

Atomerőművi fűtőelemek burkolatának kopásos sérülése normál üzemelés során

Hózer Zoltán, Nagy Imre, Vimi András, Kunstár Mihály, Pintérné Csordás Anna

Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont
1525 Budapest, Pf. 49.

A VVER fűtőelemek burkolatának kopásos sérülését kísérletekben szimulálták. A mérések egyrészt a kazettába került idegen testek, másrészt a távtartórács lehetséges koptató hatását vizsgálták. Az eredmények rámutattak, hogy a távtartórácsnál akkor léphet fel kopás, ha a rács nem rögzíti eléggé mereven a rudakat. A fűtőelemek kilyukadásához a zónába került idegen test és a burkolat között több százezer, vagy több millió érintkezésnek kell létrejönnie.

Bevezetés

Az atomerőművekben a hasadóanyagot tartalmazó kerámia tablettákat cirkónium burkolatban helyezik el.

A maghasadások során keletkező hasadási termékek többsége benn marad a tablettában, de egy-két százalékuk kikerülhet a burkolat alatti részbe. Ha megsérül a burkolat, akkor a fűtőelemrúd gázterében, illetve a tableta és a burkolat közötti résben található illékony és gáznemű radioaktív izotópok könnyen kijuthatnak a hűtővízbe.

A fűtőelemek döntő többsége megőrzi épségét a reaktorban töltött évek alatt. A statisztikák azt mutatják, hogy százezer fűtőelemből egy veszíti el az integritását normál üzemvitel mellett. Az üzemelési tapasztalatok szerint a fűtőelemek sokféle mechanizmussal válhatnak inhermetikussá a reaktorban. A fűtőelem szivárgását okozhatja gyártási hiba, korróziós folyamat, hidridképződés, a burkolat összeroppanása vagy mechanikai kopása. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség nyilvántartása szerint a kopásos sérülés valamennyi reaktortípusnál előfordul [1], [2], és a VVER reaktoroknál is az egyik domináns sérülési mechanizmus [3].

A burkolat kopását a hűtővízben keringő törmelék, vagy a fűtőelemmel érintkező szerkezeti elemek mechanikai hatása hozza létre. A törmelékek, amelyek a kopást okozhatják, általában a javítási, karbantartási munkák folyamán kerülnek a reaktorok hűtőkörébe. A szabadon levő fém törmelékek a hűtővízben keringve bekerülhetnek a fűtőelem-kötegekbe, a fűtőelem-pálcák és a távtartórácsok közé. A törmelékdarabok az áramló víz miatt sokszor nekiütköznek a burkolatnak és koptatják azt, vagy ki is lyukaszthatják. A hibák a kötegben bárhol létrejöhetnek a törmelék méretétől függően. A burkolat kopása bekövetkezhet a fűtőelem és a vele érintkező szerkezeti elemekkel történő (elsősorban a távtartórácsnál fellépő) súrlódás miatt is. A fűtőelem burkolat távtartórács alatti kopását több tényező is befolyásolja: a rázkódás frekvenciája és amplitúdója, az érintkező felületek közti nyomóerő, a fűtőelem-pálca rögzítésének minősége az alsó távtartóráccsal, valamint a távtartórács rögzítésének minősége [2]. A kopásra hatással van az is, hogy az

üzemeltetés alatt az egyes szerkezeti elemek mennyire tartják meg az eredeti geometriát.

A kopási folyamatban a burkolat és az idegen test, vagy távtartórács érintkezési felületén létrejövő elmozdulás nyírófeszültséget hoz létre. A kopás alapvetően ehhez a súrlódási munkához köthető. A kölcsönhatás során mindkét felület kopik – a keményebb anyag kopása kisebb mértékű, mint a puhábbé. Ennek megfelelően a fűtőelemek közé kerülő puha idegen test el is kophat azelőtt, hogy a burkolat sérülését előidézze. A burkolaton általában vékony oxidréteg található. A kopás első fázisában az oxidréteg megsérül és ennek eredményeként a lokális korrózió felgyorsulhat, ami ún. másodlagos meghibásodásokhoz vezethet.

