

Atomerőművi fűtőelem burkolat csövek felfúvódásának és felhasadásának optikai vizsgálata üzemzavari körülmények között

Nagy Richárd^{a1, a2}, Király Márton^b, Szepesi Tamás^c

^{a1}Energiatudományi Kutatóközpont, tudományos segédmunkatárs, nagy.richard@ek-cer.hu

^{a2}Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, PhD hallgató

^bEnergiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, kiraly.marton@ek-cer.hu

^cEnergiatudományi Kutatóközpont, tudományos munkatárs, szepesi.tamas@ek-cer.hu

Absztrakt

Az atomerőművi fűtőelem burkolatnak el kell viselnie a hűtőközegvesztéses balesetek (LOCA) során kialakuló állapotokat. Amikor a vízdoldali nyomás megszűnik, a felmelegedő fűtőelem burkolat felfúvódik, felhasad. A hűtőközegvesztéses baleseti események kísérleti modellezésére kifejlesztettünk egy új kísérleti berendezést, amelynek oldalára kamera szerelhető. Ebben a kiadványban a videókamerás (optikai) mérés eredményeit mutatjuk be.

Abstract

Nuclear fuel must remain intact during the loss-of-coolant-accident (LOCA) scenario. In the case of LOCA, ballooning and cracking may occur. A new experimental equipment was built with optical instrument to reveal ballooning and burst phenomena.

Kulcsszavak

fűtőelem-burkolat, felfúvódás, felhasadás, videómérés, hűtőközegvesztéses baleset

Keywords

fuel cladding, ballooning, burst, videomeasurement, loss-of-coolant-accident

1. Bevezetés

Az orosz típusú nyomottvizes atomerőművekben használatos, az üzemanyag tablettákat tartalmazó fűtőelem burkolatok cirkónium ötvözetből készülnek. A VVER típusú reaktorokban ma az E110 és az újonnan fejlesztett E110G jelű burkolatanyagokat használják, amely 1% nióbiiumot tartalmazó cirkónium ötvözetek. Ezek a vékonyfalú csövek elegendően erősek és megfelelően rugalmasak, a cirkónium neutronbefogása pedig igen csekély. A burkolat további feladata, hogy megakadályozza a sugárzó anyagoknak a fűtőelemből való kikerülését.

Különösen fontos, hogy a burkolat magasabb hőmérsékleten, a csökkenő folyáshatár ellenére is ellássa feladatát, és erősen oxidáló közegben is megmaradjon az integritása. A fűtőelem burkolatnak el kell viselnie az úgynevezett hűtőközegvesztéses balesetek (LOCA – loss of coolant accident) során kialakuló termomechanikai állapotokat. Normál üzem során a primer körű hűtővíz nagy átmérőjű csöveken a gőzfejlesztőbe szállítja az aktív zónában keletkezett hőenergiát, ám egy csőtörés során a magas nyomású és hőmérsékletű (123 bar és 300°C) hűtővíz elforr és a fűtőelem burkolatok szárazra kerülhetnek. Amikor a reaktorvédelmi rudak beesnek az aktív zónába, akkor a láncreakció azonnal leáll, azonban a maradványhő ennek ellenére jelentős marad, a hűtés nélkül maradt fűtőelem burkolat külső felszíni hőmérséklete pedig elérheti a 800-1000°C-ot. LOCA esetén a vízdoldali nyomás megszűnik, a felmelegedő fűtőelem burkolat belső nyomása pedig jelentőssé válik. A kialakult nyomáskülönbség hatására a burkolat maradandó alakváltozást szenved, felfúvódik, a cső fala elvékonyodik, ezzel a cső terhelhetősége jelentősen csökken, ami a cső falának további deformációját, majd a felület megrepedését, azaz felhasadását eredményezi. Mindeközben a hűtővízből keletkezett gőz oxidálja a burkolat külső falát, a cirkónium-vízgőz reakciókban keletkezett hidrogén pedig a cirkóniumban oldódik. A cirkónium ezáltal elridegedik, elveszíti rugalmasságát. A hűtőközegvesztéses üzemzavar végén hideg vízzel árasztják el a hűtendő fűtőelemeket, amely során a hősokk hatására a fűtőelem burkolata további sérülést szenvedhet [1-12].

Az Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelemek és Reaktoranyagok Laboratóriumában a hűtőközegvesztéses baleseti események kísérleti modellezésére kifejlesztettünk egy új kísérleti berendezést, amely a következő elven működik: egy elektromos kemencében állandó, magas hőmérsékleten tartott fűtőelem burkolat mintába egyenletes ütemben argon gázt adagolunk, amíg az fel nem hasad, miközben folyamatosan mérjük a gáznyomást.

A mérés során meg tudtuk határozni a különböző állapotú minták felfúvódásához szükséges nyomást 700-1000°C közötti hőmérsékleten, 0,01-6 bar/s nyomásnövekedési ráta mellett. A felfúvódott minták felfúvódás közbeni viselkedésének tanulmányozása érdekében egy olyan kemencét terveztünk, amelynek oldalára kémlelőnyílás szerelhető. A kémlelőnyílásba olyan optikai leképezőrendszert terveztünk és építettünk, amely a kemence üzemi hőmérsékletén képes jó minőségű képet szolgáltatni a fűtőelem burkolat felfúvódásnak kinetikájáról, azaz meg tudtuk határozni az átmérőváltozás ütemét.

A XII. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás (RAKK) és 10. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban (AGY) Konferencián bemutatott előadásban ezt a kísérleti berendezést, a mintaelőkészítést és a kapott mérési eredményeket mutattuk be.

