
5. Az 1200 °C-on oxidált Cr-bevonatú optimalizált ZIRLO burkolaton homogénebb Cr–oxid és Cr rétegek voltak, mint a 4. pontban említett mintákon. Kisebb volt a felületegységre eső tömegnövekedése is, mint a 4. pont mintáié.
6. 1000 °C-on a vizsgált minták oxidációs viselkedése és mikroszerkezete általában kedvezőbb volt, mint 1200 °C-on.

keretében végeztük, amelyet a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség támogatott.

Irodalomjegyzék

- [1] Carmack, J., Goldner, F., Bragg-Sitton, S. M., Snead, L. L.: Overview of the U.S. DOE Accident Tolerant Fuel Development Program. TopFuel. 2013, p. 734.
- [2] Pint, B. A., Terrani, K. A., Brady, M. P., Cheng, T., Keiser, J. R.: High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam–hydrogen environments. Journal of Nuclear Materials. 440. 2013, pp. 420-427.
- [3] Terrani, K. A., Zinkel, S. J., Snead, L. L.: Advanced oxidation-resistance iron-based alloys for LWR fuel cladding. Journal of Nuclear Materials. 448. 2014, pp. 420-435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.06.041>
- [4] Wang, Y., Zhou, W., Wen, Q., Ruan, X., Luo, F., Bai, G., Qing, Y., Zhu, D., Zhang, Y., Liu, T., Li, R.: Behaviour of plasma sprayed Cr coatings and FeCrAl coatings on Zr fuel cladding under loss-of-coolant accident conditions. Surface & Coatings Technology. 344. 2018, pp.141-148.
- [5] Brachet, J. C., Le Saux, M., Le Flem, M., Urvoy, S., Rouesne, E., Guilbert, T., Cobac, C., Lahogue, F., Rousselot, J., Tupin, M., Billaud, P., Hossepied, C.: On-going studies at CEA on chromium coated zirconium based claddings for enhanced accident tolerant LWRS fuel. TopFuel 2015, Zurich, Switzerland, 2015, September 13-19, pp. 1-8.
- [6] Ševeček, M., Gurgen, A., Seshadri, A., Che, Y., Wagih, M., Phillips, B., Champagne, V., Shirvan, K.: Development of Cr cold spray – coated fuel cladding with enhanced accident tolerance. 2018 Nuclear Engineering and Technology. 50. 2018, pp. 229-236.
- [7] Herbáth, B., Kovács, K.: Anyagvizsgálói lehetőségek a cink-foszfátos felület-előkezelő folyamatok technológiai ellenőrzésére. Anyagvizsgálók Lapja. 2021/III. lapszám. RAKK-AGY 2021 Konferenciai cikkek válogatott gyűjteménye. 2021, 75-81. oldal

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Fejlett Technológia és Baleset Álló Fűtőelem (ATF) tesztelése és szimulációja projekt



ANYAGVIZSGÁLOK LAPJA PUBLIKÁLJON NÁLUNK!

Írjon szakmai vagy általános
témájú cikket

az

Anyagvizsgálók Lapjába!

Részletekért látogassza meg honlapunkat,
vagy írjon az alábbi email címek valamelyikére:

info@anyagvizsgaloklapja.hu

avilap.szerk@gmail.com

www.avilap.hu