A kopásos sérülésekről fontos információt szolgáltatnak a kiegészítő kazetták melegkamrás vizsgálatai [3][4]. A fűtőelemek kopását számos külföldi laboratóriumban vizsgálják. A kísérletek célja elsősorban a távtartórács optimális kialakítása [5]. A koreai KAERI intézetben a fűtőelemek és távtartórács érintkezési pontjainál fellépő kopást vizsgálták a FRETONUS nevű kísérleti berendezésben [6][7]. A berendezés normál üzemi paraméterekkel működött (320 °C és 15 MPa nyomás) vizes hűtőközegben. A reaktorban fellépő vibrációt mesterségesen idézték elő a rúd mozgásával. Az eredmények szerint a legnagyobb mértékű kopás akkor lépett fel, ha a vibráció körkörös irányú volt és egy kis rész maradt a rács és a rúd között (tehát a rács nem rögzítette elég erősen a rudat).

Franciaországban az EDF – a kopásos sérülések fontossága miatt – a távtartórács optimális kialakítására végzett kísérleteket [8]. A méréshez teljes kazettát használtak fel és egy speciális termohidraulikai hurokban különböző hidraulikai körülmények között végezték a vizsgálatokat. Különböző rács típusokból sikerült kiválasztani azt a fajtát, amely a legkisebb mértékben koptatja a burkolatot. A mérésekkel párhuzamosan végzett számítások rámutattak arra, hogy a kopásos sérülés – a fűtőelemek átmérőjének csökkenése miatt – leginkább a kampány végén várható.

Oroszországban a VVER-1000 kazettáknál tapasztalt kazetta görbülésével kapcsolatban végeztek teljes léptékű kopásos

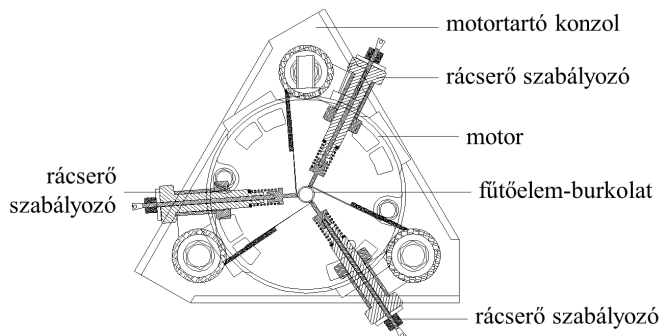
méréseket [9]. A mérésekből kiderült, hogy a kazetta 1-2 mm-es görbülésének eredményeként a rács és a rúd közötti rögzítő erő bizonyos pozíciókban negyedére csökken, és emiatt a kopás ezeken a helyeken könnyen kialakulhat.

A fűtőelem-burkolattal végzett hazai kísérleti program részeként sor került a kopásos folyamatok vizsgálatára is. A munka célja a fűtőelemek (távtartórács okozta, vagy idegen test jelenléte miatt fellépő) mechanikai kopását és az ezzel összefüggő sérülését jellemző körülmények meghatározása volt. A mérésekben olyan mennyiségeket próbáltunk meghatározni, amelyek jellemzik a burkolat és az idegen test közötti kölcsönhatást. Ilyen adatok ismeretében meg lehet becsülni, hogy milyen gyakorisággal kell egy fémdarabnak a burkolathoz ütköznie ahhoz, hogy lyuk keletkezzen, és a fűtőelem elkezdjen szivárogni.