2. A kísérleti berendezés leírása

2.1 A kemence és a nyomásnövelő rendszer

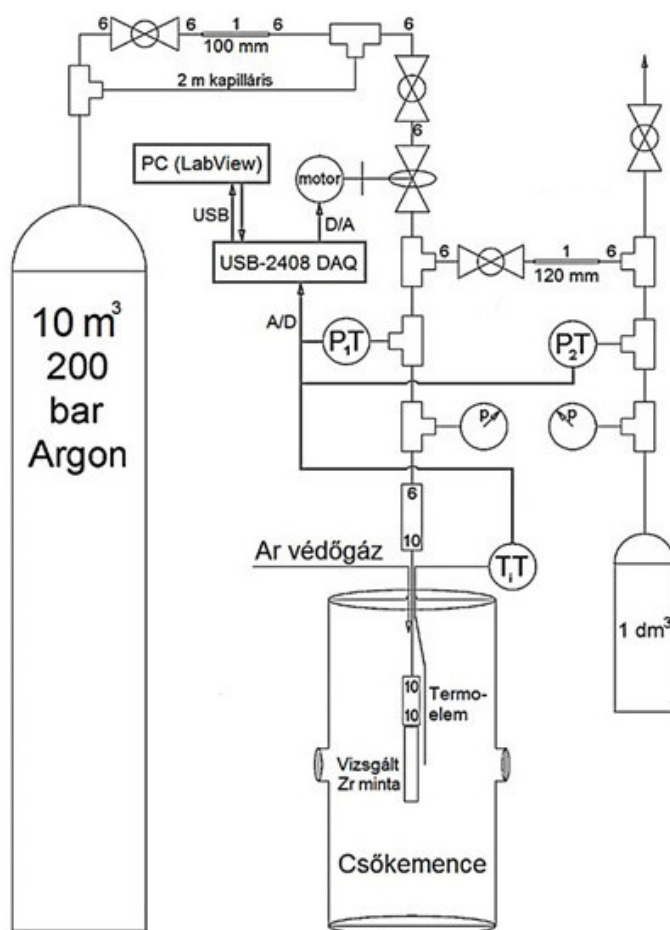
A minták állandó magas hőmérsékletét egy egyedileg gyártott, háromzónás, függőlegesen szerelt csökemencével biztosítottuk. A kemence retortája 104 mm belső átmérőjű, 500 mm hosszúságú, rozsdamentes, hőálló acélból készült. A mintát a felső kemencefedélen kialakított csőcsokon át lógattuk be a kemence terébe. A minta felszínéhez közel elhelyezkedő, K-típusú termoelem segítségével mértük a minta hőmérsékletét, és ezzel szabályoztuk a kemence fűtését is. A kemence belső terét nagy tisztaságú argonnal töltöttük meg, hogy megakadályozzuk a minták és a kemence alkatrészeinek magas hőmérsékletű oxidációját. A mérés előtt elvégeztük a kemence hőprofiljának mérését. A mérés előtt megvártuk, amíg a kemence felmelegszik a célhőmérsékletre. A mérések szerint a kemence képes volt egy 350 mm-es középső tartományban 3°C-on belül egyenletes eloszlású, és időben állandó hőmérsékletet tartani.

A mintákat E110 és E110G jelű erőművi fűtőelem burkolat csövekből készítettük. A csövek külső átmérője 9,1 mm, a burkolatok falvastagsága 0,67 mm volt. A két anyag 1% nióbbiummal ötvözött cirkónium volt, amelyben kis különbség mutatkozott az ötvözetben mérhető nyomelemek összetételében (az E110G-ben tízszer több a vas és tízedannyi a hafnium, mint az E110-ben). A két ötvözet között a balesetállósági jellemzőkben tapasztaljuk a legnagyobb különbséget: az E110G ötvözet magas

hőmérsékletű oxidációs tulajdonságai kedvezőbbek az E110 ötvözeténél.

Az esztergával levágott minták hossza 85 mm volt, az egyik végükre cirkóniumból készített dugót, a másik végükre pedig 10 mm hosszú acél perselyt hegesztettünk, majd erre, a hidraulikában használatos, roppantógyűrűs acél csatlakozó szerelvényt erősítettünk. A roppantógyűrűs csatlakozó szerelvényhez 10 mm átmérőjű impulzuscsövet csatlakoztunk. A kemencén belül ezen az impulzuscsövön át adagoltuk az argon gázt a mintába (1. ábra). A minták cseréjét egy nyomásálló gyorscsatlakozó egyszerűsítette, ami kemencén kívüli szerelést tett lehetővé, így a felhasadt és a mérésre előkészített minták cseréje egy mozdulattal lehetséges volt.

A nagynyomású argon gázt a 200 bar nyomású argon gázpalackból impulzus csöveken vezettük a minta belsejébe. Az argon palackból kivezetett impulzuscső két, egymástól függetlenül kicsatolható ágon haladhatott: az egyik ágat egy 0,7 mm belső



1. ábra: A felfúvódás mérés nyomásrendszerének vázlatja. (PT a nyomástávadó, TT a termoelem jele, D/A és A/D a digitális-analóg és analóg-digitális konvertálás, a LabView a PC vezérlőegységen futó szabályozó és adatrögzítő program, a számok pedig a használt acélcsövek külső átmérőjét és a kapillárisok hosszát jelzik.)

átmérőjű, 100 mm hosszúságú acélcsővel szereltük, a másikat pedig 2000 mm hosszú, 0,23 mm belső átmérőjű kapillárisal töltöttük meg. A két cső közbeiktatásával a különböző nagyságú nyomásnövekedéseket hasonló pontossággal tudtunk létrehozni a mintában. A kisebb kapilláris oldali argon bevezetést 0,01-0,1 bar/s mintában mért nyomásnövekedés esetén használtuk, míg a nagyobb kapillárisal el tudtunk érni 0,1-6 bar/s nyomásnövekedést.

A kísérlet végrehajtása során a nyomás növekedésének időben lineárisnak kellett maradnia. Az ettől való eltérést vagy a csatolóelemek pontatlan tömítettsége, vagy a minta térfogatváltozása okozza. Sikerült megtervezni és megépíteni egy olyan nyomásszabályozót, amely mindkét hibára egyszerre képes korrekciót végezni, és amely a korrekciót dinamikusan is stabil módon végzi. A mintába vezetett argon gázt léptetőmotorral működtetett túszelepen keresztül juttattuk a mintákba. A túszelep nyitásával és zárásával az argont képesek voltunk a megfelelő ütemben adagolni.

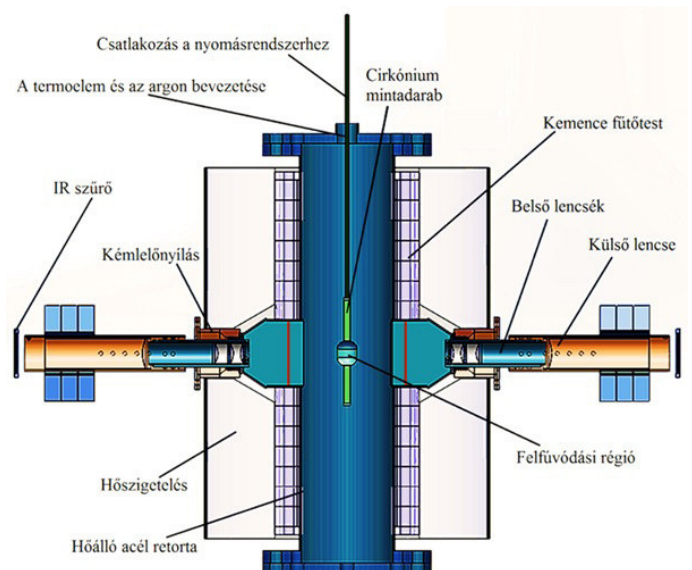
A minta előtti csőszakasz közepén, egy 24 V egyenfeszültséggel működő, Suco HP1000 típusú, 200 bar mérés határral rendelkező induktív nyomástávadót szereltünk be. A nyomástávadót WEHO MS-50-24 típusú, kapcsolóüzemű egyenfeszültség-generátorra kötöttük. A nyomástávadó kimenetén megjelenő 4-20 mA jelet 0-5 V feszültségre konvertáltuk egy mérőellenállás segítségével. Ezt az analóg feszültség jelet Measurement Computing USB-2408 típusú vezérlővel 24 bites digitális jelekké alakítottuk át, és a mérőszámítógép által generált időadatokhoz rendeltük a mérési adatokat. A tápfeszültség állandóságát megmértük, és megállapítottuk, hogy 99,9%-os pontossággal tartotta a szükséges feszültséget, amellyel feltételezhettük, hogy a mérőberendezés egésze ennél pontosabb mérésre nem alkalmas, azonban ez a mérési pontosság a céljainknak megfelelő volt. A nyomástávadó kalibrációja során a nyomásrendszert 10 bar-onként állandó nyomásértéken tartottuk. A nyomástávadó jelét a nyomásegyensúly beállása után rögzítettük és egy gyárilag kalibrált, mechanikus bourdon-csőves manométer által megmért nyomásértékhez rendeltük. A nyomástávadó karakterisztikájából tudható, hogy annak válaszejele 4-20 mA tartományban lineáris, így a kalibrációs görbére egyenest illesztettünk. A továbbiakban ezzel a kalibrált értékkel számoltunk [13].

