

# Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés téziszfüzete



## **Atomerőművi fűtőelem-burkolatcsövek különböző időskálán végbemenő képlékeny alakváltozásának kísérleti és numerikus vizsgálata**

Készítette: Nagy Richárd

Témavezető: Dr. Hózer Zoltán

**Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola**

Készült:  
Energiatudományi Kutatóközpont



Budapest, 2022. május



## I. A kutatás előzményei

A vízhűtésű atomerőművi reaktorok (ezek közé tartoznak a jelenlegi, és az épülő paksi blokkok is) üzemanyaga  $^{235}\text{U}$  izotóppal dúsított urándioxid tablettákat tartalmaz, amelyek cirkónium ötvözetből készült burkolatban vannak elhelyezve [1]. A fűtőelemek burkolata lehetővé teszi a fűtőelemben keletkező hő elvitelét a hűtőközeg felé és megakadályozza a radioaktív hasadási termékek kikerülését a fűtőelemből. A paksi VVER típusú reaktorok fűtőelem pálcáinak burkolatanyaga olyan ötvözet, amely 99% cirkóniumot és 1% nióbbiumot tartalmaz [2]. A burkolatcsalád orosz megnevezése E110, amely amellet, hogy kopásálló, nagy szilárdságú, és üzemi hőmérsékleten ellenáll a reaktorban található közegnek.

Az atomerőművi fűtőelemek kutatásának alapvető célja a fűtőelemekben végbemenő folyamatok megismerése, a fűtőelemekre vonatkozó biztonsági kritériumok megalapozása és adatok szolgáltatása a reaktorok biztonsági elemzéseikhez használt fűtőelemviselkedési kódok numerikus modelljeinek fejlesztéséhez és validálásához. A hazai fűtőelemes kutatások elsősorban az Energiatudományi Kutatóközpontban folynak, a kísérleti munka a burkolatcsövek vizsgálatára koncentrál [3][4].

A doktori munkám során az EK-ban folyó kutatások közül két olyan mérési programban vettem részt, amelyekben a fűtőelemek burkolatának sérülését különböző időskálákon vizsgáltuk:

- A tabletták és burkolat közötti mechanikai kölcsönhatás akkor lép fel, amikor a fűtőelemben a tabletták és a burkolat közötti rés bezárul és a reaktoron olyan tranzienseket hajtanak végre, amelyek során a reaktor teljesítménye nő [5]. Ekkor a tabletták hőtágulása jelentős feszültséget hozhat létre a burkolatban. A felterhelés mértéke, valamint a burkolat állapota határozza meg, hogy létrejöhet-e fűtőelem sérülés ilyen esetben. A jelenség vizsgálatára szegmentált mandrel tesztet [6] fejlesztettünk ki.
- A fűtőelemek felhasadása olyan hűtőközegvesztéses üzemzavarok során léphet fel, amikor a hűtőközeg nyomása lecsökken és a szárazra került fűtőelemek burkolatának hőmérséklete jelentősen meghaladja az üzemi hőmérsékletet [7]. A kifelé mutató nyomáskülönbség és a magas hőmérséklet hatására a burkolat plasztikus deformációja indul el, ami a burkolat felhasadásához vezethet. A burkolatfelhasadásos kísérleteket magas hőmérsékletű berendezésekben hajtják végre úgy, hogy a mintadarabok belső nyomása jelentősen meghaladja a külső nyomást [8].

## II. Célkitűzések

2013-ban kapcsolódtam be az EK Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium munkájába. Az azóta eltelt időben több olyan kutatási programban vettem részt, amelyek a paksi atomerőmű biztonságos üzemeléséhez kapcsolódtak a fűtőelemek területén. A kísérleti és numerikus modellezési munkákban olyan feladatokat kellett megoldanom, amelyek az erőműben használt cirkóniumburkolatok sokoldalú vizsgálatához szükségesek voltak.

