

Óbudai Egyetem

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS



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

Komplex vizsga szigorlati bizottság:

Elnök: Prof. Dr. Réger Mihály

Bizottsági tag: Prof. Dr. Ruzinkó Endre

Bizottsági tag: Dr. Borza Sándor

Nyilvános védés teljes bizottsága:

elnök

titkár

bíráló

bíráló

tag

tag

tag

pót elnök

pót titkár

pót bíráló

pót tag

Nyilvános védés időpontja:

2022. hónap nap.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	9
2. Irodalmi áttekintés.....	10
2.1 Az atomerőművek üzemanyaga.....	10
2.2 A fűtőelemek burkolata	10
2.3 Fűtőelemes kutatások	12
2.4 A tabletta és burkolat közötti mechanikai kölcsönhatás (PCMI)	13
2.4.1 A PCMI jelenség kísérleti vizsgálata	14
2.4.2 A PCMI numerikus vizsgálata	16
2.5 A fűtőelemek felhasadása hűtőközegvesztéses üzemzavarok során.....	18
2.5.1 A felhasadás kísérleti vizsgálata	18
2.5.2 A felhasadás optikai vizsgálata	20
2.5.3 A felfűvódás numerikus vizsgálata	21
3. Célkitűzések	25
3. Mandrel mérés numerikus modellezése	26
3.1 A mandrel mérés megvalósíthatósági vizsgálata	26
3.2 A mandrel mérés mérési eredményei	35
3.3 A gyári állapotú minták mandrel mérésének numerikus szimulációja.....	39
3.3.1 A geometria hálózása	40
3.3.2 Az alkalmazott anyagmodellek.....	42
3.3.3 A kezdeti feltételek	44
3.3.4 Testek közötti kontaktusok	45
3.3.5 Az alapállapotú minták mandrel szimulációjának eredményei	46
3.3.6 A szimuláció automatizálása.....	50
3.4 A hidrogén hatásának modellezése fűtőelem burkolatcső mintákban	53
4. Burkolatfelhasadásos kísérletek	58
4.1 Optikai eszközök tervezése	59
4.2 Nagynyomású gázadagoló rendszer	67
4.3 A nyomásnövelés problémáinak kezelése	72
4.4 A minták előkészítése és a mérés menete	75
4.5 A próbamérések eredményei	77
4.6 A gyorskamerás mérés eredményei	89
4.7 A felhasadási nyomásmérések eredményei	93
4.8 Hőkamerás mérés	95
5. Összegzés	103
6. Új tudományos eredmények.....	104
7. Nyilatkozat	106
8. Köszönetnyilvánítás	107
9. Hivatkozások.....	108
9.1 A tézispontokhoz kapcsolódó saját tudományos közlemények	117
9.2 További saját tudományos közlemények.....	118

1. Bevezetés

Az atomenergia békés célú felhasználása elsősorban azt a célt szolgálja, hogy modern életünk kényelméhez és biztonságához villamos energiát szolgáltatson. Az atomenergia katonai célú felhasználását nemzetközi egyezmények korlátozzák [1]. A világban jelenleg több mint négyszáz erőműblokk működik, melyek több mint 370 GW elektromos teljesítménnyel rendelkeznek.

Az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. négy orosz tervezésű, VVER-440/213 típusú reaktort üzemeltet. Ezeknek a névleges gyári teljesítménye 440 MW volt, de Magyarország energiaigénye nőtt, ezért a négy paksi blokk – új típusú üzemanyag bevezetésével és az erőműben végzett több műszaki átalakítás után – 500 MW teljesítményű üzemre állt át. A blokkok eredetileg 30 éves üzemidejét 20 évvel meghosszabbították. 2014-ben döntés született arról, hogy a paksi telephelyen két új 1200 MW-os blokk épül, amelyek pótolni tudják a négy jelenlegi blokk teljesítményét azok leállítása után.

A ma üzemelő reaktorok hosszú fejlesztések során jöttek létre. Az újabb reaktorok tervezésekor hasznosítják az előző típusok üzemeltetése során szerzett tapasztalatokat. Új reaktortípusok (például a IV. generációs reaktorok) fejlesztése jelenleg is folyik.

A nukleáris berendezések folyamatos fejlesztése alapvető fontosságú annak érdekében, hogy a berendezések egyre kevesebb karbantartás, vagy alkatrészcsere mellett, egyre hosszabb ideig, megbízhatóan és biztonságosan működjenek. Egy berendezés megbízhatósága, kopás- és sugárzásállósága, hő- és terhelésbíró képessége meghatározza a berendezés biztonságos működtethetőségének időtartamát.

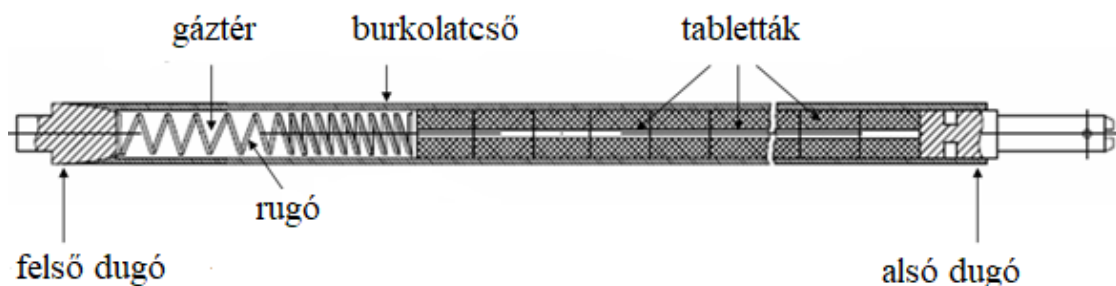
Csernobil és Fukushima negatívan változtatták meg az emberek hozzáállását az atomenergiához. Az energiatermelés ezen módjával akkor barátkozhat meg a közvélemény, ha jól bizonyítható, hogy az atomreaktorok biztonságosak, és nem jelentenek veszélyt a környezetre. Az atomenergetika megítélése akkor pozitív, ha a lakosság tájékoztatása megfelelő, és az emberek tudják, hogy hogyan működik az atomerőmű.

Az atomerőmű egyik legfontosabb biztonsági kérdése, hogy az reaktor aktív zónájában található, radioaktív izotópokat tartalmazó fűtőelemek megőrzik-e épségüket az erőmű normál üzemelése és esetleges üzemzavarai során. Ennek megválaszolásához részletesen fel kell tárnunk, hogy milyen terhelésekkel kell számolni a reaktorban és milyen folyamatok vezethetnek el a fűtőelemek sérüléséhez.

2. Irodalmi áttekintés

2.1 Az atomerőművek üzemanyaga

A vízhűtésű atomerőművi reaktorok (ezek közé tartoznak a jelenlegi, és az épülő paksi blokkok is) üzemanyaga ^{235}U izotóppal dúsított urán-dioxid tablettákat tartalmaz, amelyek cirkónium ötvözetből készült burkolatban vannak elhelyezve (1. ábra).



1. ábra. A fűtőelem metszeti képe [2]

A reaktorban történő üzemelés során fontos változások mennek végbe a fűtőelemben:

- A maghasadások során hasadványok keletkeznek a tablettában.
- Neutron befogással transzurán izotópok keletkeznek, többek között a hasadóképes ^{239}Pu .
- Kiegészés során csökken a hasadóképes ^{235}U mennyisége.
- A neutronsugárzás hatására a cirkónium burkolat felkeményedik.
- A kiegészés során a hasadási gázok egy része kikerül a pálcán belüli gáztérbe (plénium), ahol növekszik a gáznyomás, csökken a gáz hővezető képessége.
- A tabletták felszíne nagy kiegészések esetén porózussá válik, a peremréteg vastagsága növekszik. Ebben a rétegben a plutónium aránya megnő [3]. A tabletták széle lényegesen nagyobb kiegészésűvé alakul, mint a többi régió.
- A több éves, vizes közegben történő üzemelés során, a burkolaton vékony oxidréteg jön létre, és a korróziós folyamatban keletkező hidrogén egy részét elnyeli az ötvözet.
- Nagy kiegészéseknél olyan erős tabletták-burkolat kölcsönhatás alakulhat ki, hogy a tabletták és a burkolat atomjai kémiai kötést hozhatnak létre.

2.2 A fűtőelemek burkolata

A fűtőelemek burkolata üzemi és biztonsági feladatokat lát el.

- Lehetővé teszi a fűtőelemben keletkező hő elvitelét a hűtőközeg felé.
- Megakadályozza a radioaktív hasadási termékek és az üzemanyag-darabkák kikerülését a fűtőelemből.

A reaktorüzemeltetési szempontokat figyelembe véve a cirkónium legfontosabb tulajdonsága, hogy neutronbefogási hatáskeresztmetszete kicsi a lehetséges egyéb anyagokhoz képest (például a reaktorokban használt acél ötvözetek).

A cirkóniumötvözetek jó korrózióállósággal rendelkeznek vizes közegben. A reaktorban a kialakuló oxidréteg 5-15 mikrométer vastagságot ér el a nagy kiégésű állapot eléréséig, az oldott hidrogén mennyisége 55 MWd/kgU kiégésnél sem közelíti meg a 150 ppm (milliomod rész) értéket [4].

A cirkóniumötvözetek mechanikai tulajdonságai lehetővé teszik, hogy elviseljék a reaktorban fellépő mechanikai terheléseket. Az orosz E110 burkolatanyag szobahőmérsékleten és az üzemi hőmérséklet felett, 380 °C-on, a gyártó adatai alapján, az 1. táblázatban megadott módon jellemezhető.

1. táblázat. Az E110 fűtőelem burkolat (Zr1%Nb ötvözet) mechanikai anyagtulajdonságai [5]

Hőmérséklet	Irányok	Folyáshatár	Szakítószilárdság	Young-modulus	Poisson-tényező
20 °C	Tangenciális	330 MPa	370 MPa	96000 MPa	0,41
	Axiális	250 MPa	410 MPa		
380 °C	Tangenciális	180 MPa	200 MPa	70000 MPa	0,37
	Axiális	110 MPa	210 MPa		

Alapvető biztonsági kérdés, hogy kis valószínűséggel bekövetkező üzemzavarok, például a hűtőközegvesztéskor fellépő megemelkedett hőmérséklet esetén a burkolatcsőben felhalmozódott hasadási gázok és a hélium töltőgáz együttes nyomását a burkolat fala mennyire képes sérülés nélkül elviselni.

A magas hőmérsékletű tartományban a burkolat külső felülete a vízgőzzel kémiai reakcióba léphet, a cirkónium oxidációja során keletkezett hidrogén egy része pedig oldódhat a burkolat anyagában. Ezek a jelenségek megváltoztatják a burkolat fizikai jellemzőit.

A paksi VVER típusú reaktorok fűtőelem pálcáinak burkolatanyaga olyan ötvözet, amely 99% cirkóniumot és 1% nióbiumot tartalmaz [6]. A burkolatcsalád orosz megnevezése E110, amely amellet, hogy kopásálló, nagy szilárdságú, és üzemi hőmérsékleten ellenáll a reaktorban található közegnek.

A VVER-440 típusú reaktorban egy fűtőelem pálcá 9,1^{+0,10}_{-0,05} mm külső átmérőjű, a belső átmérője 7,8^{+0,06}_{-0,00} mm. A pálcá hossza 2420 mm. A VVER-1000 típusú reaktorban és a többi nyomottvizes reaktornál is eltérések tapasztalhatók a pálcaméreteknél: jellemzően 2,5 és 4,0 m hosszúságban készülnek, 9-13 mm külső átmérővel.

A paksi reaktorban a pálcákat az orosz gyártó elektrolitikus, illetve jodidos eljárással készített anyagból állítja elő. Az jodidos eljárás során cirkónium-tetrajodidot kondenzáltatnak izzó volfrám szálra. A szál felületén elemeire bomló cirkónium-jodidból a cirkónium a szál felületén kiválik (van Arkel-de Boer eljárás). Az elektrolitikus eljárás során a cirkónium kálium-tetrafluoro-cirkonát és sóoldadékok keverékéből kiválik az elektródok felületére. A paksi blokkokban jelenleg használt cirkónium burkolatcső anyagai a fenti kettő eljárással készülnek. A cirkóniumba nióbiumot ötvöznek, és a kémiai összetétel beállítása után a burkolat anyagában 100 ppm hafnium, 15 ppm nikkel, 45 ppm vas és 10 ppm króm marad [7]. A burkolatcsöveket az elkészített ötvözet anyagából, csőhúzással alakítják ki. A húzást követően a burkolatcsöveket hőkezelik. A burkolat a gyártást követően 2,5-3 μm szemcseméretű α -fázisú cirkóniumból áll. A csövekben a nióbium eloszlása egyenletes [8].

A legújabb fűtőelem alapanyag gyártása során a gyártó áttért a nyugaton használatos Kroll-eljárásra. A Kroll-eljárásban az alapanyag szivacsos szerkezetű lesz. Ilyenkor cirkónium-tetrakloridot magnéziummal reagáltatnak, az így kapott fémet keverik az elektrolitikus módszerrel készített anyaggal. A reaktorméregnek számító hafniumot előzetesen kivonják a cirkóniumból és mennyisége 10 ppm-nél kevesebb lesz. A vas mennyiségét pedig kb. 500 ppm értékre állítják be. Az új anyag E110-opt jelölést kapott (dolgozatomban az orosz szerzők által is használt E110G – a szivacs oroszul gubka – jelöléssel hivatkozom erre a típusú ötvözetre). Az E110G burkolatcső külső jellemző átmérője 9,1 mm, a falvastagsága 0,68 mm. A legújabb paksi üzemanyag kazettákban 8,9 mm külső átmérőjű burkolatot használnak. Az E110G jobban ellenáll a hidrogén felvétel okozta ridegedésnek, miután pedig breakaway oxidációt nem mutat, az oxidációs tulajdonságai is jobbak a hűtőközeg-vesztéses üzemzavar (LOCA – loss of coolant accident) alatt [8, 9, 10].

2.3 Fűtőelemes kutatások

Az atomerőművi fűtőelemek kutatásának alapvető céljai az alábbiak:

- A fűtőelemekben végbemenő folyamatok megismerése, a jellemző paramétertartományok feltérképezése.
- A fűtőelemekre vonatkozó biztonsági kritériumok megalapozása.
- Adatok szolgáltatása a reaktorok biztonsági elemzéseikhez használt fűtőelem-viselkedési kódok numerikus modelljeinek fejlesztéséhez és validálásához.