A nyomástávadóból származó nyomásadatot National Instruments LabView© 2014 felületen fejlesztett, egyedi VI (virtual instrument) segítségével

dolgoztuk fel. A nyomástávadó feszültségjelét kalibrálás után a program segítségével átszámoltuk nyomásra, majd a bejövő adatokból időbeli differenciálhányadost számolva a szabályozó rendszer megállapította, hogy a beállított nyomásnövekedési rátához képest mennyit változott az aktuális adat. A 0,1%-nál nagyobb elérések esetén a léptetőmotorral nyitottunk (vagy zártunk) a szelepen. Végeredményben olyan szabályozót kaptunk, amely másodpercenként többször tudta korrigálni a mintába áramló argon mennyiségét. A VI a léptetőmotort 520 lépés/fordulat felbontású üzemmódban vezérelte. Ezt a módot az egyedi tekercekre kapcsolt vezérlőárammal valósítottuk meg. A léptetőmotor mozgatására a vezérlő áramkörben egyenáramú teljesítményerősítőt alkalmaztunk.

2.2 Az optikai megfigyelőrendszer

A mintát a kemencében a hőmérséklet egyenletes tartományának közepébe igyekeztünk pozícionálni. A kemence hengersizmetriáját alapul véve a minta helyét a középvonalban határoztuk meg. A kemence oldalában egymással szemben kémlelőnyílásokat alakítottunk ki. A hőálló acélból készült optikai befogadócsonkok hőhidat képeztek a kemence szigetelőtestén keresztül. Az akár 300°C-kal is hűvösebb csonkok külső peremei és a behelyezett optika elemei a velük szemben elhelyezkedő optikának elegendően nagy kontúrral eltérő, sötét háttérrel biztosítottak, így a 800-1000°C-os minták képe éles kontúrvonallal határolódott el a háttérképétől (2. ábra).



2. ábra: A méréshez használt csőkemence keresztmetszeti rajza a távcsövekkel és a mintadarabbal

A lencserendszer tárgylencséje a mintától 10-15 mm-re helyezkedett el a kemencetést belsejében, amely így a kamerakon 50 mm hosszú mintaszakaszról alkotott éles, torzításmentes képet. A kép közepén az optika asztigmatizmusa nem számottevő, azonban a képek szélein már szemmel is látható torzításokat mutat. Az optikai pontosságot 3 mm rácsoztású, 1 mm drótvastagságú hőálló acél referencia test mérésével határoztuk meg. A burkolat minták mérése során a kiindulási méret pixelskála-alappontját az ismert 9,1 mm külső átmérőhöz illesztettük.

Az optikai elemeket a pozíciójukból adódóan hőterhelésnek tettük ki, amelyre az optikát méretezni kellett. A lencsék anyagát úgy választottuk meg, hogy törésmutatójuk 1000°C hőmérséklet-különbségre sem változzon meg annyira, hogy a lencsékben kialakult nem-egykristály zárványok határfelületén képhiba alakulhasson ki. Így Suprasil-1 egykristály lencséből készítettük a lencserendszer optikai elemeit. Az objektív egy 45°-os látómezejű, három síkdomború lencsetagú, képhibára korrigált kondenzor lencserendszer, amelynek eredő fókuszához illesztettünk egy kameralencsét. A kicsatoló lencserendszer optikáját vékonylencsékkel nem lehetett előállítani, mert a mintához közel eső lencsékben 10°C/mm hőmérsékleti gradiens alakult ki mérés közben, amely a vékony lencsék repedéséhez vezethetett volna. A vastag lencsék geometriáját mátrix optikával számoltuk ki, majd két dimenziós, SythRays numerikus modellel ellenőriztük a számolás helyességét. A kemence retortájában kialakított fűtőszálak között a legnagyobb lehetséges kémlelőnyílás 32 mm átmérőjű lehetett, ebből az optikai kicsatolóelem tubusa is elfoglal néhány mm helyet, így a tárgylencse 27 mm átmérőjűnek adódott. A tárgytávolság és a Suprasil-1 üvegyanyag törésmutatója alapján a sík-domború lencsék 40 mm görbületi sugarú paraboloid lencsék lettek.

Az ilyen geometria 6,6 mm vastag, 22 mm görbületi sugarú lencsét adott, amelyekből hármat 20 mm távolságban helyeztünk el, egymás mögé a fényútban. A lencsét 27 mm külső átmérőjű, 1 mm vastag kvarccső darabokkal támasztottuk egymásnak. A kvarccső-lencse sorozat tagjait felülköztettük a külső optikai tubus falában kialakított tartónak, és rögzítettük egy belső távtartóval (3. ábra). A távtartót a lencsék és a rozsdamentes tubus hőtágulása után tudtuk a végleges helyén

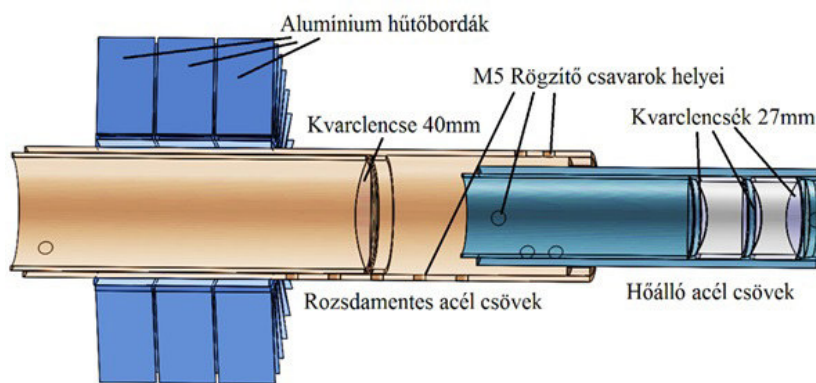
rögzíteni, biztosítva ezzel a lencsék végső pozícionálását. A bontható, kettős falú tubus lehetővé tette a kemence falában a lencsék szabad hőmozgását az acél tubusban, így hőfeszültség okozta repedést az üvegben nem tapasztaltunk.

Az optika kilépő pupillája egy 40 mm átmérőjű, kétszeres fókusz távolságú kvarc lencse volt. Ezt a lencsét hasonló, kettős falú rozsdamentes acél tubusban rögzítettük. Az optika tubusára hűtőbordákat szereltünk. Az objektív és a kameralencse egymáshoz képest mozgatható, így az optika akár üzemi hőmérsékletű kemence esetén is fókuszálható [13].