A távtartórács okozta kopás vizsgálata

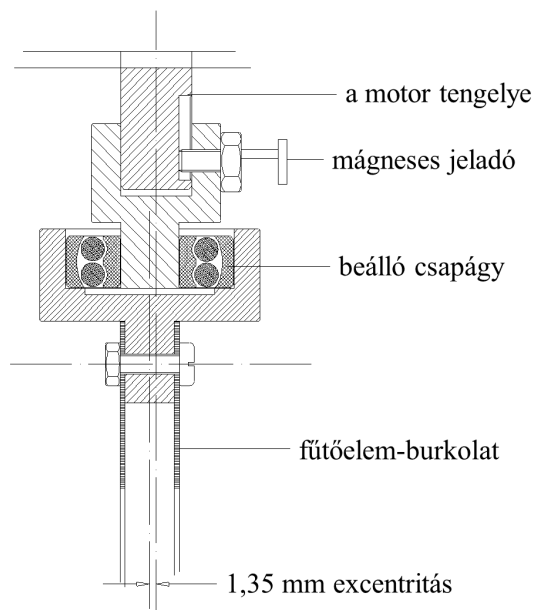
A távtartórács okozta kopás vizsgálatára létrehozott berendezésben egy fűtőelem-burkolat három ráccsal érintkezett (1. ábra). A rácsok az 50 cm hosszú mintadarab közepén, 120°-onként helyezkedtek el és egymástól függetlenül voltak rögzítve. Erre azért volt szükség, hogy a különböző nyomóerőket és réseket tudjunk beállítani. A kísérletekben rozsdamentes acélrácsokat használtunk, amelyek hasonlóak voltak a VVER-440 kazettákban korábban használt rácsokhoz. Később az orosz fűtőelemgyár áttért a cirkónium ötvözetből gyártott távtartórácsokra, ennek a koptató hatását egyelőre nem vizsgáltuk.

A rácsok és a függőleges álló rúd közötti relatív elmozdulást egy excentrikus agyon keresztül egy egyenáramú motor kényszerítette ki a rúd felső végén (2. ábra). A rúd alsó vége rögzítve volt. A tápfeszültség állításával a percnkénti ciklusszám egyszerűen szabályozható volt, amit egy külön erre a célra fejlesztett számláló áramkör mért.

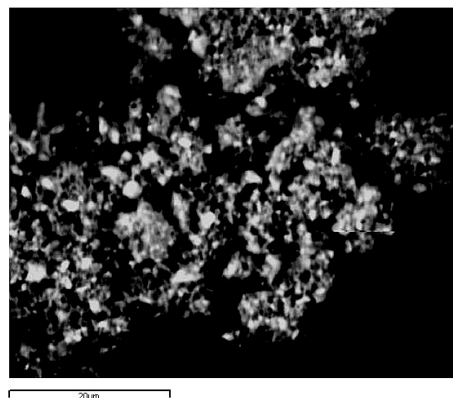


1. ábra: A távtartórács okozta kopás vizsgálatára használt kísérleti berendezés fő egységei

A kísérletek első sorozatát levegőben hajtottuk végre. Ebben az esetben egyszerűen össze tudtuk gyűjteni a vázszerkezet aljára felerősített korong alakú szűrőpapíron a kopás során keletkező port. Ebből becsülhető volt a minták kopásának mértéke. A további méréseket bórsavas vízben végeztük. A rudak kopása csak a vizes közegben haladta meg az egy nanogrammot ciklusonként. A kopás legnagyobb mélysége 140 μm volt, amelyet 60 millió ciklus után értünk el. A fűtőelem átlukadásához ennek körülbelül ötszörösére lenne szükség, ami 300 millió rezgést jelent. A 3. ábrán látható, hogy a mikroszkóppal egyedi szemcsékként megkülönböztethető legkisebb részletek néhány tized mikrométertől 1-3 mikrométerig terjednek.