A legfontosabb kutatási programokat kutatóreaktorokban hajtják végre olyan körülmények között (például neutronfluxus, nyomás, hőmérséklet, vízkémiai paraméterek), amelyek jól közelítik az erőművekben várható állapotokat. Ezek a mérések on-line adatgyűjtéssel lehetővé teszik a besugárzás hatására létrejövő változások követését, illetve a fűtőelemek viselkedésének, esetleges sérülésének megfigyelését üzemzavari és baleseti körülmények között. A besugárzott minták utólagos vizsgálatához melegkamrás eszközökre van szükség. A hazai fűtőelem-viselkedési kódok (kód: reaktor-monitorozó és szimulációs programok terminológiája. Részletek lent, a 2.4.2-ben)

fejlesztéséhez kiemelkedően fontosak voltak a norvégiai Halden kutatóreaktorban VVER fűtőelemmel végzett mérések [11], valamint az orosz MIR [12], IGR [13] és BGR [14, 15] reaktorokon végrehajtott kísérletek.

Kutatóreaktoros kísérletekből – azok bonyolultsága és magas költsége miatt – korlátozott számú mérést lehet elvégezni. Ezért számos olyan kutatási programot hajtanak végre, amelyekben a besugárzás hatását nem veszik figyelembe. Ezek jóval egyszerűbb kísérleti körülmények között és alacsonyabb költségekkel valósíthatók meg. A besugárzási effektust pedig néhány kiegészítő kutatóreaktoros méréssel lehet illusztrálni, ha erre szükség van. Az inaktív körülmények között végrehajtott mérések közé tartozik például a QUENCH [16], CORA [17] és PARAMETER [18] integrális kísérletek, valamint számos kisléptékű kísérlet, amelyekre következő fejezetekben mutatok be néhány példát.

A hazai fűtőelemes kutatások elsősorban az Energiatudományi Kutatóközpontban (EK) [19] folynak. A kísérleti munka a burkolatcsövek vizsgálatára koncentrál [20]. Az E110 burkolattal végrehajtott mérések eredményeiről olyan adatbázis készült, amelyet az OECD International Fuel Performance Experiments Database (IFPE) is befogadott, és amelyet számos külföldi intézmény is használ [21]. Integrális kísérletekre került sor a CODEX (COre Degradation EXperiment) berendezésen elektromosan fűtött kísérleti kötegekkel [22], amelyek segítettek feltérképezni az üzemzavarok és súlyos balesetek során fellépő folyamatokat és kölcsönhatásokat.

A doktori munkám során az EK-ban folyó kutatások közül két olyan mérési programban vettem részt, amelyekben a fűtőelemek burkolatának sérülését különböző időskálákon vizsgálták. A normál üzemelés során fellépő tablettá-burkolat mechanikai kölcsönhatás egy lassú folyamat (perces, órás) során vezethet a burkolat átrepedéséhez, míg a hűtőközegvesztéses üzemzavaroknál várható felhasadás a másodperc tört része alatt következik be. Ezeknek a jelenségeknek a vizsgálatára különböző eljárások és mérés technikai megoldások kifejlesztésére volt szükség. A következő két alfejezetben röviden bemutatom a tablettá-burkolat kölcsönhatás (PCMI – pellet-cladding mechanical interaction) és a magas hőmérsékletű burkolatfelhasadásos kísérletek nemzetközi gyakorlatát és tapasztalatait.

2.4 A tablettá és burkolat közötti mechanikai kölcsönhatás (PCMI)

A friss üzemanyagban a tabletták és a burkolat között kisméretű (tized milliméteres) rés található, amely a normál üzemelés során bezárul. Ebben fontos szerepe van tablettá töredezésének (hőfeszültségek hatására hat-nyolc nagyobb darabra töredezik szét), a tablettá duzzadásának (ami a hasadási termékek felhalmozódása miatt lép fel) és a burkolat kúszásának (a magas külső nyomás hatására csökken az átmérő).

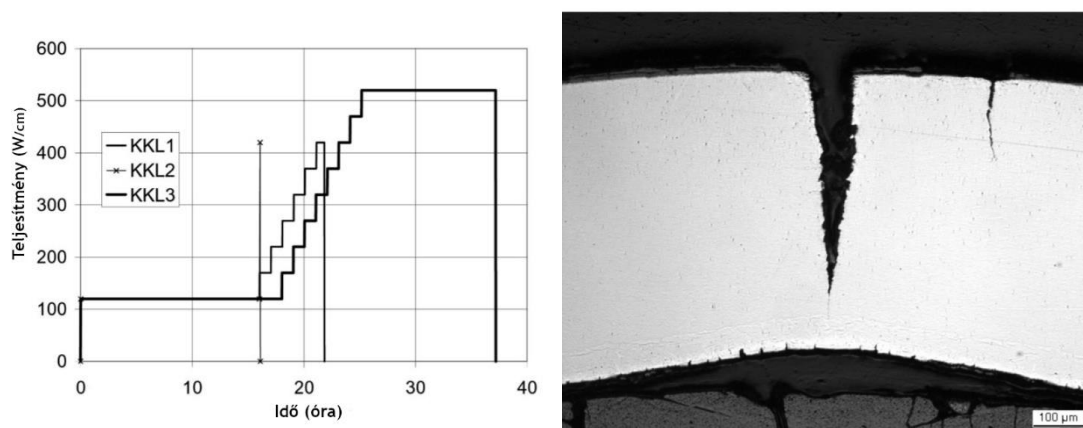
Ha a rés bezáródása után olyan tranzienseket hajtanak végre, amelyek során a reaktor teljesítménye nő, akkor a tablettá hőtágulása jelentős feszültséget hozhat létre a burkolatban. A

felterhelés mértéke, valamint a burkolat állapota határozza meg, hogy létrejöhet-e fűtőelem sérülés ilyen esetben.

A burkolat PCMI típusú sérülésének elkerüléséhez az atomerőművekben korlátozzák a felterhelés sebességét. Ennek megalapozásához olyan mérésekre és elemzésekre van szükség, amelyek reprezentatívnak tekinthetők az adott erőműre.

2.4.1 A PCMI jelenség kísérleti vizsgálata

A tablettá-burkolat kölcsönhatás vizsgálatának legkézenfekvőbb módja, ha kutatóreaktorban megnövelik a vizsgált fűtőelem teljesítményét. Ezek az úgynevezett rámpatesztek, amelyekből több százat végeztek például a haldeni [23] vagy a studsviki [24] reaktorokban. A rámpatesztek célja, hogy a hirtelen megnövekedett belső hőmérséklet hatását – elsősorban a hőtágulás miatt a burkolatban létrejött feszültséget és annak következményeit – szimulálják (2. ábra).



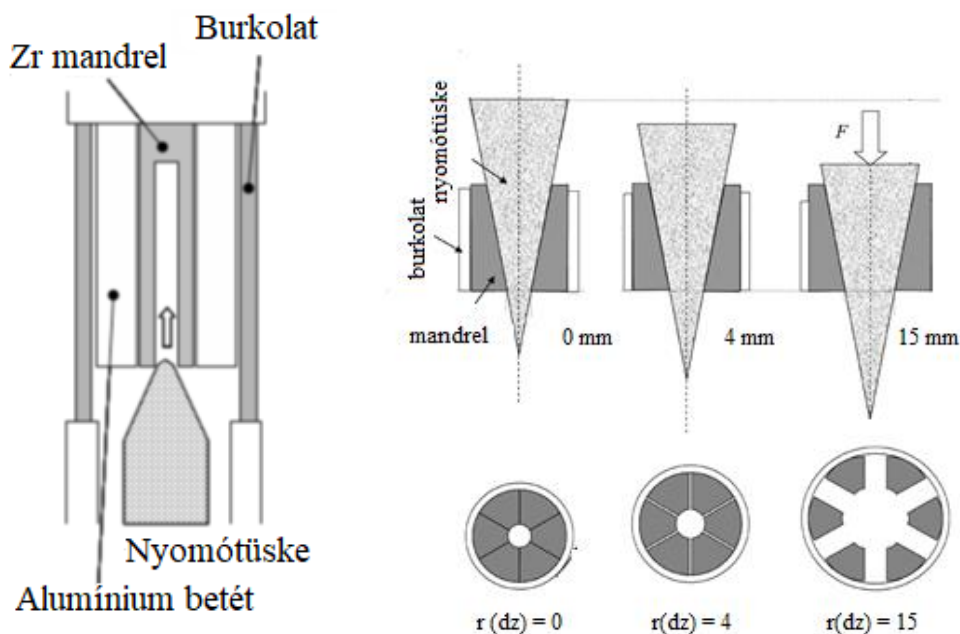
2. ábra. A lineáris hőteljesítmény időbeni változása a Leibstadt erőműből származó fűtőelemekkel Studsvikban végrehajtott rámpatesztekben (bal) és KKL1 fűtőelem burkolatában a felterhelés hatására létrejött repedés (jobb) [25]

A rámpatesztekhez különböző típusú, kiégettségű, korróziós állapotú fűtőelem szegmenseket használnak fel. A felterhelést különböző sebességekkel hajtják végre és az elért maximális lineáris hőteljesítmény is a jellemző paraméterek között szerepel.

A reaktoron kívül végzett PCMI vizsgálatokhoz úgynevezett mandrel technikát fejlesztettek ki, amely a burkolatban ébredő feszültségeket mechanikai erővel hozza létre. A mandrel módszernek többféle változata is létezik:

- A Studsvikban kifejlesztett eljárás szerint a mintát polimer anyaggal töltik ki, majd hosszirányban összenyomják. Az erő-elmozdulás diagram elemzéséből lehet meghatározni azt a kritikus belső feszültséget, ami a burkolat sérüléséhez vezet [26, 27].

- Foster elrendezésében a könnyűvízes reaktorok fűtőelem burkolatcsövéből készítették mintákat, amelybe kerámia betétet helyeztek el, majd a betétbe cirkónium magot préseltek be, egy csavarmenetes szorító segítségével [28].
- Érdekes megoldást olvashatunk Jiang cikkében, amelyben a mandrel tesztet poliuretán folyadékkal töltötték ki, majd azt dugattyúval megnyomták. A minta alakváltozása hasonló volt a burkolatcső nagy nyomású gáz hatására történő felhasadáshoz [29].
- Szolonyin a cirkónium burkolat csövek belsejébe vastag, párhuzamos belső falú csövet töltött be, amelybe kúp alakú nyomótüskét nyomott be a töltet belső üreges terébe [30].
- Nobrega meghatározott méretű lapkákra töredezett, vékony alumínium-oxid réteget helyezett a vizsgált burkolatcső belső felszínére. A lapkák belsejében négy, hengeres szegmensű volfrám-karbid mandrel segítségével, henger alakú, indukciós kemencében felhevített, cirkónium nyomószerszámmal végzett méréseket [31].
- Karl-Fredrik Nilsson leírása [32] alapján a szegmentált mandrel szerszámokat a cirkónium csőbe csúsztatják, majd a szerszámok belsejében kialakított kúpos üregbe egy geometriailag beleillő, kúp alakú nyomótüskét szakítógéppel benyomnak a mandrelek közé. A mandrelek ekkor oldalirányban, kifelé megcsúsznak, a mintacső falára felfekszenek, majd a felületre nyomást gyakorolva a mintacső falát kifelé nyomják. Az EK-ban ezzel a módszerrel dolgoztunk, így dolgozatomban ezt mutatom be részletesen (3. ábra, jobb oldal).



3. ábra. A Studsvikban használt (bal) [33] és a K.-F. Nilssen által kifejlesztett (jobb) [32] mandrel eszközök

A mandrel mérések egyik hátránya az, hogy az érintkező testek között fellépő súrlódási erőről nincsenek ismeretek. Ezzel szemben számos előnye lehet: a tableta az üzemelés közben 5-8

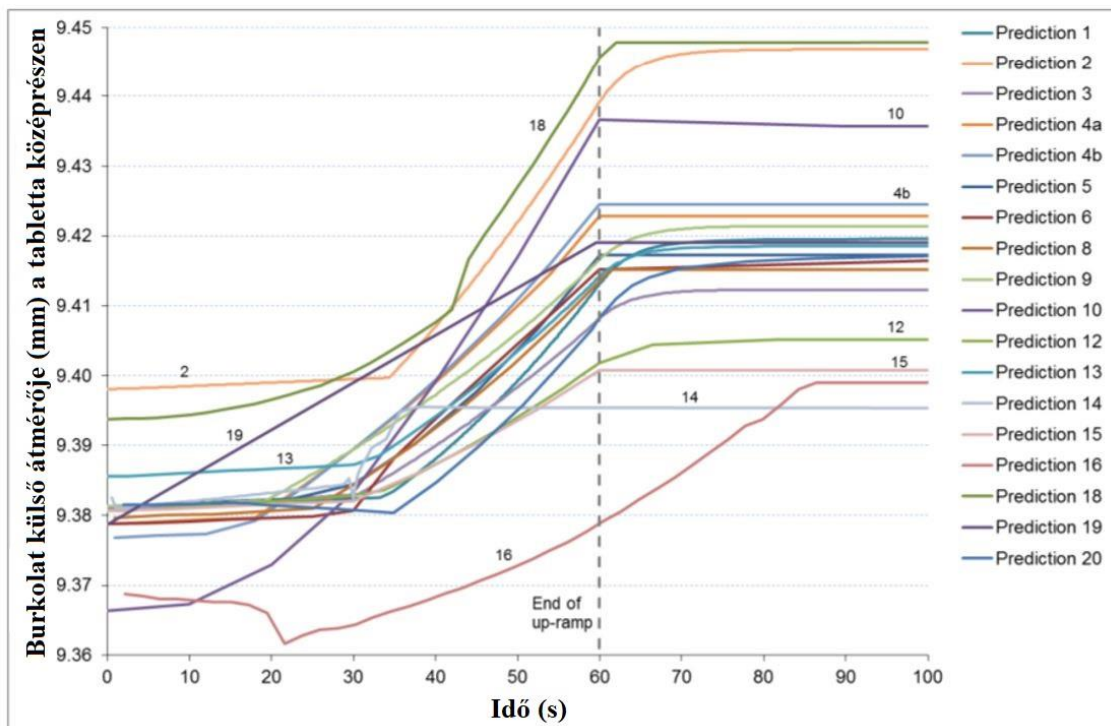
darabkára töredezik szét, a mandrel mérés hasonlíthat az összetöredezett tablettadarabok burkolatra gyakorolt hatásához.