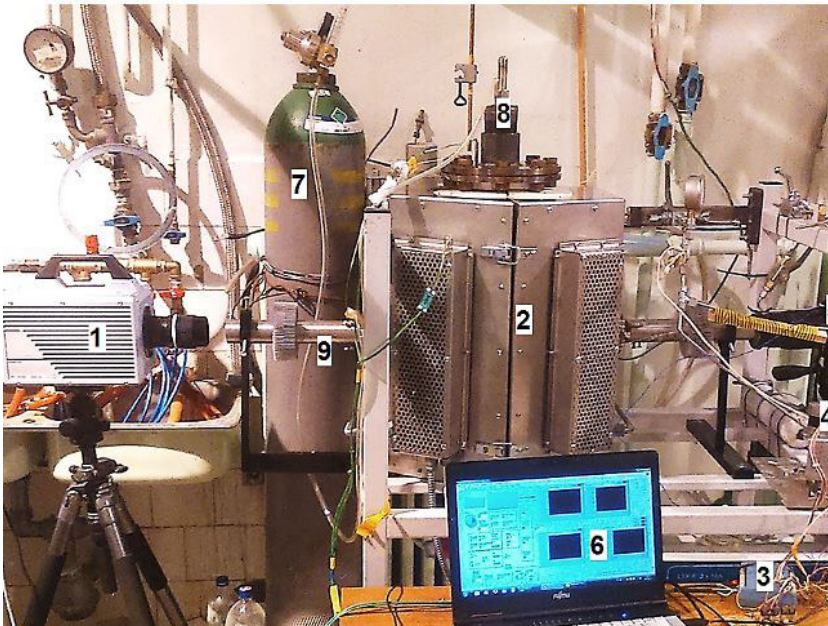
2.3 A kísérletet rögzítő kamerák

A mérés során az egyik teleszkóp kilépő pupillájához DSLR kamerát illesztettünk, melynek felbontóképessége 50 kép/másodperc (FPS – frames per second) volt, fullHD elbontásban. A másik optikához illesztett kamera kísérletről kísérletre változott. A hagyományos kamera használatakor azt vártuk, hogy a felhasadás és az elhajlás vagy az egyik, vagy a másik irányból válik megfigyelhetővé, vagy mindkét irányból láthatunk oldalra felhasadó mintát. A terveinknek megfelelően a kémlelőnyílások hőprofilban okozott inhomogenitása miatt a melegb, oldalsó régiók felhasadását vártuk, de nem így történt. Nagy számú minta hasadt fel a kamera irányában és oldalirányban is egyaránt.

A Wigner Fizikai Kutatóintézetrel közös együttműködésben gyorskamerát alkalmaztunk egyes mérések során. A gyorskamera Photon SA-5 típusú, hátsó megvilágítású, monokromatikus CMOS kamera volt. A kamera saját vezérlőprogramja (Photon FastCam Viewer) segítségével lecsökkentettük a kiolvasott képmezőt a minta körüli területre a gyorsabb felvétel érdekében, majd folyamatos felvételt készítettünk, beállításoknak megfelelően 2,000-100,000 FPS



3. ábra: A felfűvődés megfigyelésére szolgáló távcső modelljének keresztmetszete



4. ábra: A mérés képe: középen a kemence (2), előtte a mérést vezérlő laptop a LabView programmal (6), mellette az adatrögzítő doboz (3) összekötve a léptetőmotorral (4). A bal oldalon a gyorskamera (1), jobbra egy tükröreflexes fényképezőgép (5) látható a távcsövek (9) előtt, melyekkel a mérést rögzítettük. A minta a cserélhető kemencefejhez van rögzítve (8), mellette a kemenceteret mosó argon gázpalackja (7)

sebességgel. A kamera véges memóriája folyamatos üzemben vette fel a képeket, azonban hamar megtelt. A 800°C -on, $0,5 \text{ bar/s}$ nyomásnövekedés mellett, a várható 90 bar felhasadási nyomás esetén 3 perc hosszúságú videófelvételre volt szükség, azonban a gyorskamerában csak 5 másodperc megfelelő memória állt rendelkezésre, ezért post-triggert használtunk, vagyis a felhasadás után a felvételt leállítva a kamera memóriájában lévő utolsó 5 másodperc nyi felvételt mentettük el. A kísérleti berendezés fényképe a 4. ábrán látható [13, 14].

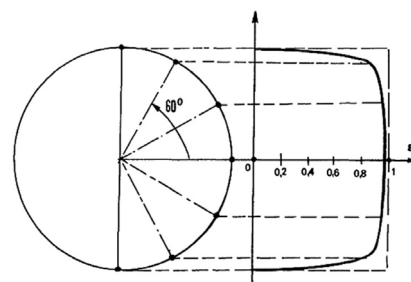
2.4 A hőkamerás mérés leírása

A felhasadás közbeni hőjelenségek megfigyelésére infravörös kamerával is végezzük méréseket. A felhasadó minták felfűvődésének utolsó 3 másodperc t egy InfraTech IR 3500-HP típusú, 350 FPS sebességű hőkamerával rögzítettük. A kamera a közepes infravörös tartományban volt érzékeny, $2,0$ és $5,7 \mu\text{m}$ hullámhossz között, detektora Peltier-hűtésű, In-Sb bolométer érzékelőkből állt, a lencse egykristály germánium volt. Mivel a kamera közvetlenül a minták által kibocsátott infravörös fény intenzitását mérte, így a teleszkópot kivettük a foglalatból, azért, hogy a kameralencsék anyaga

ne módosítsa az emittált spektrumot, azonban így közvetlenül a mért mintára láttunk rá. Emiatt nem tudtuk kihasználni a teljes képezőt, de a rögzített képeken meg lehetett határozni azt a tartományt, ahol a mérés elfogadható hibával rendelkezett. A kamerát a kamera gyártója által kifejlesztett IRBIS-3 program vezérelte. A kamera nyers fényintenzitás adatokat küld, melyeket a program rögzít, majd utólagos kalibrációval és a paraméterek beállításával lehet az intenzitást hőmérsékletre váltani. A hőmérsékletmérés elérhető legnagyobb pontossága 800°C -on $0,1^{\circ}\text{C}$ volt.

Az infravörös felvételeken jól azonosítható volt a laboratórium szobahőmérsékletű visszavert sugárzása a minta felületén, a kép közepén. A hengeres felületről emittálódó infravörös fény intenzitása a felület normálisától függő értéket vesz fel, így a minták szélei annak ellenére hidegebbnek látszanak, hogy a minta bizonyosan állandó hőmérsékletű volt. A felületi normális irányától függő emissziós koefficiens változását a minta