A doktori dolgozatban bemutatott kutatásokhoz kapcsolódóan a következő célkitűzéseket fogalmaztuk meg a laboratórium munkatársaival közösen:

- 1) A tablettá-burkolat mechanikai kölcsönhatás vizsgálatához létrehozott szegmentált mandrel berendezés tervezésekor számításokat kellett végezni a szegmensek számának és méretének optimalizálására. A mérési program elvégzése után numerikus modelleket kellett alkalmazni a mért adatok részletes kiértékeléséhez.
- 2) A cirkóniumburkolat magas hőmérsékletű felhasadásának méréséhez olyan vezérlést kellett kialakítani, amellyel különböző, előre megadott nyomásnövelési sebességekkel lehet a kísérleteket végrehajtani. A felhasadási folyamat részletes megfigyeléséhez meg kellett oldani, hogy optikai eszközöket lehessen csatlakoztatni ahhoz a kemencéhez, amelyben a fűtőelemek felhasadását vizsgáljuk.
- 3) A mérések során a mintákat a csökemencében, magas hőmérsékleten, nagy nyomású argon gáz segítségével belülről terheltük. A felfűvódott minták a nyomásnövekedés hatására végül felhasadtak. A gyorskamerás mérési adatok alapján ki kellett értékelni, milyen dinamikát követ a burkolat felfűvódása a felhasadás előtt és hogy milyen geometriai változások kísérik a folyamatot.
- 4) A gyorskamerás mérési adatok alapján meg kellett határozni a felhasadás jellemző időtartamát (azaz mennyi idő telik el a repedés megindulása és teljes méretű felnyílás létrejötte között).
- 5) Hőkamerás mérések alapján meg kellett vizsgálni, hogy létrejön-e lokális felmelegedés a burkolat felhasadásakor és ha igen, akkor annak milyen a mértéke.

### **III. Vizsgálati módszerek**

#### **A mandrel mérés numerikus modellezése**

A végeelemes modellezéshez MSC Marc, általános célú, implicit végeelem számító programot használtam, amelynek elő- és utószámításait a Mentat programmal végeztem. A Mentat lehetővé teszi, hogy pontokból, az azokat összekötő görbékből, és az ezek által határolt felületekből elemi geometriai alakzatokat építhessünk fel. Az elemi alakzatokat kiterjeszthetjük térbeli testekké. A testeket elforgathatjuk, eltolhatjuk, nagyíthatjuk, vagy ezeknek a transzformációknak a kombinációit alkalmazhatjuk. Ezzel a programmal könnyen és jól definiálhatók az összeérő testek, és a határfelületek pedig elkülönülnek a számítás során. A modellezett rendszerben külön egységként, részletes geometriai leírással és hálózással definiáltam a nyomótüskét, a mandrel szegmenseket és vizsgálat tárgyát képező cirkóniumgyűrűt. A futtatások során a mandreleket szétfeszítette az egyenletesen közéjük nyomott nyomótüske.

A modell fejlesztése során homogén, izotróp anyagtulajdonság-eloszlást alkalmaztam. A képlékenységi számításokat a cirkónium csőmintán értelmeztem. Az effektív sűrűdési együtthatót úgy állítottam be, hogy a számított nyomóerő maximális értéke megfeleljen a mért erő maximális értékének. A különböző mértékben hidrogénezett minták mért adatainak illeszkedése alapján megállapítottam egy olyan paramétert, amellyel az alap folyásgörbét transzformálva a szimuláció visszaadta a mért paramétereket.

#### **Optikai eszközök a burkolatfelhasadás megfigyeléséhez**

A fűtőelem burkolatcsövek magas hőmérsékletű felfűvódásának és felhasadásának méréshez egy speciális mérőberendezést kellett építeni, mely egy magas hőmérsékletű csökemencéből, egy optikai rendszerből és egy nyomásszabályozó rendszerből állt.

A kemence függőleges elrendezésű, elektromos csökemence volt, amely 300 mm hosszú egyenes és állandó hőprofil tudott biztosítani a mérésekhez. A kemence izoterm jellegét a kevésbé szigetelt kémelölönyílás elrontja, erős hőáramlás indulhat meg kifelé, ami miatt a kemence hőprofiljának szimmetriája eltorzul. Ezért a fűtőelem felfűvódás és felhasadás megfigyelését egyedileg tervezett, zárt tubusú optika segítségével végeztem.