2.4.2 A PCMI numerikus vizsgálata

A fűtőelem-viselkedési kódok rendelkeznek olyan termomechanikai modellekkel, amelyek alapján meg lehet becsülni a felterhelés során a burkolatban ébredő feszültséget. A kódokban a kifejlesztett, részletes modellekkel, numerikus számolás eredményeként követik a fűtőelemben végbemenő kiégésfüggő változásokat és bizonyos közelítésekkel írják le azok hatását arra vonatkozóan, hogy a burkolat milyen feszültségnél reped meg.

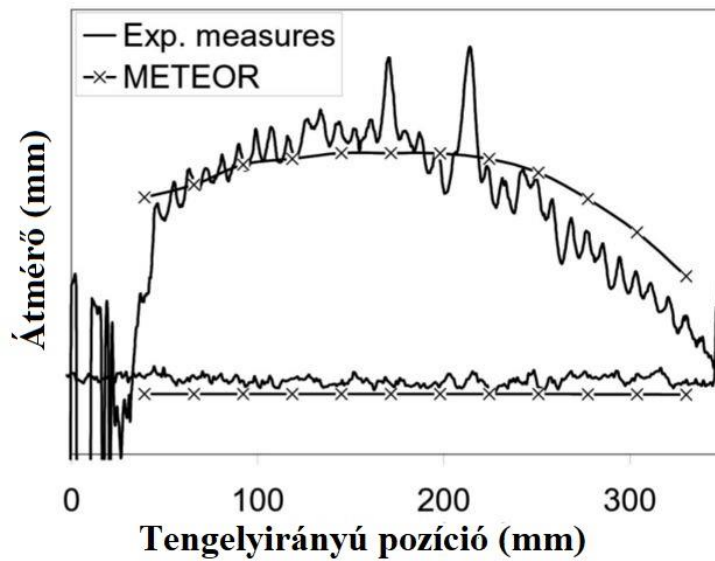
Az EK-ban fejlesztett FUROM kód egy reaktorszimulációra, továbbá termikus és gyorsreaktor szimulációra fejlesztett program, amely részletesen számolja a tablettá sűrűsödését, duzzadását, átrendeződését (relokációját), hőtágulását, és ezek alapján határozza meg a tablettá méretét az adott pillanatban. A burkolat kúszását és a besugárzás hatására történő méretváltozását szintén számítja a kód. A tablettá és burkolat közötti rés bezáródása után a burkolat belső felületén létrejött kontaktnyomás figyelembevételével szimulálja a burkolat deformációját [34]. A kód hasadási gázok keletkezését, tablettából történő kikerülését és a fűtőelem belső nyomását is számolja.

Hasonló modelleket alkalmaznak a TRANSURANUS kódban [35] és számos más stacioner fűtőelem-viselkedési kódban a PCMI jelenség leírására. Példaként a 4. ábra jelzi, hogy a különböző kódokkal számított eredmények között jelentős eltérések lehetnek.



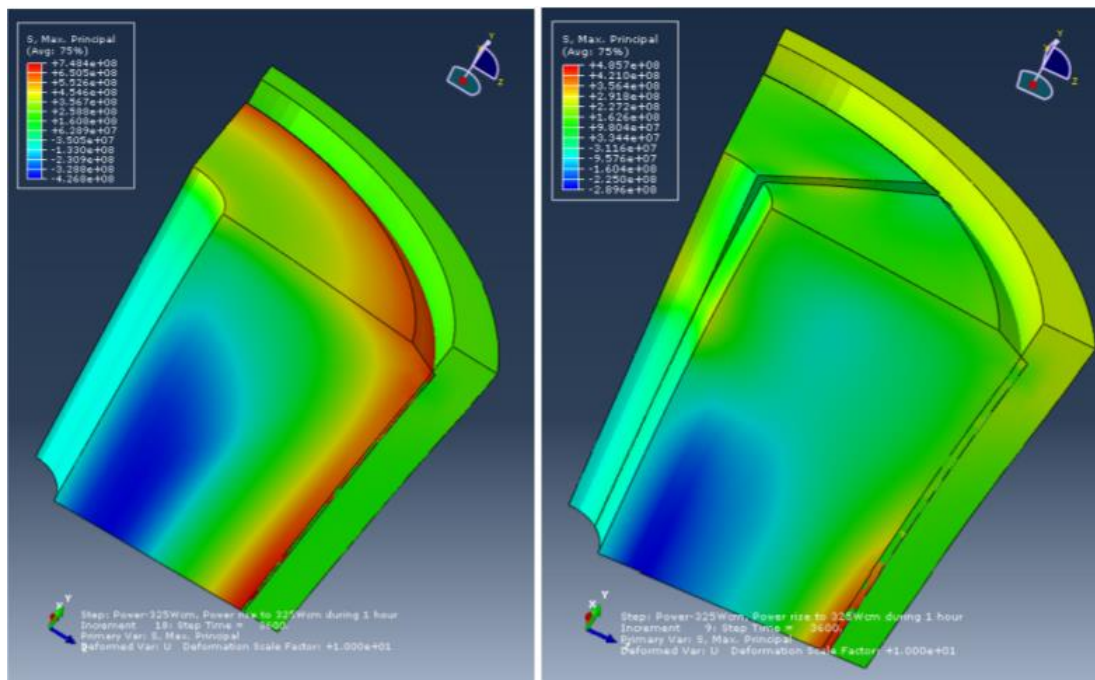
4. ábra. A burkolat átmérőjének változása 40 kW/m lineáris hőteljesítményre történő felterheléskor az OECD benchmark számítások szerint [36]

A fűtőelemes kódok validációjához nagyon fontosak a rámpatesztek. Erre mutat be egy példát az 5. ábra, amelyen a burkolat átmérőjének számított és mért axiális eloszlása látható a rámpateszt előtt (az alsó görbék) és rámpateszt után (felső görbék) [25].



5. ábra. Leibstadt forralóvízes erőműből származó fűtőelem átmérőjének axiális eloszlása a Studsvikban végrehajtott rámpateszt előtt és után (mért adatok és számítás a METEOR kóddal)

A klasszikus fűtőelemviselkedési kódokon túl többdimenziós, végeelemes modellek fejlesztése is megkezdődött. A végeelemes számolásokat többek között az ANSYS, MSC Marc és SAF2D kódokkal végzik [31, 32, 37, 38]. Cseh szakemberek VVER fűtőelemekre végeztek olyan számításokat az ANSYS kóddal, ahol a tabletta és burkolat közötti kölcsönhatást vizsgálták a reaktor felterhelése során (6. ábra).



6. ábra. VVER fűtőelemen, felterhelés során fellépő feszültségek ép (bal) és axiálisan felrepedt (jobb) tabletta esetén [39]

2.5 A fűtőelemek felhasadása hűtőközegvesztéses üzemzavarok során

A hűtőközegvesztéses üzemzavar [40, 41, 42, 43, 44, 45] során a láncreakció leáll, a moderátor elforrása és a szabályozó rudak beesése miatt. Az aktív zónában a hasadási termékek bomlásából származó maradványhő elvitelét a gőzállapotú hűtőközeg nem tudja biztosítani.

A reaktorban a hűtőközeg nyomása lecsökken, miközben a szárazra került fűtőelemek burkolatának hőmérséklete jelentősen meghaladja az üzemi hőmérsékletet. A kifelé mutató nyomáskülönbség és a magas hőmérséklet hatására a burkolat maradé alakváltozást szenved, képlékeny állapotba kerül. Nem csak a magas hőmérséklet és a kémiai változások miatt csökken a burkolat szilárdsága, hanem a deformáció közben létrejövő falvastagság-csökkenés miatt is gyengébb lesz a burkolat. Mindez a burkolat felhasadásához vezethet, ami megnyitja az utat a hasadási termékek és egyéb üzemanyagdarabok kiáramlásához.

Az atomerőművi biztonsági elemzések egyik nagyon fontos kérdése, hogy a fűtőelem burkolata megőrzi-e épségét a LOCA üzemzavar során, illetve hány fűtőelem felhasadásával kell számolni a radioaktív kibocsátás becslésekor. A kérdés fontossága miatt a legtöbb fűtőelem típusra végeztek felhasadásos méréseket, ami lehetővé tette a számítógépes kódok modelljeinek fejlesztését és ellenőrzését.

2.5.1 A felhasadás kísérleti vizsgálata

A fűtőelemek burkolatának felhasadását LOCA körülmények között különböző kísérleti programokban vizsgálták, amelyek között vannak kutatóreaktorban végrehajtott kísérletek, valamint reaktoron kívül végrehajtott integrális és kisléptékű tesztek is.

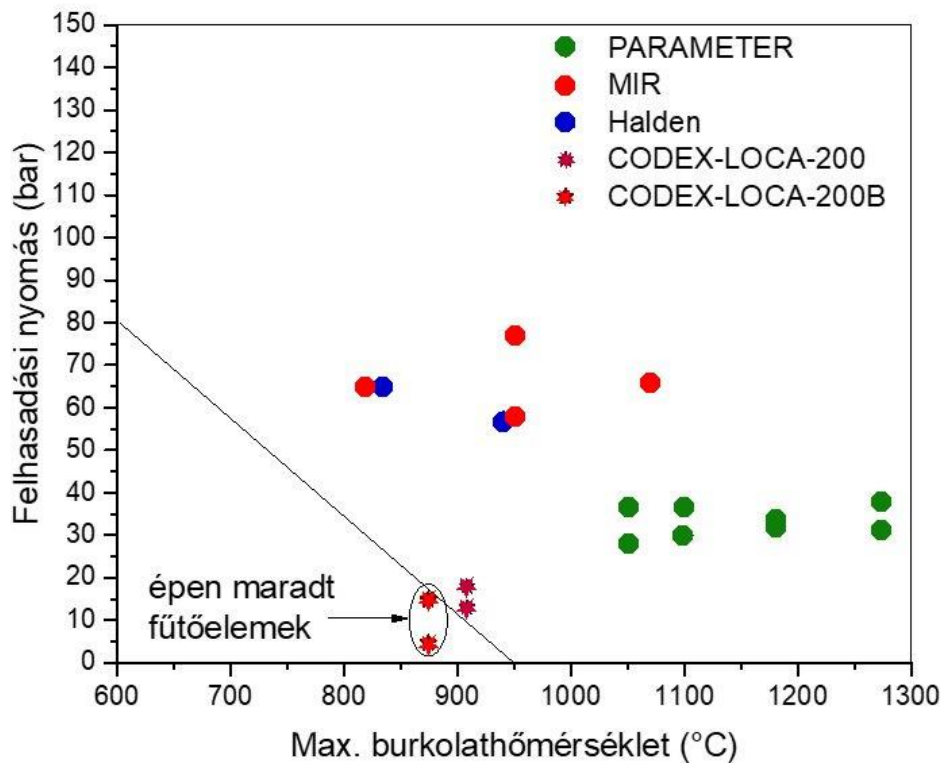
A kutatóreaktoros LOCA kísérletekben általában nemcsak a burkolat felfűvódását, hanem az üzemzavari folyamat során fellépő többi jelenséget (például a burkolat oxidációját, a felhasadást követő szekunder hidridizációt, az elridegedett burkolat elárasztáskor fellépő sérülését, a tabletták fragmentációját és kiszóródását a felhasadt fűtőelemből, a hasadási termékek megjelenését a hűtőközegben) is meg lehet figyelni. Ezekhez a mérésekhez a reaktorban külön csatornát kell kialakítani, hogy a radioaktív hasadási termékek ne szennyezzék el reaktort hűtőkörét. A Pakson használatos VVER fűtőelemekkel a Halden reaktorban [46, 47] és az oroszországi MIR reaktorban [48] hajtottak végre LOCA méréseket. A haldeni mérésekhez egy fűtőelemet használtak, míg a MIR kísérletekben több pálcából álló köteget is teszteltek. A mérésekben friss és különböző kiégésű, atomerőművi reaktorokban besugárzott fűtőelemeket is teszteltek.

Elektromosan fűtött, nem besugárzott VVER kötegekkel integrális LOCA kísérleteket végeztek a PARAMETR [18] és a CODEX [49] berendezéseken. Ezek a mérések jelezték, hogy

- a burkolat felfűvódásának mértékét korlátozhatják a köteg szomszédos rúdjai,

- a felfűvódott ruda(ka)t tartalmazó kötegben csökken a hűtőcsatornák áramlási keresztmetszete.

A VVER LOCA tesztek széles paramétertartományokban hajtották végre, amelyekhez különböző üzemzavari forgatókönyveket feltételeztek (7. ábra).

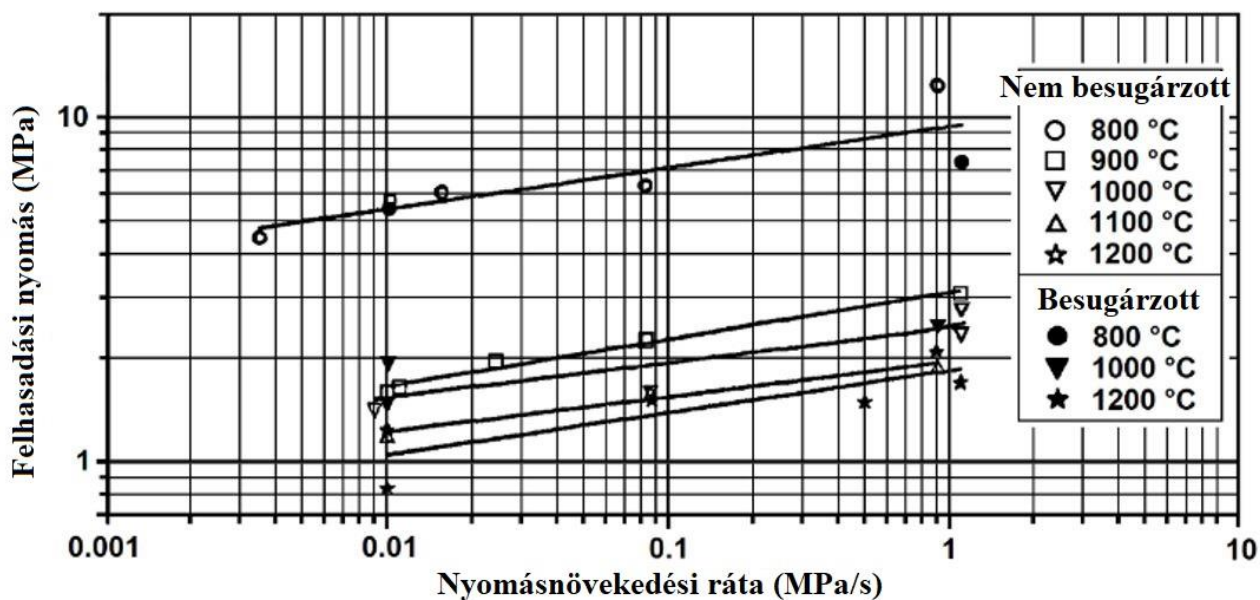


7. ábra. A VVER fűtőelemek felhasadása kutatóreaktoros és elektromosan fűtött kötegekkel végrehajtott mérésekben [54]

A kisléptékű burkolatfelhasadásos kísérleteket magas hőmérsékletű berendezésekben hajtják végre úgy, hogy a mintadarabok belső nyomása jelentősen meghaladja a külső nyomást. Ezekben a kutatási programokban nagyszámú minta tesztelésére van lehetőség. Példaként említhetjük a francia EDGAR [50] és a német REBEKA [51] kísérletsorozatokat, vagy az orosz Kurcsatov Intézet [52] és a hazai AEKI (Magyar Tudományos Akadémia Atomenergia Kutatóintézet) és EK (Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Energiatudományi Kutatóközpont) méréseit [53]. A mérésekhez rövid burkolatdarabokat használnak és a kísérlet jellemzően a burkolat felhasadásáig tart. A mérésekben számos paramétert változtatnak, hogy lefedjék az erőműben várható állapotokat. Ezek közé tartozik a nyomásnövelés sebessége, a felfűtés sebessége, a burkolaton az üzemzavar előtt létrejött oxidréteg vastagsága, a cirkóniumötvözet hidrogéntartalma vagy a burkolatot ért neutronfluens (a neutronhozam és a geometria ismeretében számolható, n/m^2). A felfűvódás során a burkolatcső átmérője megnövekszik, fala elvékonyodik, a magas hőmérsékleten pedig hamar elveszíti integritását, felhasad. Adott burkolatcsőre jellemző felhasadási nyomás méréséhez tipikusan kétféle beállítást alkalmaznak a laboratóriumok: állandó hőmérsékleten tartott burkolatcső belsejébe

egyenletes ütemű nyomásnövekedéssel argont adagolnak (izoterm felhasadás mérés), illetve egy előre beállított nyomású, hermetikusan lezárt burkolatcsövet melegítenek fel a megfelelő hőmérsékletre.