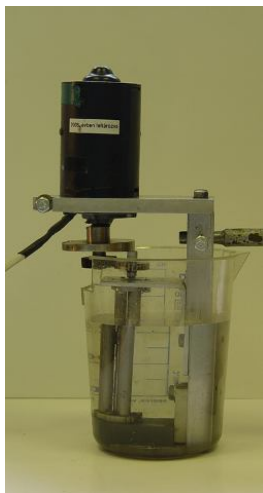
2. ábra: Az excentrikus agy keresztmetszeti rajza



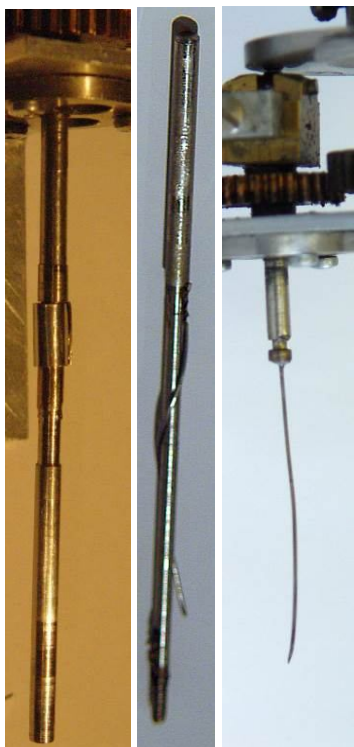
3. ábra: A pormintáról készült elektronmikroszkópos felvétel

Kopás a kazettába került idegen testek miatt

Három rúdból álló köteggel olyan esetet szimuláltunk, amikor a kazettába bekerül valamilyen idegen tárgy. A kazetta jellemző geometriai méreteiből kiindulva végeztük el a kísérleteket különböző méretű huzalokkal és lemezekkel. A VVER típusú reaktorok kazettáiban a 9,15 mm átmérőjű fűtőelemek 12,2 mm-es osztással háromszög rácson vannak elhelyezve, ezért ilyen geometriai elrendezésben végeztük a méréseket. A mérésekhez 100 mm hosszú, E110 típusú, 1% nióbbiumot tartalmazó cirkónium ötvözetből készült mintákat használtunk. A koptató anyagokat a három cső közé helyeztük el és egy villanymotorral forgattuk. Feltételeztük, hogy a törmelékek oldalirányú és függőlegesen alternáló mozgást képesek végezni a fűtőelemek közötti csatornában. Ezért a berendezést úgy alakítottuk ki, hogy a koptató mintadarab 3 mm alternáló mozgást is tudjon végezni. A berendezést bórsavas vízzel töltött edényben működtettük (4. ábra). A kopást okozó idegen testet egy 3 mm átmérőjű tengelyre lehetett rögzíteni. A méréseket a tengelyre rögzített acéllemezzel, spirál alakú huzallal és szabad mozgású acélhuzallal hajtottuk végre (5. ábra). A három idegen test különböző fajta acélokból készült.



4. ábra: A három rúd közé került idegen test által okozott kopás vizsgálatára készített berendezés



5. ábra: A három rúd közé helyezett idegen testek: lemez (bal), spirál (középső), szabad mozgású acélhuzal (jobb)

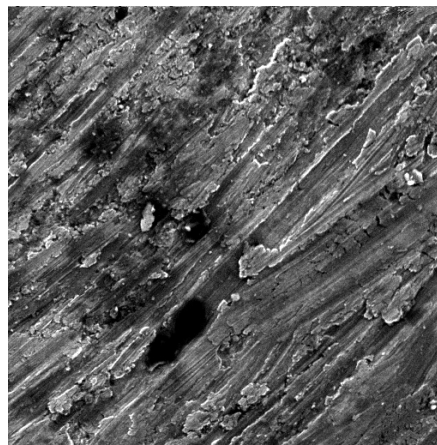
A 2 cm hosszú acéllemezrel végzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy mind a három cső egyenlő mértékben kopott. A különböző mérési sorozatokban az egy érintkezésre kapott, koptatott térfogatok jó közelítéssel azonos értékeket: $10\text{-}20\cdot 10^{-6}$ mm³/érintkezést mutattak. Az egy ütközéshez tartozó koptatott mennyiség néhányszor tíz nanogram volt.