A kemencében felfűvődő minta átmérőinek változását videóméréssel határoztuk meg. Ehhez terveztem egy olyan kémlelőnyílást, amelybe képkicsatoló optikai távcső szerelhető. A dupla csőből álló tubus lehetővé tette, hogy a távcsőtubus hőtágulás során a lencsék ne mozduljanak el, és ne roppanjanak össze a kemence kikapcsolását követő lehűlés során. A teleszkóp a tőle 50 mm távoli, 8 cm-es méretű képről képes volt jó minőségű képet készíteni egy kamera segítségével. A távcső az 1000 °C hőmérsékleten is fókuszálható maradt. Az optikai rendszerhez különböző kamerákat csatlakoztattam a mérések során.

- Hagyományos, színes (DSLR), 4000×4048 (HD) kamerát, amely 60 fps (képfelvétel másodpercenként) időfelbontásra volt képes.
- Egy 100.000 fps felbontásra is képes gyorskamerát (CMOS), amellyel a kicsatolt fény és a megfigyelt tértartomány méretének megfelelő térbeli és időbeli felbontású felvételeket lehetett készíteni (jellemzően 500×200 pix felbontással).
- InfraTec Image IR-5300 HP típusú, 300 mm átmérőjű, f/3 fényerős germánium lencsével és QWIP típusú, Peltier hűtésű, InSn anyagú, 2-5 mikron spektrumban működő, CMOS infravörös detektorral szerelt kamerát, amellyel a felvételek 350 fps idő- és 512×640 pix térbeli felbontással készültek.

### **Nyomásszabályozás a burkolatfelhasadásos mérésekhez**

A paksi fűtőelem-burkolatokkal végrehajtott kísérleti programok többségében izoterm méréseket hajtottunk végre lineáris nyomásnöveléssel. A nyomásnövekedés állandó értéken tartása érdekében olyan vezérlést terveztem, amely a nyomásrendszerben lévő túszelepet léptetőmotor segítségével, a mért nyomásadatok alapján szabályozta. A túszelep szárához erősített hatpólusú, unipoláris típusú léptetőmotor (Sanyo StepSyn 103-770-4243) nyitotta vagy zárta. Ehhez a National Instruments LabView® programban létrehozott, egyedileg programozott Virtual Instrument (VI) modulokat használtam, amelyekkel egy Measurement Computing UBS-2408 típusú mérőegység D/A konverter kimeneti csatornáit irányítottam. A léptetőmotor lépéseit az határozta meg, hogy a felhasználó által megadott nyomásnövekedés minimum és maximum értéke a mért differencia-hányadoshoz képest mekkora. A nyitás és zárás másodpercenként ötször történt, és a lengések a puffertartályban kiegyenlítődték, így a nyomásnövekedésben megfelelő pontosságot lehetett elérni. 0,02 bar/s és a 6 bar/s között bármely nyomásnövekedési ütemet be lehetett állítani, amit a szabályozó tartani is tudott.

## IV. Új tudományos eredmények

1. Elkészítettem a mandrel berendezés vége-selemes modelljét, amely tartalmazza a hálózást és a képlékeny alakváltozást leíró összefüggéseket. Az elemzések alapján javaslatot tettem arra, hogy az szerszám-cél mandrelek hány szegmensből álljanak és milyen méretben készüljenek, hogy képesek legyenek deformáció és tönkremenetel nélkül elviselni a mandrel mérés során fellépő terheléseket. Megállapítottam, hogy a mandrel szerszámok számának növelésével a minta belső felületére ható terhelés „egyenletesebb”. A mandrel berendezés vége-selemes modelljét alkalmazva sikeresen reprodukáltam az alapállapotú és a különböző mértékben hidrogénnel töltött minták mérésakor kapott erő-elmozdulás görbéket, amelyek megfelelően illeszkednek a mért görbékhez [T1, T2, T3].