A besugárzott és besugárzatlan mintákkal végzett felfűvódásos mérések hasonló eredményt adnak [52, 55]. Ennek az a magyarázata, hogy a 600-900 °C között a cirkóniumötvözetekben a hexagonális soros illeszkedésű α -fázisból tércentrált köbös β -fázis keletkezik. A kristályszerkezeti változások során az ötvözetből eltűnnek a besugárzás hatására létrejött rácshibák.



8. ábra. Besugárzott és besugárzatlan VVER burkolatok felhasadási nyomása [52]

2.5.2 A felhasadás optikai vizsgálata

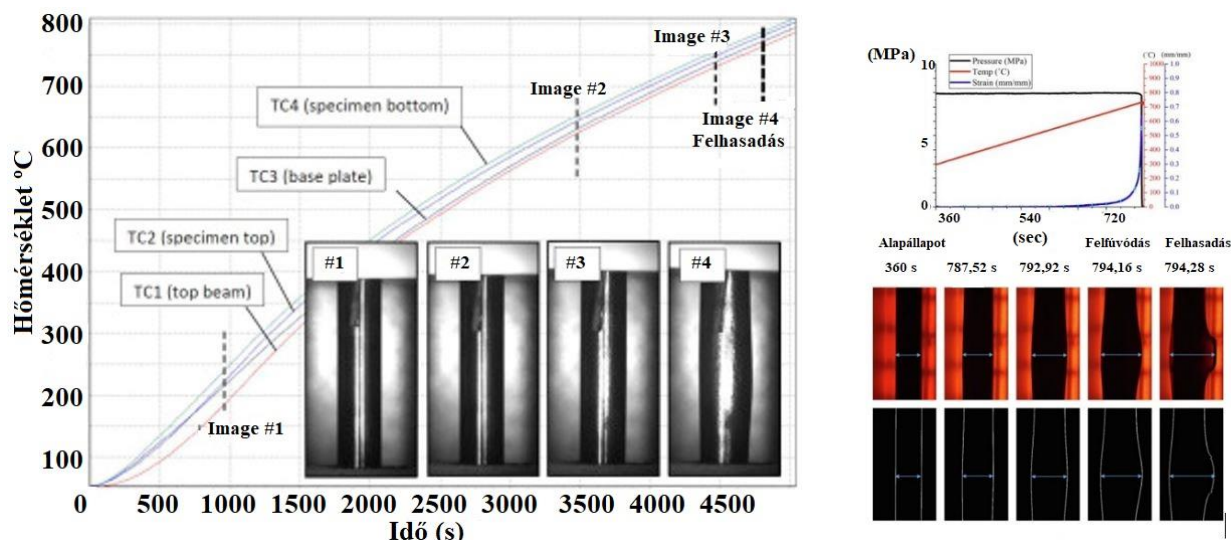
A felhasadásos mérések fontos információkat szolgáltatnak a felhasadási nyomást és a felfűvódás mértékét befolyásoló tényezőkről. Az on-line mérések rámutattak arra is, hogy a burkolat felfűvódása a felhasadása előtti másodpercekben felgyorsul és maga a felhasadás pillanatok alatt megy végbe. A felhasadás részleteinek megismeréséhez közvetlen optikai megfigyelésre van szükség.

A nagy belső nyomás hatására felfűvódó burkolatcsövek felfűvódásának és felhasadásának kamerás megfigyeléséhez cseh szakemberek [56] kvarcüveg kémlelőnyílással szerelt elektromos kemencét alkalmaztak. A kémlelőnyíláson keresztül 15 fps (képkocka másodpercenként) sebességű, 640×480 pix felbontású webkamerával készítették felvételt.

A legnépszerűbb kutatási terület a balesetálló fűtőelem burkolatanyag kifejlesztése. Ennek a keretén belül optikai megfigyeléseket végeztek az Oak Ridge Laboratóriumban (USA). A 10 fps mintavételezésű kamera térbeli felbontása 14-15 μm körüli volt, és a látható tartományban működő CCD detektor képén egy, a szobahőmérsékleten 2,07 bar belső nyomással töltött, 30 cm hosszúságú, lehegesztett minta képét elemezték. A minta mindenkorí átmérőjét az adott, termoelemmel meghatározott hőmérséklethez rendelték. A T35Y jelű ötvözetből (FeCrAl) készített fűtőelem

burkolat minta mérési eredményét a 9. ábra bal oldalán láthatjuk, szobahőmérsékletről 800 °C-ig történő hevítés közben [57].

Koreában a KAERI egyik kemencéjét egy kvarc üveglap felülettel látták el, ezen keresztül, egy külső pozícionálású CMOS kamerával figyelték a minta méretváltozását. Kontúrkövető algoritmust fejlesztettek Matlab programmal, amely időről-időre és pozícióról-pozícióra megadta a Zircaloy-4 ötvözetből készült, lehegesztett burkolatcső átmérőjét, 1 °C/s hőmérséklet-emelkedés közben [58] (9. ábra, jobb oldal).



9. ábra. A FeCrAl minta CCD mérése az Oak Ridge Laboratóriumban (bal) és a kontúrkövetéssel megmért átmérőváltozás a KAERI-ben (jobb)

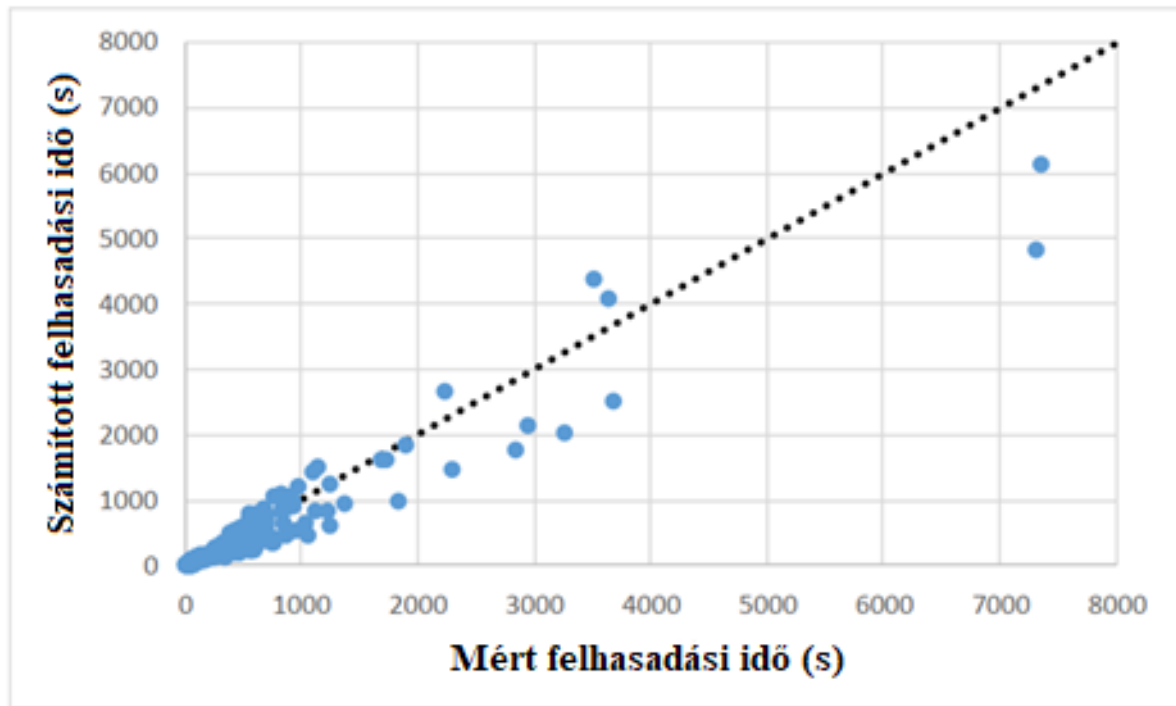
2.5.3 A felfűvódás numerikus vizsgálata

A tranziens fűtőelem-viselkedési kódok temomechanikai modelljei lehetővé teszik a burkolat felhasadásának előrejelzését LOCA körülmények között. A hagyományos modellekben a burkolat felhasadását alakváltozás- és feszültségátár alapján jelzik. A modellek fejlesztése során a szakemberek fokozottan támaszkodnak a mérési eredményekre. Példaként említhető, hogy a REBEKA program egy pálcsás mérési eredményei alapján javasoltak deformációfüggő felhasadási kritériumot az azimutális hőmérsékleteloszlás figyelembe vételével [59].

A paksi atomerőmű LOCA folyamatainak modellezésére két tranziens fűtőelem-viselkedési kódot használnak, amelyek fejlesztéséhez hazai kísérleti programok eredményeit is felhasználták.

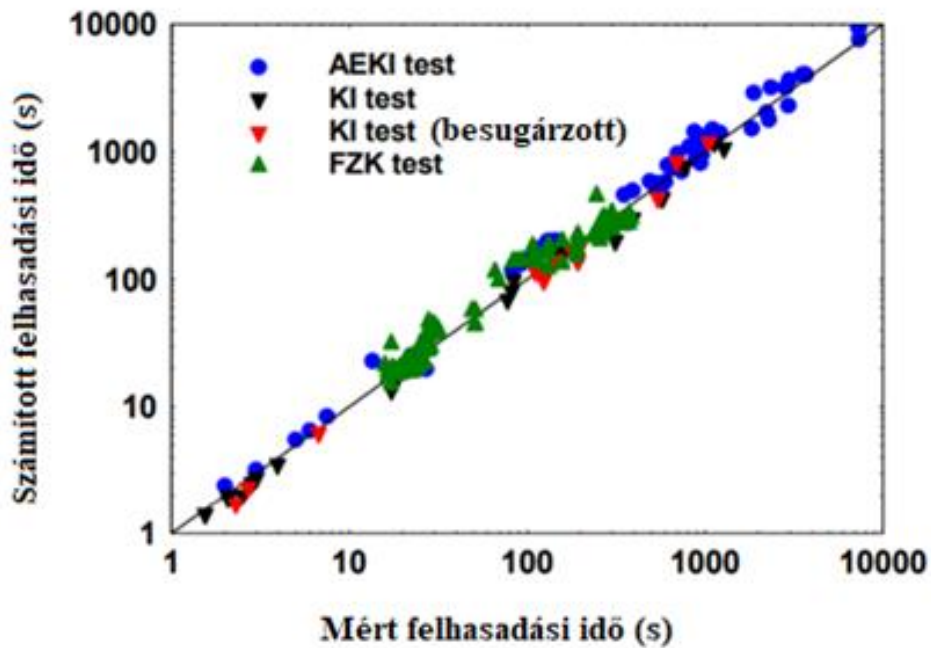
- A FRAPTRAN kódot [60] az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztették ki, és az orosz fűtőelemekre az EK szakemberei adaptálták [61, 62]. A VVER típusú burkolat felhasadásának szimulációjához továbbfejlesztették a kód eredeti modelljét a Kurcsatov Intézet (KI) és a RIAR intézet által elvégzett mérésorozat [13, 63], a Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) által gyári állapotú mintákon, állandó nyomáson, egyenletesen emelkedő hőmérséklet mellett, vízgőzös közegben végzett felfűvódási-felhasadási mérések [64], valamint a KFKI AEKI-ben, majd az

MTA EK-ban gyári állapotú mintákon végzett felfúvódási-felhasadási kísérletek [65, 66, 67, 68] alapján. A burkolat felfúvódását a FRAPTRAN kód képlékeny deformációként írja le, amely először egyenletesen, a hengeres szimmetria megőrzése mellett történik, majd megkezdődik a burkolat lokális elvékonyodása, amely addig tart, ameddig a burkolat állapota valamelyik tönkremeneteli határt el nem éri. A felfúvódás modellezéséhez tehát először az egyenletes nyúlás határát kellett meghatározni, utána a meghibásodási határokat, végül a képlékeny alakváltozás modellparamétereit kellett illeszteni. A kapott modell-eredményeket a mért adatok függvényként ábrázolva, a modell pontossága látható (10. ábra).