A spirál alakú huzallal végrehajtott mérések után a mintadarabokon keletkezett legnagyobb bemarás mélységét mértük meg. Ennek értéke 0,26 mm volt 4,5 óra koptatási idő és 196020 ütközés után (az egy rúdra eső ütközések száma ennek harmadrésze). Az egy érintkezés hatására bekövetkezett átmérő csökkenés $1,33\cdot 10^{-6}$ mm volt. Ezt a fogyási ütemet alapul véve a burkolat átlyukadásához 160000 ütésre lett volna szükség az adott kísérleti körülmények között. A mérések során a huzal vége 0,19 m/s sebességgel forgott körbe és ilyen sebességgel érkezett a burkolat felszínére.

A szabad mozgású acél huzallal végzett mérések időtartama 25,5 óra volt, ez idő alatt több mint egymillió alkalommal ütközött a huzal a burkolatok falának. A mérést addig folytattuk, amíg az egyik cső fala teljesen átlyukadt. A hűtőközegben összegyűlt port lemérve megállapítottuk, hogy a három rúdról származó összes lekopott mennyiség kb. 500 mg volt. A csövek felületének vizsgálata után elvégzett számítások is azt mutatták, hogy a lekopott tömeg 500-550 mg tartományban lehetett. A vizuális megfigyelések jelezték, hogy a burkolat kopása nem csak a huzal végénél lépett fel, hanem a huzal oldala is érintkezhetett a csőfallal, és így egy háromszög alakú kopás jött létre (6. ábra). Az egy ütközéshez tartozó kopás ebben az esetben 4,5 µg volt. A szabadon mozgó huzal mintegy 3 cm hosszúságban koptatta a cső falát. A 6. ábra fényképein látható, hogy a három cső nem teljesen egyformán kopott. Valószínű, hogy az egyik cső kilyukadása után már a kezdeti szimmetria torzult és a kilyukadt cső gyorsabban kopott, mint a másik kettő. Az egy rúdra eső ütközések száma ebben az esetben 370260 volt, ami elegendőnek bizonyult a rúd sérüléséhez. Az elektronmikroszkópos felvételen (7. ábra) jól láthatóak a sérülések nyomai és kisebb, mikrométer nagyságú szemcsék is.



6. ábra: A szabad mozgású huzallal koptatott mintákról készült felvételek (a jobboldali minta lyukadt át)



7. ábra: A koptatott csődarabról készült felvétel (600-szoros nagyítás)

Összefoglalás

A VVER fűtőelemek kopásos sérülésének vizsgálatára kísérleteket hajtottunk végre E110 ötvözetből készült burkolattal.

A kísérletek eredményei szerint a távtartórács és a burkolat érintkezési pontjain akkor jött létre számottevő mértékű kopás, ha a rács nem rögzítette elég mereven a rudat. A legnagyobb mértékű kopást azokban a mérésekben tapasztaltuk, ahol a három rácsból az egyik nem érintkezett a felülettel. A fűtőelem burkolat kopása mellett jelentős mértékben kopott a rács anyaga is. Mindez az erőműben egy öngerjesztő folyamatot eredményezhet: a gyengén rögzítő rács kopása miatt a rögzítő erő tovább csökken, a szabad elmozdulás nagyobb lesz és a kopás egyre intenzívebbé válik. A porminták elemzéséből megállapítható volt, hogy a különböző koptatási kísérletekben keletkezett szemcsék mérete néhány tized mikrométertől néhány mikrométerig terjedt. A porszemcsék méretéből és az egy ütközéshez tartozó kopás tömegéből következik, hogy egy-egy ütközés során több ezer, vagy több millió szemcse válik le a burkolatról. A leváló szemcsék mennyiségét befolyásolja az idegen test és a burkolat érintkezési felületének a nagysága, az idegen test anyaga, valamint az ütközés sebessége.