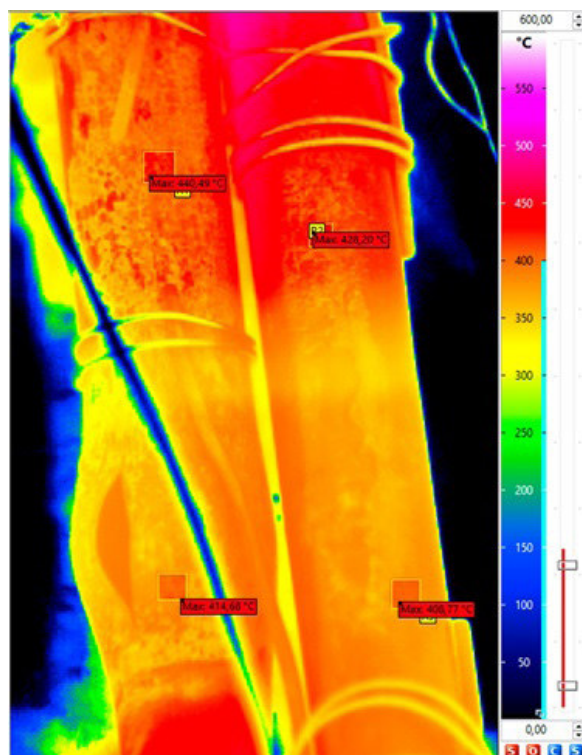
nagy részén figyelmen kívül hagyhattuk, mert a minta középvonalától definiált 60° azimutszögnél kisebb szögekhez tartozó felületekről érkező fény mennyiség elhanyagolhatóan változott (5. ábra). A szögfüggő korrekciót úgy vettük figyelembe, hogy a minta hőmérsékletét kizárólag a szimmetriavonalhoz közeli tartományokon mértük.



5. ábra: Egy hengeres test emissziójának szögfüggése – 60° azimut alatt az emissziós koefficiens változása elhanyagolható

A mérés és a minták paramétereit kemencén kívüli és kemencén belüli mérésekkel, illetve a kamera gyártó laboratóriumában végzett mérésekkel határoztuk meg. A kalibrációs mérések eredményei szerint a mintán látható vékony oxidréteg emissziós koefficiens megkülönböztethető a tiszta fémétől, de nem mutat nagy eltérést a tiszta fém emissziós koefficienséhez képest.

Mivel apró törmelékek szakadnak le a mintáról, és ezek a törmelékek nagy sebességgel repülhetnek ki a kémlelőnyíláson, ezért a hőkamera használata előtt a kémlelőnyílást 1 mm vastag polietilén fóliával zártuk le. A használatos védőfólia transzmissziójának megméréséhez egy felhasadt, enyhén oxidált, és egy fel nem hasadt, nem oxidált mintát mértünk a kamerával úgy, hogy a fóliával csak a látómező felét takartuk ki. Ezen mérés során, ahogyan a kemencében történő kalibrációk alkalmával is, K típusú termoelemmel határoztuk meg a mérendő minták felszíni hőmérsékletét. A fólia a kép (6. ábra) alsó felében látható, a kép kontrasztosságának megváltozásával jól azonosítható. A kalibráció során az elkészített képen látható infravörös kép ugyanarra a hőmérsékletre felhevített mintáról készült. Jól látható a tiszta fém és az oxidált felületek emissziós koefficiens-különbsége miatti látszólagos hőmérsékletkülönbség. A mérés alapján a fólia infravörösben 90%-os transzmisszióval rendelkezik.



6. ábra: A bal oldali a felhasadt, 5-ös számú minta, a jobb oldali egy nem használt minta a kemencén kívül végzett kalibrációs mérés során

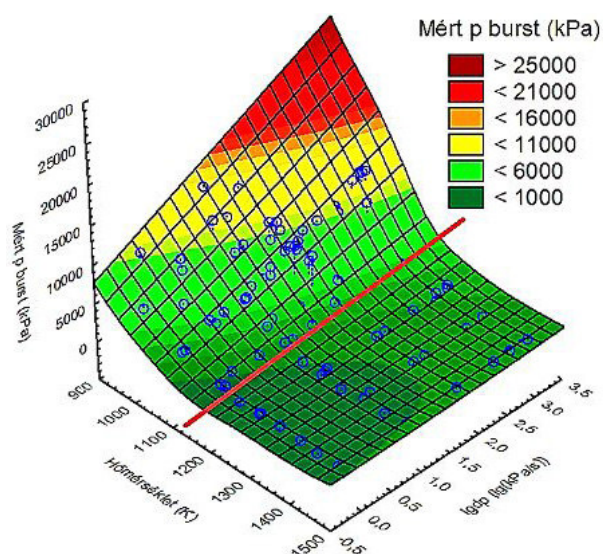
3. A mérési eredmények

3.1 A felhasadás mérés eredményei

A felhasadás során a felhasadás időpillanatát a legnagyobb nyomás értékéhez kötöttük. A nyomás időbeli változását a legtöbb esetben, jó közelítéssel, egészen a felhasadás pillanatáig egyenessel tudtunk közelíteni. A felhasadás során a nyomás atmoszférikus szintre esése egy-két mérési pont elkészítési ideje alatt megtörtént, ami jelzi a jelenség rendkívül rövid idejét, és bár az analóg nyomástávadó erre képes is lehetett volna, de az A/D átalakító ehhez túl lassú volt.

A méréssorozatot három csoportban hajtottuk végre. Az első sorozatban két hagyományos kamerát alkalmaztunk a minták átmérőjének időbeli változásának megfigyelésére, és az E110 és E110G mintákra megmértük a 700-1000°C közötti hőmérsékleteken beállított, különböző nyomásnövekedési sebességeken tapasztalható felhasadási nyomást. A kapott értékeket a 7. ábrán foglaltuk össze. Az eredmények alapján 900°C alatt a burkolatok felhasadási nyomása erősen függ a nyomásnövelési sebességtől, mivel lassú nyomásnövelés mellett a mintáknak van ideje kúszni, és az emiatt elvékonyodó fal alacsonyabb nyomásoknál hasad fel. Ezzel szemben 900°C fölött a minták jóval alacsonyabb nyomáson felhasadnak és lassabb nyomásnövelés mellett sincs idő a burkolat kúszására, így jelentős különbség sem mutatkozik a felhasadási nyomásokban.

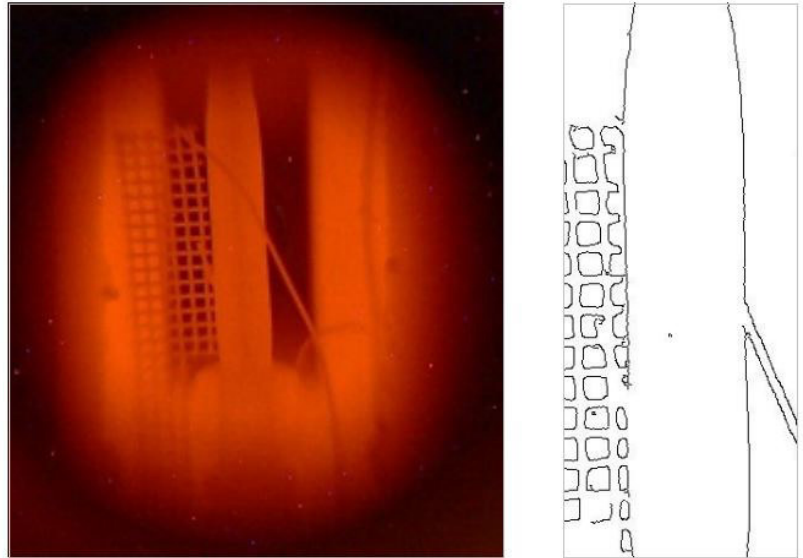
Ezután a sorozat után az egyik kamerát gyorskamerára cseréltük. A harmadik sorozatban hasonló méréseket végeztünk a hőkamerával is. A gyorskamerás és a hőkamerás méréssorozatban a legnagyobb mértékű átmérváltozást figyeltük meg a legextrémebb felhasadás mellett. A fenti kívánalmaknak a 800°C hőmérsékleten 0,5 bar/s nyomásnövekedés felelt meg a legjobban.