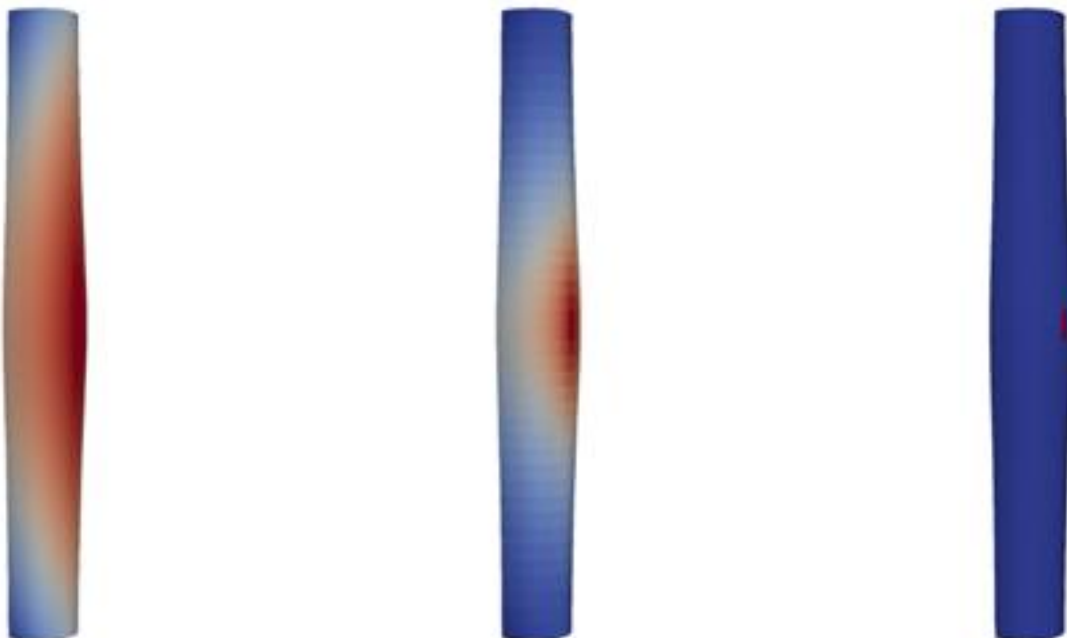
10. ábra. A FRAPTRAN kóddal számított felhasadási nyomások összevetése a mért adatokkal [61].

- A TRANSURANUS kódot a karlsruhei Institute for Transuranium Elements fejlesztette ki. A kód alkalmas az atomreaktorokban használt fűtőelem pálcák termikus és mechanikai elemzésére [35] [69]. A kód sokoldalúsága abban rejlik, hogy használható normál üzemi és üzemzavari esetek modellezésére is. A kód LOCA modelljeit hazai szakemberek bővítették német (FZK), orosz (KI) és magyar (AEKI) kísérleti adatsorok felhasználásával [70]. A felfúvódást szimuláló modellbe beépítették az oxidáció hatására létrejövő felkeményedést is. A 11. ábra a TRANSURANUS által számított felhasadási időt mutatja az ugyanolyan feltételekkel mért felhasadás idejének függvényében.



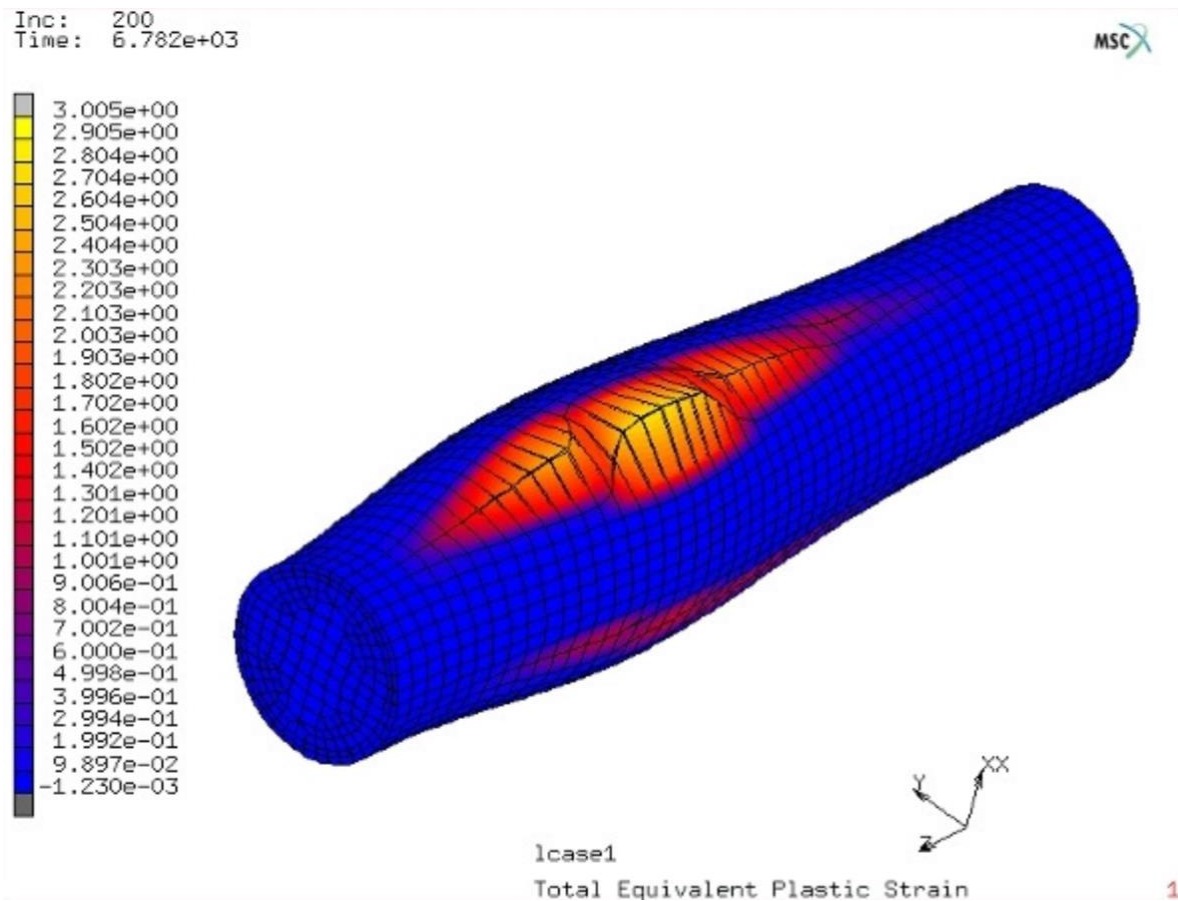
11. ábra. A TRANSURANUS kóddal számított felhasadási nyomások összevetése a mért adatokkal [70]

Az utóbbi években előtérbe kerültek a végeselemes modellek, amelyek háromdimenziós megközelítésben írják le a burkolat felfűvódását és felhasadását. A BISON kóddal sikeresen reprodukálták a REBEKA burkolatfelhasadásos kísérleteket [71]. Az 12. ábrason a szimuláció során kapott hőmérsékletmezőt, deformációt és felhasadt geometriát látjuk.



12. ábra. A burkolat felhasadásának 3D szimulációja a BISON kóddal (az egyik REBEKA kísérlet utószámítása, 30 °C azimutális hőmérsékletkülönbség esetére) [71]

Az MSC Marc kóddal végzett hazai számítások során feltételezték, hogy a burkolat felhasadása során a minta anyaga homogén és izotróp. Az E110 anyaghőmérséklettől függő rugalmassági modulusát és Poisson-tényezőjét az orosz fűtőelemgyártó dokumentációjából vették. A modell folyásgörbéjéhez egy hasonló cirkónium alapú fűtőelem-burkolat adatait használták fel [72]. A számítások során a nagy alakváltozások elméletét alkalmazták, azaz az anyagmodellek képlékeny alakváltozását is követni lehetett vele [73] (13. ábra).



13. ábra. A burkolat felhasadásának 3D modellezése az MSC Marc kóddal [73]

Ezeknek a modellek a fejlesztéséhez sokkal részletesebb adatokra van szükség, mint a hagyományos kódok viszonylag egyszerű felhasadási modelljeinek illesztéséhez. Ezért a mérés technikában is törekedni kell arra, hogy mind időben, mind térben sokkal részletesebb információk álljanak rendelkezésre a felfűvődő burkolat pillanatnyi állapotáról.

3. 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 felfúvódott minták a nyomásnövekedés hatására végül felhasadtak. A gyorskamerás mérési adatok alapján ki kellett értékelni, milyen dinamikát követ a burkolat felfúvódása 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.

3. Mandrel mérés numerikus modellezése

3.1 A mandrel mérés megvalósíthatósági vizsgálata

A doktori tanulmányaim előtt, és annak kezdetén az akkor még Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumában felkérték arra, hogy numerikus módszerekkel készítsek el egy megvalósíthatósági tanulmányt a mandrel mérési eljárásról. Ez a mérési eljárás kiválóan alkalmazható csövek falára kifejtett, radiális nyomás hatásának vizsgálatára. A feladatom az volt, hogy elegendő információt szerezzek a VVER típusú reaktorokban használatos fűtőelem burkolatcsövek mandrel mérésének megvalósíthatóságáról. Meg szeretttük volna tudni, hogy megvalósítható-e a mérés kis méretű mandrel szerszám szegmensekkel; kibírja-e a terhelést (szilárdságilag megfelel), mennyire deformálódik el (merevsége megfelel) egy ilyen acél eszköz a mandrel mérés közben. Az eredeti elképzelések szerint arra is kaphatunk adatot, hogy a szegmens erőátadása a cső falára mennyire egyenletes, mekkora feszültség ébred a cső falában. Választ kellett keresnem arra kérdésre is, hogy vajon a szerszámok deformációjának elkerülésére alkalmazott, kevesebb mandrel szegmens esetén homogénebb-e a keletkezett feszültség a mintában, vagy épp a több szegmens lenne a megfelelő kísérleti elrendezés.

A szegmentált mandrel technika megvalósíthatóságát numerikus módszerekkel vizsgáltam: olyan végeelemes numerikus modellt készítettem, amelynek a geometriája megegyezett a mérésben alkalmazni kívánt, valódi kísérleti berendezés és a minták méreteivel. A modellezett geometria 8 mm magasságú cső volt, amelynek külső és belső sugara rendre 4,55 mm és 3,85 mm volt. A minta mérete adott volt, így a mandrel szerszám külső mérete is meghatározott volt. A mandrel szerszámok esetében azt a legnagyobb vastagságot kerestem, amely esetén a szerszám szegmensek, a nyomótüske benyomás előtt, az oldalfelületükön teljesen összeérnek, azonban a minta és a szerszám terheletlen felületei között megmarad egy 0,023 mm széles, a minta felületén elhelyezkedő elem átlagos méretének 0,2-szerese méretű rés. A nyomótüskét, az egyszerűség kedvéért, merev testként definiáltam, amelynek a felszínén az érintkező testek között súrlódási erő lép fel. A minta és a mandrel szerszámok közötti rés kialakításának az oka a kísérlethez való hasonlóság volt.

A modellezés során nagyságrendi becslést kívántam tenni arra, hogy a különböző szimmetriájú mandrel szerszámok hatására milyenek lehetnek a burkolatban ébredő feszültségek. A végeelemes modellezéshez MSC Marc, általános célú, implicit végeelem számító programot használtam, az elő- és utófeldolgozást a Mentat programmal végeztem. A Mentatban geometriai alakzatokat és végeelemes hálóelemeket definiálhatunk. A geometriai alakzatok automatikusan és manuálisan hálózhatók. A Mentat lehetővé teszi azt is, hogy pontokból, az azokat összekötő görbékből, és az ezek által határolt felületekből térbeli hálóelemekkel építhessünk fel. Az alacsonyabb dimenziójú hálóelemeket kiterjeszthetjük térbeli testek hálózásává. A hálóelemeket elforgathatjuk,

eltolhatjuk, nagyíthatjuk, vagy ezeknek a transzformációknak a kombinációit alkalmazhatjuk. Két egymásba ágyazott térbeli alakzat különbségét képezhetjük, teljesen algoritmikusan. A program képes felismerni a keletkezett alakzatok azonos helyen duplikált hálóelemeit, vagyis a testek felépítése során egymás mellé rajzolt, de fizikailag azonos hálóelemeket és nódusokat, csomópontokat átsorszámozza. Ezzel a programmal könnyen és jól definiálhatók az érintkező testek, és a határfelületek pedig elkülönülnek a számítás során.

A Mentat tetraéder és téglatest elemekkel képes automatikusan hálózni bármely alakú testet, azonban a tetraédes hálóelemek gyakran számítási hibákat okoznak. Téglatestek körív mentén könnyen alkalmazhatók: a körívre és a gömbfelületre numerikusan „ráfeszíthetők” a téglatest elemek ívoldali felületei. A görbe felületre kifeszített térháló-elem térfogata, illetve az ívekre ráfeszített síkháló-elem felülete a megfelelő mértékben növekszik. A program felismeri, és a számolás során nem engedi alkalmazni azokat a hálóelemeket, amelyek kiugróan nagy vagy kicsiny térfogatúak, illetve azokat, amelyek tetraéderré torzulnak. A programban a megjelölt hálóelemeket különböző fizikai paraméterekkel jellemezhetjük.

A program segítségével könnyen megadhatók a számolás kezdeti feltételei, és az, hogy mely elemekre vagy elemcsoportokra jellemzők a megadott kezdeti, fizikai mennyiségek (anyagparaméterek, hőmérséklet, külső erők, kényszerek).

A modell készítésekor felvehetünk merev testként definiált geometriai alakzatokat is. Ezeket az alakzatokat kényszerek megadásával a vizsgált elemek nódusaihoz rendelhetjük. Ezzel a megoldással a nódusokra olyan geometriai kényszerfeltételeket adhatunk meg, amelyek hasznosak lehetnek a számolás során. Az érintkező felületeken súrlódás definiálható, vagy a felület elmozdulása során olyan feltétel adható meg, amely a modellezendő anyagra ható külső erőként, mozgásként vagy hőforrásként, esetleg merev rögzítésként jelenik meg.