A másik kísérlet-sorozatban olyan idegen testeket használtunk a fűtőelem burkolatának koptatására, amelyek elférnek a fűtőelemek között, és amelyeknek az aktív zónába bekerülése sem teljesen kizárt. A kiválasztott anyagok nagy keménységű fémek voltak, amelyeknél a burkolat jelentős mértékű kopása várható. Az elvégzett mérések konzervatívák voltak abból a szempontból, hogy az érintkezések során a villanymotor tengelyére rögzített idegen test és a burkolat között fellépő nyomóerő általában jóval nagyobb volt, mint ami a zónában, a fűtőelemek között szabadon mozgó idegen test és a burkolat közötti érintkezések során várható. A mérésekben az érintkezési pontok állandóak voltak – ez a zónába került idegen test esetében nem feltétlenül van így. A burkolat átlukadása különböző idegen testek jelenlétében több százezer, vagy több millió érintkezés után léphet fel a mérési eredmények szerint. A koptatásos mérésekben az idegen tárgy és a burkolat közötti egy érintkezésre meghatározott kopás tömege néhány tized nanogrammmal és több ezer nanogrammmal között változott a kísérleti feltételek függvényében. A reaktor zónájára jellemző nagy sebességgel áramló hűtőközegben a fűtőelemek közé szorult idegen test óránként több ezerszer is nekiütközhet a burkolatnak. A kísérleti eredmények megerősítették, hogy egy idegen test néhány nap, vagy hét alatt a burkolat átlukadását idézheti elő a reaktorban.

Köszönetnyilvánítás

A VVER fűtőelemekkel végzett kopásos méréseket az Országos Atomenergia Hivatal támogatásával hajtottuk végre az OAH/NBI-ABA-16/06 számú szerződés keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] *Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors*, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-2.1 (2010), <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/8259/Review-of-Fuel-Failures-in-Water-Cooled-Reactors>
- [2] Kyu-Tae Kim: *A study on the grid-to-rod fretting wear-induced fuel failure observed in the 16×16KOF fuel*, *Nuclear Engineering and Design*, 240 (2010) 756-762.
- [3] A.V. Smirnov, V.P. Smirnov, D.V. Markov, V.S. Polenok, B.A. Kanashov, V. Shishin: *Post-Irradiation Examinations of WWER-440 FA Provided with Stainless Steel Spacer Grids*, *Proceedings of IAEA TCM on Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation* (2002) 164-170. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1345_web/t1345_part2.pdf
- [4] V. Chirkov, V. Novikov, A. Sharikov: *Operation Experience of WWER-440 Fuel Assemblies and Measures to Increase Fuel Reliability*, *Proceedings of IAEA TCM on Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation* (2002) 117-122., http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1345_web/t1345_part1.pdf
- [5] Szilárd Kovács, Jürgen Stabel, Mingmin Ren, Bruno Ladouceur: *Comparative study on rod fretting behavior of different spacer spring geometries*, *Wear*, 266 (2009) 194-199.
- [6] H.K. Kim, Y.H. Lee, Y.H. Jung: *Analysis of the Slipping and Wear Behaviour at Grid-to-Rod Contacts under Simulated Fuel Fretting Environment*, *Proceedings of 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting*, 1028-1051.
- [7] Young-Ho Lee, Hyung-Kyu Kim: *Fretting wear behavior of a nuclear fuel rod under a simulated primary coolant condition*, *Wear*, 301 (2013) 569-574.
- [8] N. Baillon, N. Waeckel: *Grid to Rod Fretting Wear in EDF PWR from Operating Problems to New Designs Qualification Method*, *Proceedings of 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting*, 431-438.
- [9] Y.G. Dragunov, Y.N. Drozdov, V.V. Makarov: *The Effect of Friction Forces on the Operability and Service Lifetime for PWR Reactors*, *Proceedings of 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting*, 439-450.