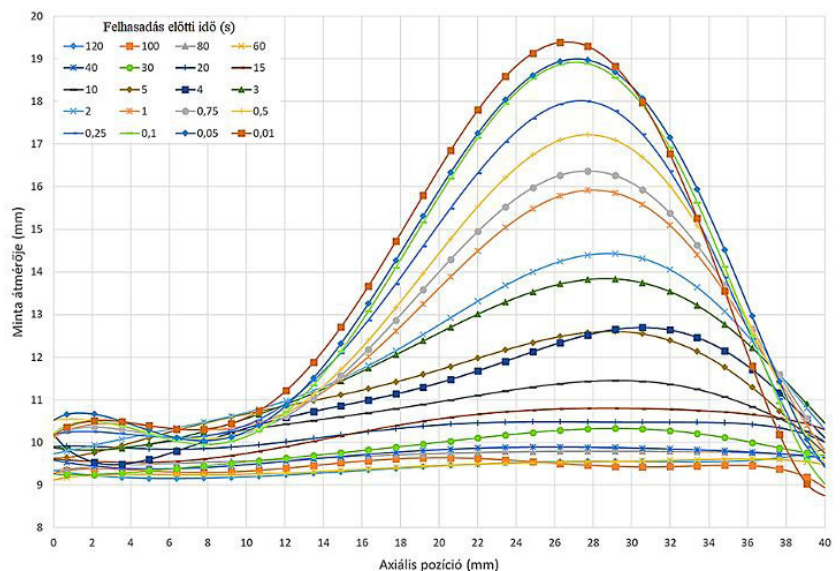
7. ábra: A mért felhasadási nyomás a hőmérséklet és a nyomásnövelési sebesség függvényében, logaritmikusan ábrázolva. A kék pontok a mérési adatok, a jobb oldali ábrán a piros vonal a kétféle illesztés határát mutatja

3.2 A rögzített videók kiértékelése

A mérések közben rögzített videókat képkockákra bontottuk. Minden videónál megállapítottuk, hogy melyik az az időpont, amelyet a felhasadás időpillanatának definiálhatunk, majd ehhez a referencia időpillanathoz képest számoztuk a képkockákat. A DSLR videómérések időbeli felbontása (50 FPS) összemérhető volt az adatrögzítés időfelbontásával (4 Hz). Megadtuk a felhasadási időponthoz tartozó kép idejét, majd hozzá illesztettük a nyomásmérésben meghatározott felhasadási időt. Ezzel elő tudtuk állítani a minta átmérőváltozásának nyomásfüggését. Az képkockákhoz kézi, majd algoritmusos mintaátmérő-meghatározó algoritmust fejlesztettünk ki. A manuális mérés során egy képfeldolgozó programban nyitottuk meg a képeket, majd azokon kézzel határoztuk meg a minta egymással szembe eső kontúrvonalait. A minta szélénél kerestünk egy olyan narancssárga sávot, amely a mintához tartozik, de a hűvös kémlelőnyílás sötét háttérének színeitől nagyban eltér. Ezzel könnyen megkaptuk a minta kontúrvonalát (8. ábra). A kontúrvonalat alkotó képpontok távolsága megadta a minta átmérőjének időbeli változását. A manuális átmérő-meghatározást később az algoritmizált képfeldolgozás ellenőrzésre használtuk. A fel nem fúvódott minta eredeti átmérőjéből (9,1 mm) át tudtuk skálázni a felfúvódott minta átmérőjét pixelkoordinátából milliméter egységekbe. A 9. ábrán látható egy felfúvódó minta alakváltozása az idő függvényében.



8. ábra: A feldolgozó program bemenetén megadott eredeti mérési videó (balra) és a kimenetként kapott videó ugyanazon időhöz tartozó képkockája (jobbra)



9. ábra: Egy vizsgált minta képfelismeréssel kapott átmérőváltozása az időben, 800 °C hőmérsékleten, 0,4 bar/s nyomásnövelési sebesség esetén, különböző axiális pozíciókban, a felhasadás előtti idő függvényében

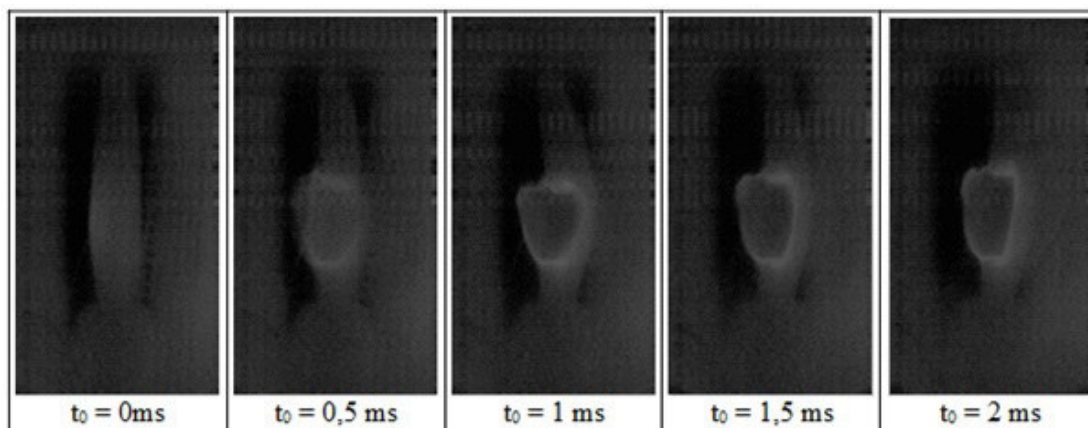
3.3 A gyorskamera felvételek eredményei

A gyorskamera képein kontúrvonal kereső algoritmust nem alkalmaztunk, a felvételeket algoritmusos kiértékelésnek nem vetettük alá, hiszen a teljes felfúvódás idejének csak az utolsó részét volt képes rögzíteni a kamera. Azonban a rövid záridőnek köszönhetően a felhasadáshoz kapcsolódó, eddig ismeretlen jelenségeket sikerült megfigyelnünk.