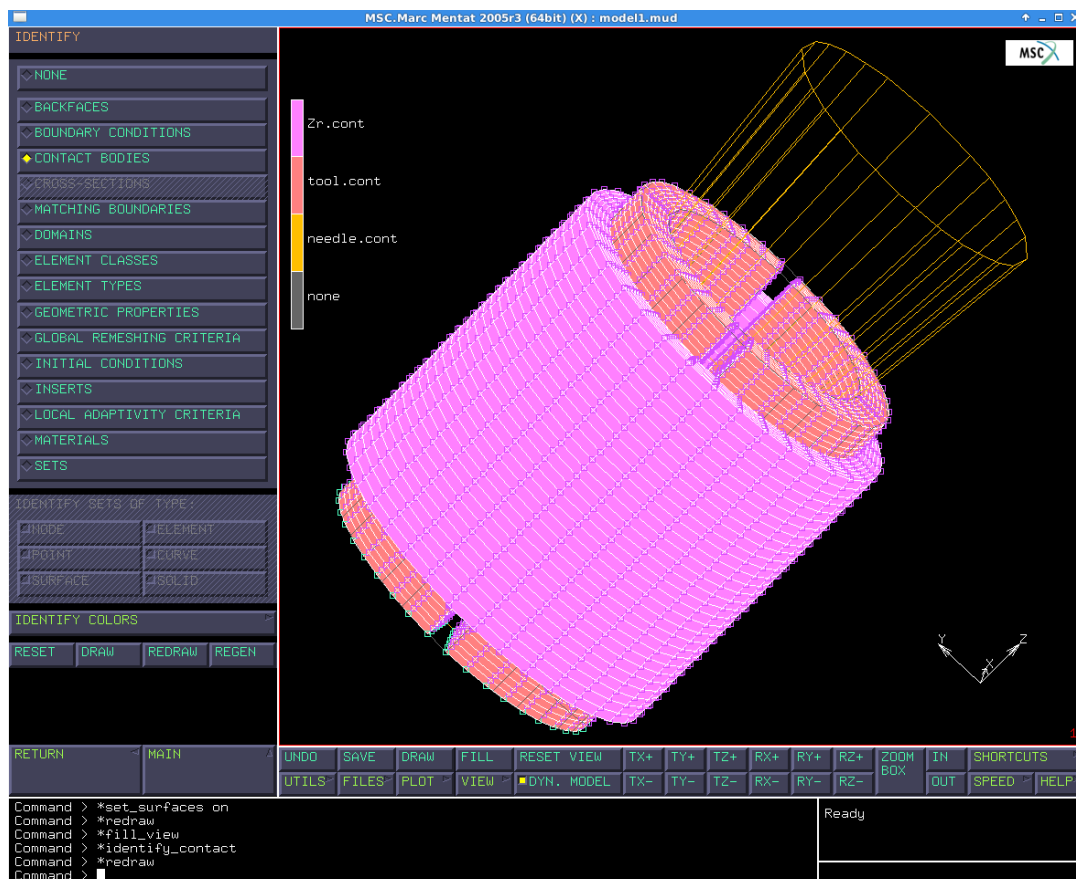
A Mentat lehetőséget kínál arra, hogy minden adatot paraméteresen adjunk meg, és így olyan programokat írhatunk, amelyekkel automatikusan, egymás után több, a paraméterek változtatásával kapott eset is számítható. A számítás verifikálása és a paraméterérzékenység vizsgálata szempontjából ez a tulajdonság több paraméter hatásának gyors feltérképezését teszi lehetővé. A Mentat adatait az MSC Marc program dolgozza fel.

A modellalkotás során a következő közelítéseket alkalmaztam:

- a cirkónium burkolatcső-minta és az edzett acél mandrel szerszám anyaga is homogén, izotróp anyagtulajdonságú: az azonos sűrűségű elemeket ugyanazon Young-modulussal jellemeztem,
- a modellezett szilárd testeket nyolc csomópontos hálóelemekkel építettem fel. A nyomótüske geometriai alakját merevnek tekintettem,

- minden érintkező felület között azonos súrlódási együtthatót feltételeztem (effektív súrlódási együttható). A számítások során a Coulomb súrlódási modellt a Marc javasolt alapbeállításával futtattam,
- mechanikai szimulációt végeztem, állandó hőmérsékleten,
- a nyomótüske elmozdulását állandó sebességűnek feltételeztem,
- nem különböztettem meg az E110 és az E110 G burkolatanyagokat,
- a mintában kialakuló feszültséget az elemekre számított ekvivalens von Mises feszültségként kerestem,
- a nyomótüskét olyan mértékben nyomtam be, amíg a feszültség sehol nem haladta meg a burkolat folyáshatárát, így a modellben az alkalmazott, lineárisan rugalmas anyagmodell elfogadható volt.

Az elkészített modellben a cirkónium burkolatcsövet a Pakson is használatos, E110 jelű burkolatcső geometriájával azonosan hálóztam. A burkolatminta hálója sugárirányban 6, szög szerint 36, és hosszirányban 30 hálóelemből épült fel (6480 elem). A 14. ábrán egy cirkónium burkolatcső hálózása (rózsaszín elemek), egy két szegmensből álló mandrel szerszám hálózása (bézs színű elemek) és a nyomótüske reprezentációja (sárga) láthatók.



14. ábra. A megvalósítandó mérési elrendezés egy lehetséges, két szegmens szerszámából álló megoldása Mentat környezetben.

A mandrel szerszám numerikus modelljét a következők szerint készítettem el: a körkörös szerszámok külső átmérői alul-felül állandóak voltak, belső alsó és belső felső sugaruk rendre 2 mm és 3 mm nagyságú volt, a szegmensek hossza 10 mm volt. A szegmens ívhosszát szög szerinti paraméterben adtam meg, így a szegmensek számát a numerikus analízis futtatása előtt a felhasználó képes volt előre megadni. A hálózást végző algoritmus figyelembe veszi a tervezett szegmentált szerszám-számot, és annak megfelelően, automatikusan készíti el a geometriát. A szegmentált szerszámok a kezdeti időpillanatban, minden esetben 0,1 fokos szögben elválasztva helyezkedtek el. Az ilyen elrendezésű mandrel szerszám egy szegmense 6 sugárirányú, $36/n$ (n a szegmensek száma) szög szerinti és 42 hosszirányú, azaz négy szegmens esetében (4 mandrel esetén) 2268 elemből épül fel. Ez az egyszerű matematikai megoldás lehetővé tette, hogy a kezdeti, terheletlen állapotban a szegmensek elemei ne érintkezzenek és főleg ne metszék egymást. Rejtett, de érdekes haszna mutatkozott ennek a matematikai közelítésnek: a térbeli test ezzel elveszítette hengersizimetriáját, periodikus szimmetria lépett fel, azonban a számított modell sokkal inkább hasonlított az eredeti kísérleti elrendezés szimmetriájához. A páratlan számú szegmensek esetében hasonló mértékben elvesz a hengersizimmetria, emellett azonban nem maradnak meg az olyan speciális irányok sem, amelyek mentén tükörszimmetria alakulhatna ki.

A megvalósíthatósági tanulmányban a modell elemeket két csoportba osztottam. Az egyik csoport a cirkónium burkolat cső elemei, a másik pedig a mandrel szerszám szegmenseinek elemei voltak. Az elemek mechanikai tulajdonságait a 2. táblázat szerint definiáltam:

2. táblázat. A mandrel numerikus szimuláció elemeinek anyagtulajdonságai, a [73] alapján.

Elemek csoportja	Young-modulus	Sűrűség	Poisson-tényező	Gyakorlati anyag
Burkolatcső	9385 N/mm ²	6550 kg/m ³	0,35	E110
Szegmens	20600 N/mm ²	7850 kg/m ³ *	0,3	szerszámacél

* az erősen ötvözött szerszámacélok sűrűsége ennél nagyobb

Geelhood, a FRAPCON-3.4 kódban, a Zr ötvözet Young-modulusára az alábbi összefüggést adja meg:

$$E(T) = 0,1(1,149 \cdot 10^5 - 59,9T)$$

A képletben a T a hőmérséklet, Kelvinben, és E a Young-modulus N/mm²-ben (MPa-ban). $T = 293$ K (20 °C) hőmérsékleten ez $E_{\text{FRAPCON-3.4}} = 9854,7$ N/mm²-nek adódik [74]. A két Young-modulus közötti eltérést elhanyagolhatónak tekintettem. Bár a Young-modulus hőmérsékletfüggő, ebben a számolásban állandó hőmérsékletet feltételeztem. A fenti képlet célja a Young-modulus értékének megerősítése volt.

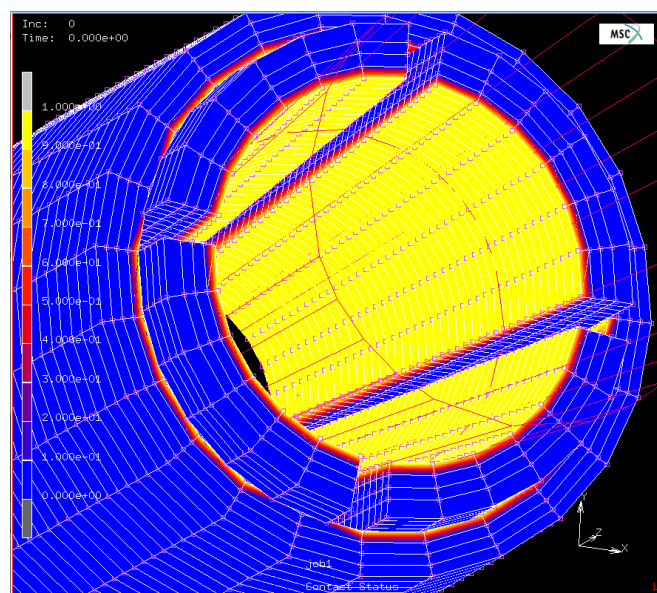
Mindkét komponensre jellemző volt, hogy azokat homogén, izotróp anyagtulajdonságúaknak definiáltam. A számítások során ezek az anyagtulajdonságok állandó értékűek maradtak, és a

hőmérséklet sem változott. Az anyagtulajdonságok ilyen szigorú megkötése akkor adhatott vissza elfogadható közelítést, ha feltettem, hogy az alakváltozások a folyáshatárt meg sem közelítik. A megvalósíthatósági tanulmány során elvégzett szimulációkban ez volt a futtatás egyik feltétele.

Az MSC Marcban a testek közötti felületek érintkezésének definícióját node-to-node modellel adtam meg. Ennek a modellnek azt az előnyét használtam ki, hogy a számítás abban az esetben gyorsabb, amennyiben a test nagyszámú csomópontot tartalmaz, és amennyiben pontosan tudható, hogy mely csomópontok érinthetik a másik test adott csomópontjait.

A CONTACT TABLE opció lehetőséget adott arra, hogy megadjam az MSC Marc-nak, melyik test melyikkel érintkezik, és melyik testek nem érintkeznek. Az MSC Marc DOUBLE-SIDED opcióját bekapcsolva a testek közötti érintkezés vizsgálata mindkét test irányából megtörténik. Alapértelmezés szerint, ha egy csomópont egy éles sarokban az érintkezési tőrésnél nagyobb távolsággal lecsúszik a deformálható test határáról, akkor a csomópont és az érintkező test közötti kapcsolat megszakad.

A megvalósíthatósági tanulmány során végzett számításokban az alapbeállítástól nem tértem el. Az érintkező felületeken azonos súrlódási együtthatót definiáltam, mind a nyomótüske és a mandrel szerszám között, mind a mandrel szerszám és a cirkónium fűtőelem burkolat cső között. Az érintkező felületeket mutatja be a 15. ábra. A belső felületen a nyomótüske és a mandrel szerszám érintkező felületeit, a peremen a cirkónium burkolat cső és a mandrel szerszám érintkező felületeit láthatjuk, sárgával megjelölve. Látható, hogy a nyomótüske a mandrel szerszám felületére milyen egyenletesen fekszik fel.



15. ábra. A mintadarabok érintkező felületei.

A peremfeltételek megadása során azt kellett definiálnom, ahogyan a cirkónium burkolat csövet és a mandrel szerszámot a szakítógépben alátámasztjuk, ugyanúgy, ahogyan azt a valódi kísérletben terveztük. A szimuláció során mind a cirkónium burkolat cső minta, mind a mandrel szerszám egy

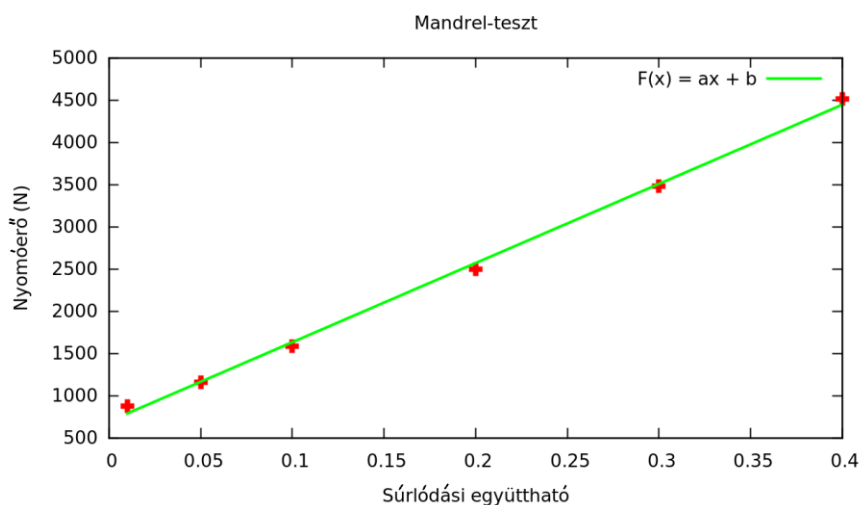
„numerikus” alátámasztást kapott. Mind a két test legalsó nódusait a nyomótüske mozgásának az irányában fixen rögzítettem, ezzel azon pontok elmozdulását nem engedtem meg. Az „asztalon fekvő” minta és szerszám legalsó nódusainak oldalirányú csúszását a számolásban megengedtem, de jelen közelítésben, az itt fellépő csúszási súrlódást nem definiáltam. A szimulációban a cső tágulása során, a tartóasztalon fellépő súrlódási veszteséggel nem számoltam.

A kezdeti időpillanatban a nyomótüske erőmentesen, de teljes felületével felfeküdt a mandrel szerszám belső felületére.

A szimuláció során először négy szegmensből felépített mandrel szerszámmal végeztem a számítást. A különböző futtatások során, azonos feltételek mellett, az érintkező felületek közötti súrlódási együttható értéket változtattam. A nyomótüske benyomódás mértékét úgy állapítottam meg, hogy a cirkónium átmérőváltozása ne haladja meg a folyáshatárhoz tartozó alakváltozás mértékét a deformáció elegendően kicsi maradjon, és a rugalmas alakváltozás tartományába essen. A futtatás addig tartott, amíg a nyomótüske elmozdulása elérte a 0,1 mm-t.