2. A burkolatfelhasadásos mérésekhez olyan szabályozó és mérőeszközöket terveztem, amelyek lehetővé tették az atomerőművi fűtőelemek hűtőközegvesztéses üzemzavari körülmények között feltételezett sérülésének részletes követését. Megterveztem és elkészítettem egy olyan léptetőmotor vezérlést, amely számítógépes virtuális műszerhez illeszkedik és képes úgy mozgatni egy nagynyomású argon gázt adagoló túszelepet, hogy a mintában a nyomás 0,02 bar/s – 6 bar/s között beállított értéket 0,998 relatív pontossággal tartva, lineárisan növekedjen. Sikeresen megterveztem és megépítettem egy olyan optikai képkicsatoló távcsövet, amelynek a képe a teljes látómező 75%-ig torzításmentes, és amely 1000 °C-on nem roppan szét a hőtágulás és a nagy, környezeti hőmérsékleti gradiens következtében. A távcső tubusa illeszthető a kemence retortájához, a távcső pedig üzemi hőmérsékleten is könnyen fókuszálható és a fénykicsatoló kilépő pupillájához tetszőleges optikai műszer vagy kamera illeszthető [T4]. E munka során tehát egy teljesen új, komplex mérőberendezés mérési adatgyűjtő, nyomásszabályozó és optikai részegységeit terveztem, építettem meg és teszteltem, amely végül lehetőséget adott a felfúvódás és felhasadás mérésére és annak optikai megfigyelésére.

3. A 2. tézispontban bemutatott berendezéssel végzett felfúvódásos és felhasadásos kísérletek videomérési adatai alapján megállapítottam, hogy a felfúvódás két jól elkülöníthető szakaszból áll. A körülbelül 800 °C-on, a cirkónium  $\alpha$ - $\beta$  fázisátalakulási tartományában, és 0,5 bar/s körüli nyomásnövelési sebességgel felfúvódó, E110 és E110G ötvözetből készült, 10

darab, optikailag megfigyelt minta átmérője először, a felhasadási nyomás 60-85%-át elérve lassan, a minta teljes hossza mentén egyenletesen növekedett. A felhasadási nyomás 96-99%-ánál lokális felfúvódás indult meg, amely során a minták legnagyobb átmérője egymáshoz hasonló kinetikával, ugrásszerűen megnőtt a felhasadást megelőzően. A lokális felfúvódással egy időben a minták tengelye a lokálisan felfúvódott régióban elgörbült [T5, T6].

4. A hagyományos kamera segítségével megfigyeltem, hogy a görbült tengelyű minta görbületének „belső felén” mindegyik, kamerával rögzített esetben, forró folt jelent meg, a minta felhasadása pedig a forró folt helyén történt. A gyorskamerával látott három felhasadás ezt alátámasztja, továbbá a gyorskamerás felvételek képsorainak adatai alapján rámutattam, hogy a körülbelül 800 °C-on, 0,5 bar/s körül beállított nyomásnövekedés hatására felhasadó burkolaton létrejött repedés kialakulásának és kinyílásának ideje 0,1-0,12 millimásodperc volt. A repedésterjedést egy minta esetében gyorskamerás eljárással sikerült rögzíteni [T5, T6, T7].

5. Hőkamerás mérések adatai alapján bebizonyítottam, hogy a felfúvódott, elgörbült minta konvex oldalán megjelenő forró folt nem csak optikai jelenség, hanem a képlékeny alakváltozás instabillá válása során jelenik meg, és a fém gyors alakváltozásához kapcsolható, valódi lokális felmelegedést mutat. Megmértem a keletkezett forró folt hőmérsékletét. Sikerült megmutatni azt is, hogy a forró folt a repedéscsúcson jelenik meg. A kis hőkapacitású csóminta a hozzá képest igen nagy hőtehetetlenséggel rendelkező kemencében állandó hőmérsékleten marad, kivéve azt a pontot, ahol a minta felhasad [T8].