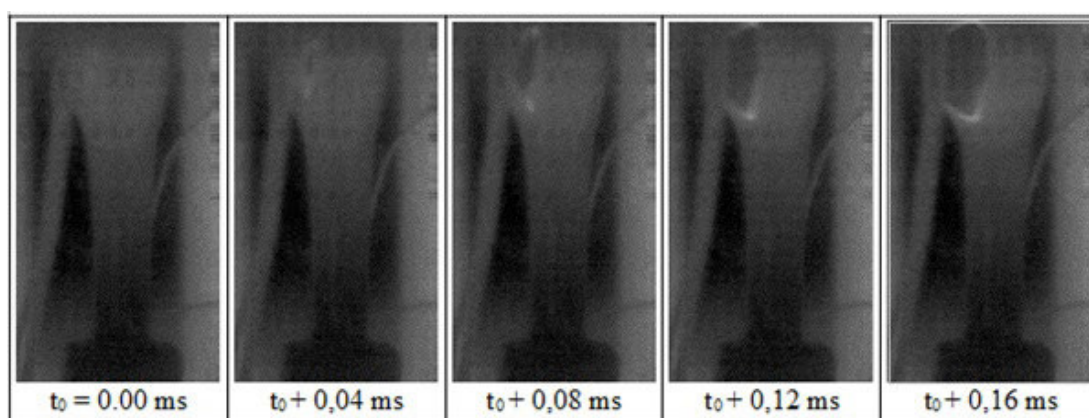
A gyorskamerás mérés során két esetben a felhasadás a kamera irányába történt. A 10. ábrán látható a felhasadást közvetlenül követő rugalmas elhajlás a kitóduló argon miatt. A fűtőelem burkolat

azonban nem a felhasadáskor kitóduló argon rakéthatása miatt görbül el maradandóan, hanem már a felfúvódási szakaszban, az egyenetlen felfúvódás miatt. [14, 15]. Látható, hogy a kitóduló argon adta löket bár jelentős alakváltozással jár, a deformáció megmaradására nincs idő ilyen rövid, ütösszerű terhelés esetében.

A nagy sebességű kamera lehetővé tette a felhasadó fűtőelem burkolaton keletkező repedés terjedésének megfigyelését. A 11. ábrán látható a repedés terjedése, valamint hogy a burkolat felhasadása nem tartott 6 képkockánál hosszabb ideig.



10. ábra: Egy minta 2000 FPS sebességgel rögzített felhasadása. A felhasadás előtti és az azt követő képkockákon jól látható a rugalmas kihajlás, mely 2 ms alatt eltűnik



11. ábra: Egy minta felhasadásának folyamata 25000 FPS sebességgel felvett képeken

A felhasadás során több esetben, a DSLR és a gyorskamerás mérés esetében is egyértelműen azonosítható volt egy forró folt megjelenése. A 10. és 11. ábrán látható, hogy a felhasadás előtt a felfűvódött terület és a felhasadást követően a repedés éle fényesebb marad. Ezt a foltot megemelkedett hőmérsékletűnek feltételeztük [15]. Feltételezésünk szerint a nagy nyomású argon mechanikai munkájának tulajdonítható be a felhasadást megelőző forró folt kialakulása a minta felszínén, a felhasadás pozíciójában [16].

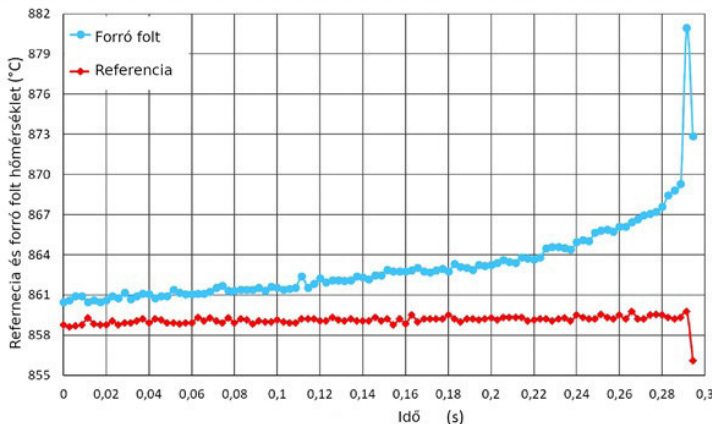
3.4 A forró folt megjelenésének bizonyítása

A kialakult forró folt a hőkamerás mérések esetén is jól láthatóan a repedéscsúcsokon volt a legintenzívebb. A felhasadást megelőző forró folt és a repedés terjedési irányába eső csúcsainak felmelegedését megfigyelve differenciális hőmérést alkalmaztuk. Ebben az esetben nem határoztuk meg a minta pontos hőmérsékletét, csak a megfelelő pixelek relatív hőmérséklet-változását az egész, egyenletes hőmérsékletűnek feltételezett minta

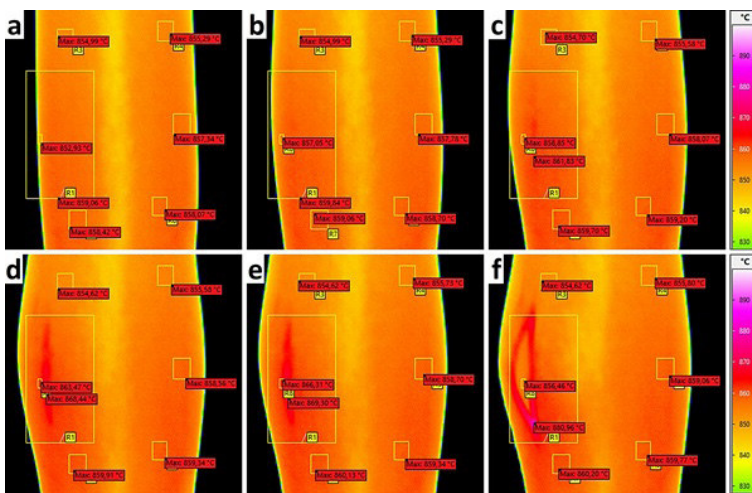
átlaghőmérsékletéhez képest.

A mérést kiértékelő programban a mintákon kis jelölőnégyzetekkel határoltuk körbe a differenciális hőmérsékletméréshez használt referenciafelületeket. Ezek a mérőfelületek oxidált és nem oxidált felszíni foltokat egyforma mértékben tartalmaztak és a minta képének közepére szimmetrikusan helyezkedtek el. Ezek a felületeken kijelölt összes pixel egyedi hőmérsékletének átlagát vettük referencia hőmérsékletnek. A forró folt helyét körbevettük egy nagy jelölőnégyzettel. A jelölőnégyzetbe eső pixelek közül a legmelegebbet kerestük, és azt tekintettük az aktuális forró folt, vagy a repedéscsúcs helyének [16].

A forró folt megjelenését bizonyítandó, nyolc darab E110G anyagból készített mintát mértünk meg 0,5 bar/s nyomásnövelés mellett, körülbelül 850°C-on. A minták forró foltjának megjelenése azonosítható volt azokon a mintákon, ahol a felhasadás oldalirányban, illetve a hőkamera irányában történt. Ellenben egyáltalán nem tudtunk semmilyen forró foltot azonosítani azon a mintán, amely éppen a hőkamerával ellentétes irányban hasadt fel.