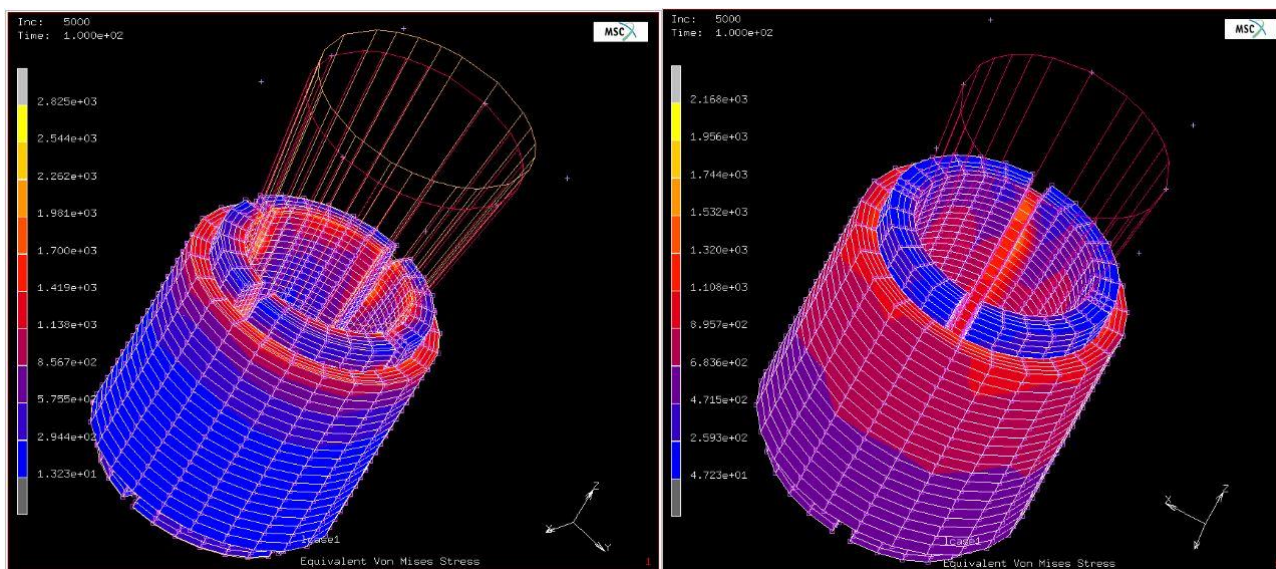
A súrlódási együttható függvényében felvettem a nyomótüske 0,1 mm mélységbe történő benyomódásához szükséges erőket, amelyet a következő, 16. ábraán látható grafikonon ábrázoltam. Az ábrán a súrlódási együtthatóval egyenes arányban növekvő, z irányú nyomóerőt láthatunk, ami megfelelt a várakozásunknak.

A további elemzéseim során körülbelül 2500 N nagyságú erőkhöz illeszkedő 0,2-es súrlódási együtthatóval mint „elfogadható értékkel” számoltam. Ezt a cirkónium burkolatból készített, 2 mm-es gyűrűk roppantásának numerikus szimulációja során szerzett tapasztalatok alapján, a laboratóriumi kollégáim javaslatára vettem alapul [73]. A különböző értékű súrlódások esetében a cirkónium burkolat cső mintában fellépő feszültségeloszlások egyenletességei hasonlóak voltak. Megjegyzendő, hogy a súrlódó felületek kenésével biztosítható lenne ennél kisebb súrlódási együttható.



16. ábra. A súrlódási együttható függvényében a szükséges nyomóerő 0,1 mm nyomótüske benyomódásnál.

A fentiek alapján elkészített modell segítségével azt számoltam ki, hogy egy pontatlanul legyártott nyomótüske milyen hibát okoz a cirkónium burkolat cső mintában kialakuló terhelés egyenletességében. A szerszám gyártási hibák szimulációja során a nyomótüske felső sugarát 1 mm-el megnöveltem, ami 33% mérethibának felel meg a nyomótüske szélesebbik, „felső” végén. A 17. ábraán egy négy szegmensből álló mandrel mérés numerikus számításának eredménye látható. Jól látszik, hogy a hibásan legyártott nyomótüske hatására a mandrel szerszámok felületén felülről lefelé egyre kisebb feszültség ébredt. A 17. ábra bal oldalán a nyomótüske kevésbé, a jobboldali ábrán pedig már sokkal jobban benyomódott.

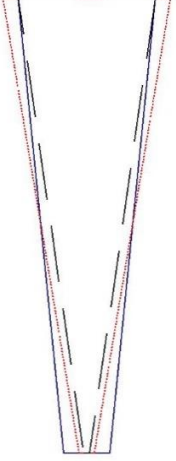


17. ábra. A 33%-os mérethibával gyártott nyomótüskével elvégzett számolás eredménye.

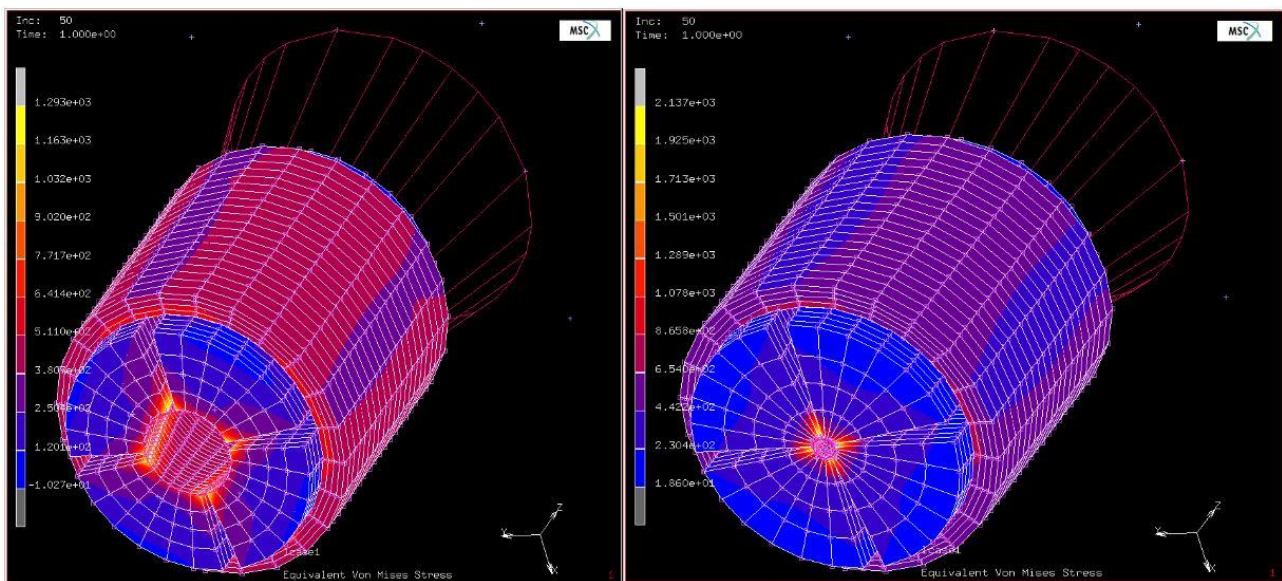
A benyomással arányosan egyre jobban rápréselődik a mandrel szerszám a merev testként közelített nyomótüskére és a cirkónium burkolat cső mintában is olyan hosszirányú fellépő inhomogenitást tapasztalhattunk, ami a tervezett kísérletben elfogadhatatlan lett volna. Az elnagyolt számítás nem azt mutatta meg, hogy milyen pontosan kell legyártani a nyomótüskét, illetve a mandrelek belső felületét egymáshoz képest, hanem azt, hogy bármilyen pontatlansággal készülnek a szerszámok, az bizonyosan inhomogenitást okoz majd a minta felszínén.

A megvalósíthatósági tanulmány következő lépésében azt vizsgáltam, hogy miként változik a minta felszínén a feszültség egyenletessége, amennyiben a nyomótüske kúpszögét $5,7^\circ$ -ról $9,6^\circ$ -ra változtattam. Ekkor két megoldást vizsgáltam részletesen: az első esetben a nyomótüske kisebbik végét kissé elvékonyítottam, vastagabbik végét megnöveltem, a második esetben a vékonyabb véget vékonyítottam el. Mindkét esetben a nyomótüske geometriájához pontosan illeszkedő mandelékkel számoltam. A 3. táblázat szerinti módosításokat elvégeztem (a zárójeles szám az eredeti geometriához tartozó sugarakat jelöli):

3. táblázat. A nyomótüske kúpszögét másfélszeresére növelve megadott számítási konfigurációk.

A nyomótüske felső végének sugara	A nyomótüske alsó végének sugara	Megjegyzés	
$(3 \text{ mm}) + 0,85 \text{ mm}$	$(2 \text{ mm}) - 0,85 \text{ mm}$	tompa nyomótüske konfiguráció (piros)	
$(3 \text{ mm}) + 0 \text{ mm}$	$(2 \text{ mm}) - 1,7 \text{ mm}$	hegyes nyomótüske konfiguráció (kék)	

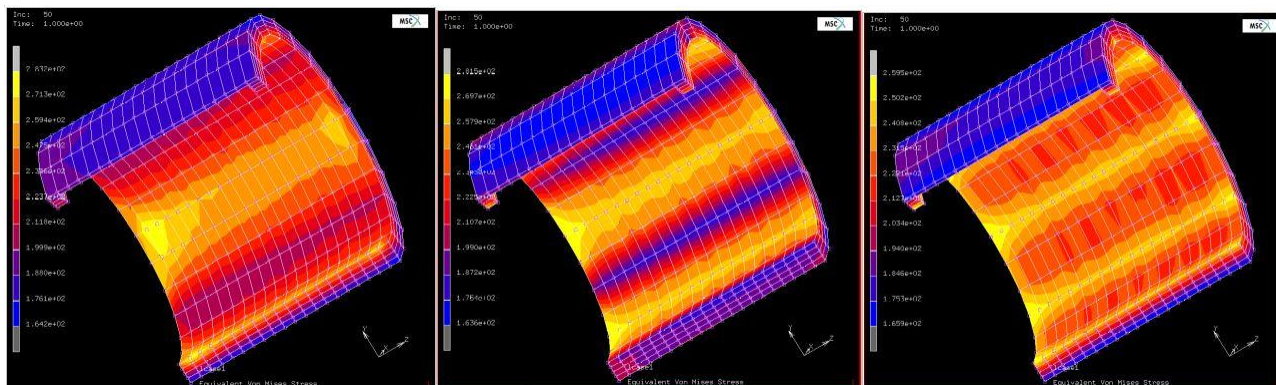
A számítások elvégzése után összehasonlítottam a kapott ekvivalens von Mises feszültségek értékeit és a gyűrű terhelésének egyenletességét. A 18. ábrán, balra, a tompa tüske, jobbra a hegyes tüske konfigurációban végzett, ugyanolyan feltételekkel végrehajtott számítás eredménye látható. A színskála tanúsága szerint a hegyes nyomótüske terhelésekor az elvékonyodott felületek élein igen nagymértékben megnövekszik a nyomás (koncentrálódik), ami a tompa nyomótüske esetén nem következik be olyan mértékben, és a terhelés eloszlik az élektől „távolabbi” felületek mentén. Emiatt a hegyes nyomótüske konfigurációt elvetettük.



18. ábra. A tompa nyomótüske (balra) és a hegyes nyomótüske (jobbra) hatása a cirkónium burkolat cső mintára.

A szegmensek számát növelve, ahogyan a 19. összehasonlító ábrán is látjuk, a cirkónium cső minta belsejére ható felületi erő egyenletesebbé vált. Ezen az ábrason a cirkónium burkolat cső minta a mandrel szerszám ábrázolása nélkül látható, felterhelt állapotban. Az első négy szegmensből álló, a második hat szegmensből álló, a harmadik pedig nyolc szegmensből álló mandrel szerszám

okozta felületi terhelés látható a minta csövek belső felületén. Az ábrából kitűnik, hogy a több szegmensű szerszám egyenletesebb feszültségeloszlást hoz létre. Ahogy azt egy folyadékkal (gázzal) végrehajtott kísérlet esetében várhattuk volna, a „végtelen szegmensű” szerszám esetén teljesen egyenletes nyomást kaptunk volna a felületen. Az ábrán nem mutatom meg, azonban a számítások egyik eredménye az volt, hogy a mandrel szerszámok belső felületére ható nyomóerő, a kevesebb szegmensből álló szerszámok esetén rendre kisebb.



19. ábra. Balról jobbra a 4, a 6 és a 8 szegmensből álló szerszámmal végzett mandrel mérés közben kialakuló feszültségeloszlás a burkolatcső belső falán.

A mandrel szerszám tervezésekor figyelembe kellett vennem a gyárthatóságot. Technológiai okokból a nyolc szegmensből álló szerszámot nehezen és rendkívül drágán gyártották volna le. Amennyiben a nyolc szegmensű szerszámot választottuk volna, akkor a terhelés hatására fellépő feszültségek igen nagyra nőhettek volna a szerszámban, ami a szerszám sérüléséhez vezethetett volna, ezért a nyolc, esetleg több szegmensből álló mandrel szerszám az acélnál jóval erősebb, különleges anyagokra lett volna szükség. A hengeres belső felület kialakítása a speciális anyagok esetében már komoly szerszámgépet, modern forgácsolási technológiát igényelt volna.

A mandrel szerszámok belső ívének kialakítása forgácsolással igen komoly feladatnak tűnt. A kúpos nyomótüske ellendarabjaiként szolgáló, íves belső kialakítású mandrel szerszámok alakja a nyomótüske benyomódása során nem követte volna le a benyomódó, kúp alakú nyomótüske sugarának növekedését, ezáltal a tüske benyomódással arányos méretű, kifli alakú rés jelent volna meg a szerszám felületei és a nyomótüske között. Nagy nyomótüske elmozdulások esetén látható volt, hogy a nyomótüske csak az érintkezési éleken nyomta volna a mandrel szerszámot, ezzel pedig megnőhetett volna annak a veszélye, hogy a mandrelek az élein eltörnek a mérés során.

A tanulmány eredményeképpen a laboratórium munkatársaival együtt megállapítottuk, hogy a szegmentált szerszámmal végzett mandrel mérések megvalósíthatók, és hat szegmensből álló szerszámmal elvégezhetjük a mandrel méréseket. A tanulmány eredményei alapján összeállított terveink szerint az E110 és E110G jelű, VVER reaktorokban használt fűtőelem burkolatcsövekből legyártott, 8 mm-es hosszúságú csőmintákba mandreleket helyezünk el, majd a szegmentált

szerszámok belső felületéhez illesztett nyomótüskét egy Instron 1195 gyártmányú szakítógéppel segítségével, egyenletes sebességgel benyomjuk a mandrel szerszámok közé. A szakítógéppel nyomóerő-mérő cellájára helyezzük a mintát. A tervezés során, a megvalósíthatósági tanulmány eredményeire hivatkozva arra jutottunk, hogy a szerszámacél mandrel szerszámok belső felületét nem kúposra, hanem sík felületűre kell elkészíteni és a nyomótüskét nem kúp, hanem gúla alakúra kell készíteni.