## **V. Az eredmények hasznosítási lehetőségei**

A megalkotott végeelemes modell tovább fejleszhető. A súrlódás (zsírzás) hatásvizsgálata mellett az oxidált minták réteges anyagösszetételét is szimulálható a programmal. A vékony falú, E110G ötvözetű burkolatcsőből készített minták mérési eredményeihez új számítások illeszthetők.

Az elkészített mérőberendezést a napjainkban is felfúvódás és felhasadás mérésre használja a laboratórium. A berendezésben ma vékonyfalú E110G és különböző, fejlesztés alatt álló balesetálló minták mérését és ezek összehasonlító elemzését végezzük.



A burkolat felfúvódás és felhasadás során használt optikai mérési eljárása alkalmazható lehet a break-away oxidáció, és más gyors jelenségek megfigyelésére.

Mind a szimuláció, mind a mérések eredményei hasznosíthatók a FRAPTRAN 2.0 tranziens fűtőelemviselkedési kód továbbfejlesztéséhez.

## VI. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [T1] **R. Nagy**, M. Király, D. Antók, L. Tatár, Z. Hózer: *Dynamic finite element analysis of segmented mandrel tests of hydrogenated E110 fuel cladding tubes*, **Materials Today Communications** <sup>IF(2022): 3,383</sup>, Volume 24, p8, (2020)
- [T2] M. Király, M. Horváth, **R. Nagy**, N. Vér, Z. Hózer: *Segmented mandrel tests of as-received and hydrogenated WWER fuel cladding tubes*, **Nuclear Engineering and Technology** <sup>IF(2022): 2,341</sup>, 53: 9 pp. 2990-3002, p13, (2021)
- [T3] **Nagy R.**, Király M., Horváth L., Antók D. M., Tatár L., Uri G., Cselovszki J., Vér N., Horváth Á., Novotny T., Perezné Feró E., Hózer Z.: *Atomerőművi fűtőelem burkolat csövek képlékenységének vizsgálata mandrel módszerrel*, **Nukleon**, XII. évfolyam 221, (2019)
- [T4] **R. Nagy**, M. Király, T. Szepesi, A. G. Nagy, Á. Almási: *Optical measurement of the high temperature ballooning of nuclear fuel claddings*, **Review of Scientific Instruments** <sup>IF(2022): 1,523</sup>, 89. Dec., (2018)
- [T5] **R. Nagy**, M. Király, T. Szepesi, A. Nagy, Á. Almási: *Optical observation of the ballooning and burst of E110 and E110G cladding tubes*, **Nuclear Engineering and Design** <sup>IF(2022): 1,869</sup>, Volume 339, 1 December, Pages 194-201, (2018)
- [T6] **Nagy R.**, Király M., Szepesi T.: *Atomerőművi fűtőelem burkolat csövek felfúvódásának és felhasadásának optikai vizsgálata üzemzavari körülmények között*, konferenciakiadvány, XII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás és 10. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban konferencia, 2021. március 17-19., **anyagvizsgaloklapja.hu**, **Anyagvizsgálók lapja**, 2021/III., (2021)

- [T7] **R. Nagy**, M. Király, T. Szepesi: *Visual Observation of Ballooning and Burst Phenomena of VVER Fuel Claddings*, conference letter, **Water Reactor Fuel Performance Meeting**, September 10 – 14, Jeju, South Korea, (2017)
- [T8] **R. Nagy**, M. Király, P. Petrik, Z. Hózer: Infrared Observation of Ballooning and Burst of Nuclear Fuel Cladding Tubes, **Nuclear Engineering and Design** <sup>IF(2022): 1,869</sup>, 371 Paper: 110942, pages 9, (2020)