12. ábra: A forró folt maximuma és a referencia felületek átlaghőmérséklete a felfúvódás és felhasadás során



13. ábra: Egy burkolat minta felhasadásának infravörös kamerás felvétele a felhasadás pillanatában (a képkockák az felhasadás előtti két másodpercben készültek)

A minták egyike az infravörös kamera látóterében hasadt fel. A forró folt a 12. és 13. ábrákon látható módon mintegy 10°C-ot melegedett a felhasadás előtt, majd a felhasadás után a repedéscsúcs további 10°C-kal volt melegebb a minta többi részénél. A legmelegebb pont pozícióját a korábbi feltételezéseknek megfelelően a forró foltként megjelenő vörös terület közepe táján, majd a felhasadást követően, pontosan a repedéscsúcsok valamelyikén találtuk. Mivel a felhasadás pillanatában beleláthattunk a repedésbe, így ott is megmérhettük a minta belső felületének hőmérsékletét. A minta belseje nem lehetett oxidált ezeken a felvételeken, mivel a belső nyomást nagy tisztaságú argon gázzal értük el. Megállapítottuk, hogy a kívülről oxidált felületek valóban enyhén eltérő emissziós koefficienssel jellemezhetők (feltételezve, hogy a teljes fémfelület állandó hőmérsékletű volt), azonban ez az eltérés nem számottevő, és a vizsgált jelenség ennél sokkal nagyobb hőmérsékleteltérést okoz.

4. Összefoglalás

Az atomerőművi fűtőelem burkolat csövek felhasadásának és felfúvódásának mérése során a hűtőközegvesztéses üzemzavari körülményeket szimuláltuk. Építettünk egy kísérleti berendezést, amelyben megfigyelhettük a magas hőmérsékleten és nyomáson bekövetkező felfúvódás kinetikáját. A berendezés egy egyedi, kémlelőnyílásokkal és teleszkópokkal ellátott csökemencéből, egy precíziós nyomásrendszerből, valamint egy szabályozó és adatgyűjtő egységből állt. A két magas hőmérsékleten használható teleszkóphoz hagyományos és gyorskamerát illetve megfigyelhettük a felfúvódást, valamint a repedés kialakulását és terjedését a felhasadás során. Meg tudtuk mérni a felhasadási nyomást E110 és E110G jelű burkolat csövekből készített minták esetén egyaránt, 700-1000°C közötti állandó hőmérsékleteken, különböző nyomásnövekedési sebességek mellett. A nyomásnövelés sebességének csak 900°C alatt volt jelentős szerepe a felhasadási nyomásra.

A kamerával rögzített kísérleteket elemeztük és automata módszert fejlesztettünk a minták átmérőjének meghatározására. A legnagyobb átmérőváltozást 800°C-on láttuk, a minták eredeti átmérőjük kétszeresére duzzadtak a felhasadás előtt. A gyorskamerával rögzített mérések kiértékelésekor azt találtuk, hogy a minták a felfúvódással azonos időben elgörbülnek, a konvex oldalon forró folt jelenik meg, majd a minta 0,1 ms idő alatt felhasad. A forró folt melegedését hőkamerás méréssel igazoltuk, a forró folt nagyságrendileg 10°C-os lokális hőmérsékletemelkedést jelentett a felhasadás előtt, majd a repedéscsúcs a felhasadás során szintén jelentősen felmelegedett.

Irodalomjegyzék

- [1] Z. Hózer, Cs. Győri, M. Horváth, I. Nagy, L. Maróti, L. Matus, P. Windberg, J. Frecka: Ballooning Experiments with VVER Cladding. Nuclear technology, Vol. 152 No. 3 (2005) pp. 273-285
- [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. 17th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, ed. B. Comstock and P. Barberis (West Conshohocken, PA: ASTM International) 2015, pp. 932-951
- [3] W. Wiesenack: Summary of the Halden Reactor Project

- LOCA test series IFA-650, Proceedings of the Enlarged Halden Programme Group Meeting, 2013, Storefjell, Norway
- [4] L. Yegorova, K. Lioutov, N. Jouravkova, A. Konobeev, V. Smirnov, V. Chesanov, A. Goryachev: Experimental Study of Embrittlement of Zr-1 %Nb VVER Cladding Under LOCA-Relevant Conditions. NUREG/IA-0211, 2005
- [5] F.J. Erbacher, S. Leistikow: A review of Zircaloy fuel cladding behavior in a loss-of-coolant accident., Kernforschungszentrum Karlsruhe Germany, Report KfK-3973, 1985
- [6] F. Erbacher, H. Neitzel, H. Rosinger, H. Schmidt, and K. Wiehr: Burst Criterion of Zircaloy Fuel Claddings in a Loss-of-Coolant Accident. 5th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, ed. D. Franklin (West Conshohocken, PA: ASTM International) 1982, pp. 271-283
- [7] D. Powers, R. Meyer: Cladding swelling and rupture models for LOCA analysis. NUREG-0630, 1980
- [8] M. Billone: Cladding embrittlement during postulated loss-of-coolant accidents. NUREG/CR-696, July 2008
- [9] M. Billone, Y. Yan, T. Burtseva, R. Daum, H. Scott: Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents. NUREG/CR-6967, 2008
- [10] J.C. Brachet, M. Dumerval, V. Lezaud-Chaillieux, M. Le Saux, E. Rouesne, D. Hamon, S. Urvoy, T. Guilbert, Q. Houmaire, C. Cobac, G. Nony, J. Rousselot, F. Lomello, F. Schuster, H. Palancher, J. Bischoff, E. Pouillier: Behavior of Chromium Coated M5 Claddings Under LOCA Conditions. Proceedings of Water Reactor Fuel Performance Meeting, September 10-14 2017, Jeju Island, South Korea
- [11] A. Wu, J. Ribis, J.-C. Brachet, E. Clouet, F. Leprêtre, E. Bordas, B. Arnal: HRTEM and chemical study of an ion-irradiated chromium/Zircaloy-4 interface, Journal of Nuclear Materials, Vol. 504 (2018) pp. 289-299
- [12] R. S. W. Shewfelt: The Ballooning of Fuel Cladding Tubes: Theory and Experiment, Res. Mechanics, Vol. 25 (1988) pp. 261-294
- [13] R. Nagy, M. Király, T. Szepesi: Optical measurement of the high temperature ballooning of nuclear fuel claddings, Review of Scientific Instruments, Vol. 89, Issue 12 (2018) paper 125114
- [14] R. Nagy, M. Király, T. Szepesi: Visual Observation of Ballooning and Burst Phenomena of VVER Fuel Claddings. Proceedings of Water Reactor Fuel Performance Meeting, September 10-14, 2017, Jeju Island, South Korea
- [15] R. Nagy, M. Király, T. Szepesi: Optical observation of the ballooning and burst of E110 and E110G cladding tubes. Nuclear Engineering and Design, Vol. 339 (2018) pp. 194-201
- [16] R. Nagy, M. Király, P. Petrik, Z. Hózer, Infrared observation of ballooning and burst of nuclear fuel cladding tubes. Nuclear Engineering and Design, Vol. 371, (2021), 110942

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ÚJRA NYOMTATOTT VÁLTOZATBAN

16 év után újra kézbe vehetik

az olvasók

az **Anyagvizsgálók Lapját!**

A lap újjászerveződött csapatának köszönhetően az első nyomtatott verzió előreláthatólag **2022-től** lesz elérhető.

Terveink szerint a **nyomtatott kiadvány negyedévente** – teljesen megegyező tartalommal, mint az online letölthető számok – **előfizetéses formában** jelenne meg.

Amennyiben igényt tartana rá, kérem töltse ki az alábbi linken elérhető **előfizetői igényfelmérést!**

<https://forms.gle/eCuNMV6xg7ETjqYa9>