## VII. További saját tudományos közlemények

- [T9] Szabó P., Hózer Z., Kulacsy K., Somfai B., **Nagy R.**, Burján T., V. Baracska I., Pintér T., *Numerical simulation of the telescope sipping of a leaking VVER fuel assembly*, **Annals of Nuclear Energy** <sup>IF(2022): 1,776</sup>, 99 pp 345-352 (2017)
- [T10] Petrik P., Sulyok A., Novotny T., P.-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 ZrO<sub>2</sub>*, **Applied Surface Science** <sup>IF(2022): 6,707</sup>, 421 pp 744-747 (2017)
- [T11] G. Mayer, **R. Nagy**, I. Nagy, *An experimental Study on Critical Heat Flux in Vertical Annulus Under Low Flow and Low Pressure Conditions*, **Nuclear Engineering and Design** <sup>IF(2022): 1,869</sup>, 310 pp 461-469 (2016)
- [T12] Petrik P., Agócs E., Kalas B., Fodor B., Lohner T., Nádor J., Saftics A., Kurunczi S., Novotny T., P.-Feró E., **Nagy R.**, Hámori A., Horváth R., Hózer Z., Fried M., *Nanophotonics of biomaterials and inorganic nanostructures*, **Journal of Physics-Conference Series**, 794 Paper 012004. 10 p. (2017) 19th International School Condensed Matter Physics, Varna, Bulgária, (2016)
- [T13] M. Király, Z. Hózer, D. M. Antók, M. Horváth, I. Nagy, **R. Nagy**, T. Novotny, E. Perez-Feró, N. Vér: *Overview of the experiments performed with Russian claddings at MTA EK*, **TopFuel-2016: LWR Fuels with Enhanced Safety and Performance**, Boise, Amerikai Egyesült Államok (2016)
- [T14] 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** <sup>IF(2022): 2,936</sup>, Volume 508, Pages 423-433, (2018)

[T15] 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, *Secondary Hydriding Experiments and Simulation on Zr1%Nb Claddings*, **TopFuel-2018**, (2018) <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0134-fullpaper.pdf>

## VIII. Hivatkozások

- [1] Csom Gy.: *Atomerőművek üzemtana II. Az energetikai atomreaktorok üzemtana 4. rész*, szerzők: Trampus P., Hózer Z., Vajda N., Beliczai B., Zsolnay É., Csom Gy., **egyetemi tankönyv/szakkönyv**, (2012)
- [2] V. V. Geraszimov, A. Sz. Monahov: *A nukleáris technika anyagai*, **Műszaki könyvkiadó**, Budapest, (1981)
- [3] E. Perez-Feró, Cs. Győri, L. Matus, L. Vasáros, Z. Hózer, P. Windberg, L. Maróti, M. Horváth, I. Nagy, A. Pintér-Csordás, T. Novotny: *Experimental database of E110 claddings exposed to accident conditions*, **Journal of Nuclear Materials**, 397, Pages 48-54, (2010)
- [4] Z. Hózer, L. Maróti, P. Windberg, L. Matus, I. Nagy, Gy. Gyenes, M. Horváth, A. Pintér, M. Balaskó, A. Czitrovsky, P. Jani, A. Nagy, O. Prokopiev, B. Tóth: *Behavior of VVER fuel rods tested under severe accident conditions in the CODEX facility*, **Nuclear Technology**, 154, Pages 302-317
- [5] J. K.-H. Karlsson: *Ramp Testing at the Studsvik R2 Reactor 1969-2005*, **TopFuel-2021**, (Santander, 24-28 October, 2021).
- [6] K.-F Nilsson, O. Martin, C. Chenel-Ramos, J. Mendes: *The segmented expanding cone-mandrel test revisited as material characterization and component test for fuel claddings*, **Nuclear Engineering and Design**, Volume 241, Issue 2, Pages 445-458, (2011)
- [7] F. J. Erbacher, S. Leistikow: *A review of Zircaloy fuel cladding behavior in a loss-of-coolant accident*, KfK 3973, **report**, Kernforschungszentrum Karlsruhe Germany, (1985)
- [8] P. Fedotov, A. Kumachev, V. Kuznetsov, V. Novikov; A. Salatov, M. Sypchenko, A. Alexeev, A. Goryachev, O. Dreganov, A. Izhutov, I. Kisseleva, V. Shulimov, Y. Pimenov: *LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor*, Proc. **TopFuel-2015**, Page 391-400, (2015)