3.2 A mandrel mérés mérési eredményei

Dolgozatomban - a mérés részleteinek mellőzésével - rövid összefoglalót adok a gyári állapotú és a hidrogénnel töltött E110 és E110G minták mandrel méréséről, majd részletesen megadom a mérés során kapott mérési eredményeket. Ezeket a mérési adatokat használtam fel a mandrel mérés végelemes modellezéséhez.

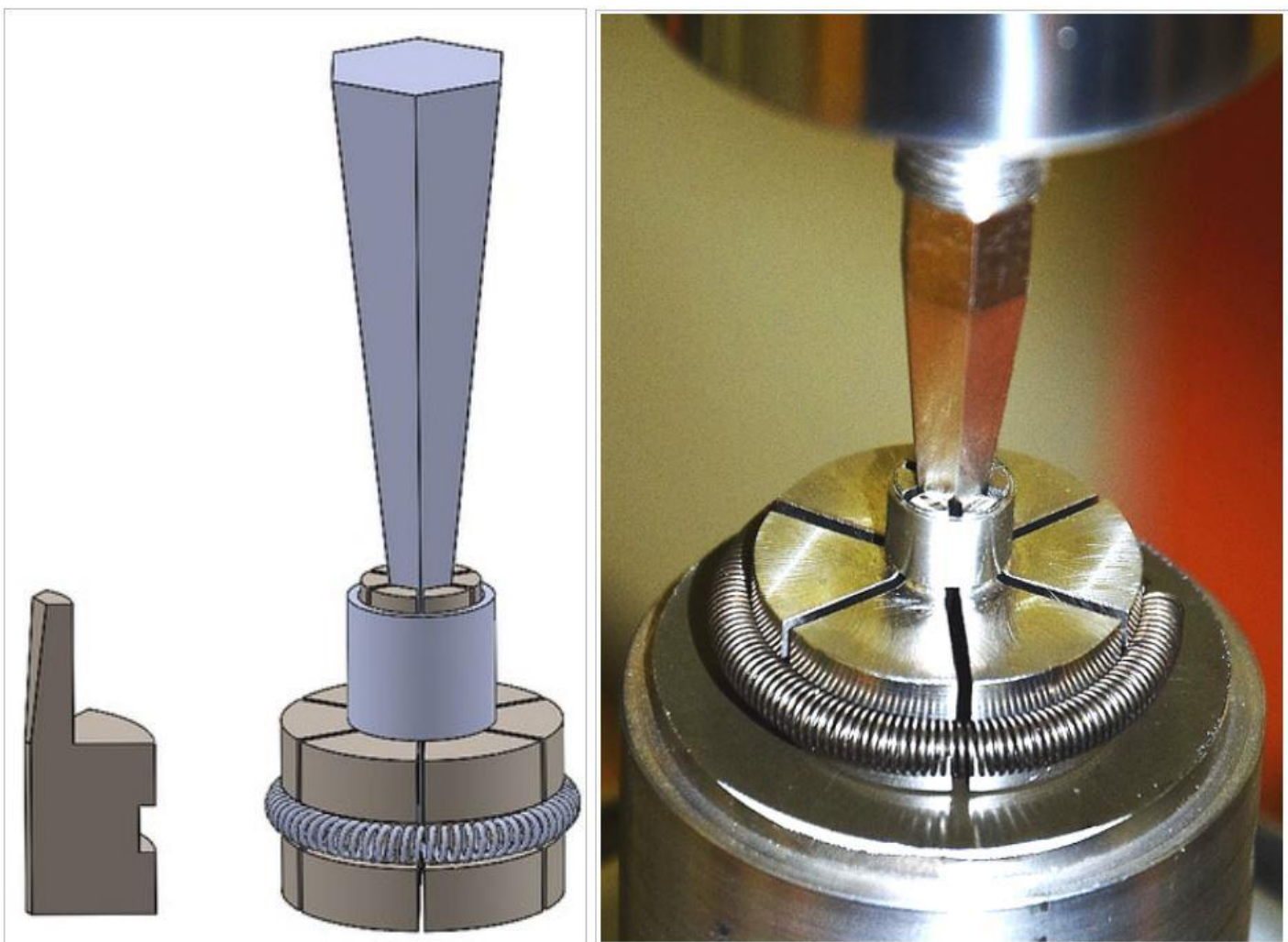
A mandrel mérést a laboratóriumunkban, Horváth Lászlóné és Király Márton végezték el, a hidrogénezett minták előkészítésében Vér Nóra segített. Az előzetes numerikus szimuláció eredményei alátámasztották, hogy bár a mandrel szegmensek számának növelése előnyös, mégis a jó közelítésben homogén feszültségteret ott kaphatunk, ahol a gyűrűminták belső felületén felfekszik a mandrel szerszám, tehát jó, ha kevesebb a mandrel szegmensek száma és nagyok a mandrel szerszámok felületei. Az inhomogenitás mértéke azonban csökken a szerszámok élén a nagyobb számú mandrel szegmens alkalmazása esetében. A fenti, két ellentétes megállapítás mellett a szerelhetőség és gyárthatóság adta a választás alapját. A próbatestek kis mérete és az elérhető gyártási pontosság (ISO2768m szerint a tűrés kisebb, mint 0,1 mm) okán a kollégákkal közösen a hat szegmenses mandrel szerszám mellett döntöttünk. A mandrel szerszámok magasságát 9 mm-ben határoztuk meg. A mandrel szerszám külső sugarát terheletlen állapotban 3,7 mm-nek vettük (a gyűrűk nominális belső átmérője 7,8 mm), gondolván arra, hogy nem csak gyári állapotú, hanem oxidált és oldott hidrogénnel töltött, illetve hőkezelt minták mandrel mérését is el fogják végezni a méréssorozatban. Az alapállapotú gyűrűkön végzett méréseket és a keresztfejssebesség-beállításokat 1.4305 típusú, saválló, rozsdamentes acélból legyártott mandrel szerszámmal tesztelték. A végleges mandrel szegmensek anyaga Böhler K360 Isodur anyag volt, mely egy 8%-os krómötvöztetésű hidegalakító szerszámacél-anyag volt. A CNC maróval legyártott mandrelek felületeit megcsiszolták, végül a darabokat 1050 °C-on, 20 perces hőkezeléssel, 60 HRC (Rockwell) keménységre edzették.

A nyomókúp félkúpszögének megválasztásánál, a végelemes modellezés alapján, az 5,7°-os kúpszöveget választottuk, mivel ezzel a szöggel lehetett lassú, és gyors terheléseket is végezni. A kisebb kúpszögű nyomótüske lehetővé tette a kisebb sebességgel történő felterheléseket is. A végelemes szimulációk alapján nem voltunk képesek eldönteni, hogy szükséges-e a mérés során a nyomótüské-mandrel, és mandrel-minta érintkező felületeinek kenése a csúszási súrlódás

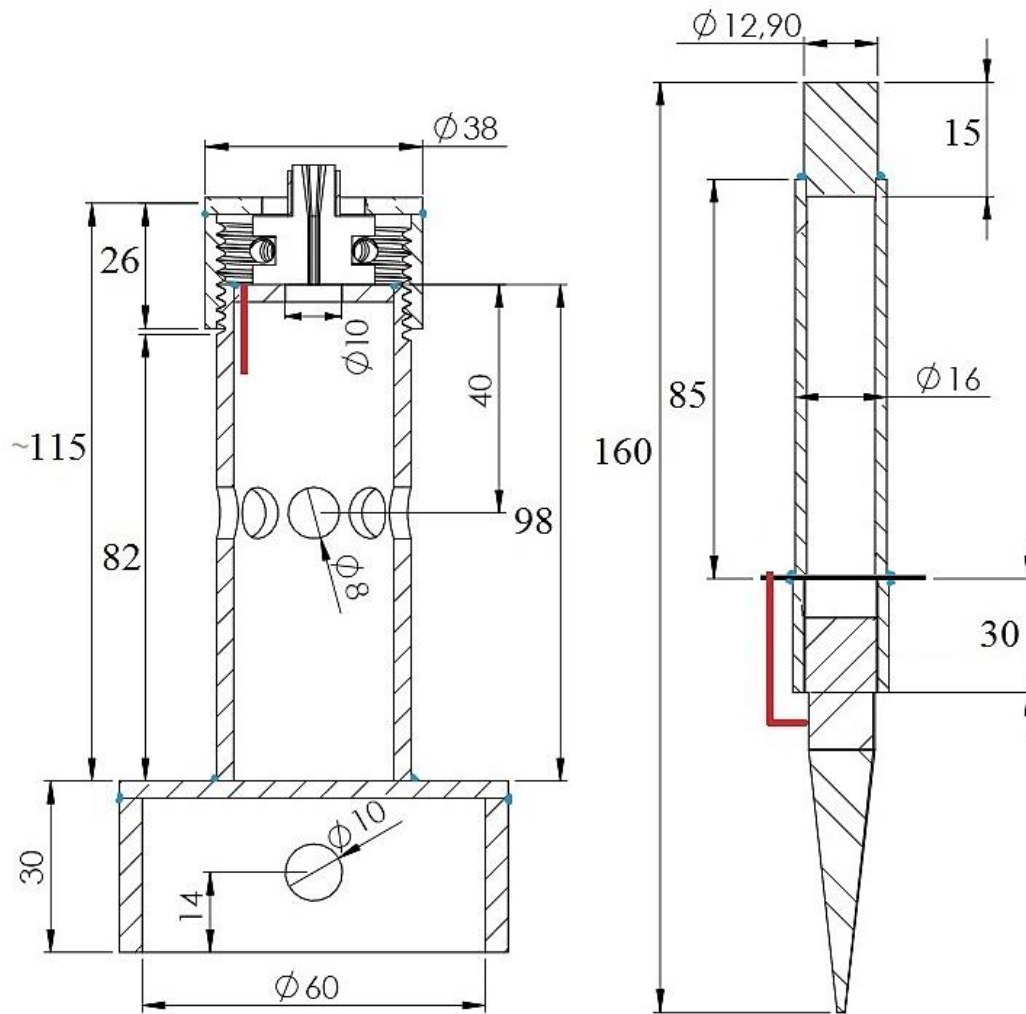
csökkentésére, így a kollégák a kísérletben a legegyszerűbben, kenés nélkül végezték el az első próbaméréseket.

A mandrel szegmenseket egy Instron 1195 típusú szakítógépet álló, alsó gerendájára csavarozott erőmérő cellájának a felszínéhez rögzített alátámasztó asztalra helyezték. A nyomótüskét a felső, mozgó keresztfejre szerelték. A keresztfejre távtartót csövet rögzítettek, amelybe a menetes végű nyomótüskét becsavarták. A mandrelek kezelhetősége végett a szerszámokat egy kiszélesedő résszel bővítették ki. A mandrel szerszámokat egymáshoz képest gyenge rugóval és a mintával pozícionálták. A mandreleket tartó alátámasztó asztalon furatot képeztek, amelyben a nyomótüske a teljes benyomódás esetén is elfér. A 20. ábra bal oldalán a megtervezett mandrel berendezés tervrajza, az index képen a mandrel szegmens ábrája látható. A jobb oldali fényképen az elkészített mandrel berendezés látható.

A 21. ábra bemutatja a kísérleti berendezés kiegészítő alkatrészeit. Ezeket az egységeket a numerikus szimulációban nem hanyagoltam el, hiszen - ahogyan azt a következő fejezetben részletesen olvashatjuk - a mért erőkarakterisztika olyan rugalmas anyagra jellemző, amelyet megmagyarázni a segédberendezések okozta rugalmas visszaható erők szuperpozíciójával lehet.

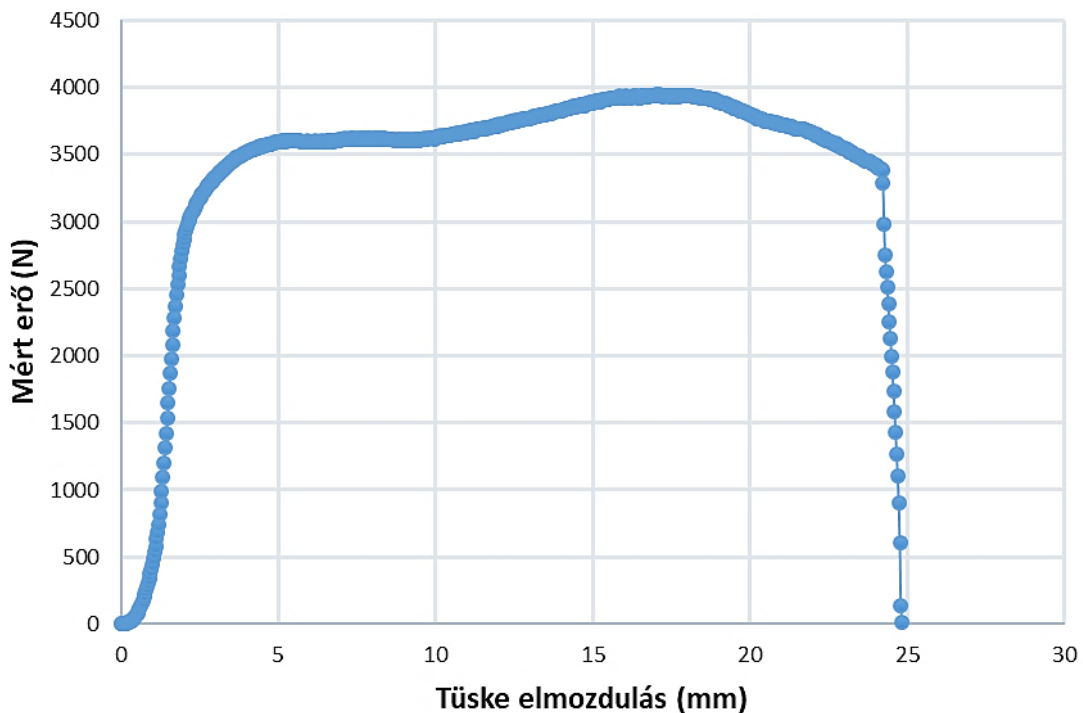


20. ábra. A mandrel elrendezés terve és a megvalósított berendezés.



21. ábra. A mandrelek alá tervezett alátámasztó asztal és a tüskét tartó felső szerszámbefogó keresztmetszeti rajza.

A mérés során a benyomódás mértékének függvényében regisztrálták a nyomóirányban fellépő erőt. Az Instron 1195 keresztfej elmozdulás sebességét 2 és 5 mm/perc értékre állították be. A mandrel szegmenseket a csőmintába illesztették, a mandrel szegmensek alján pedig gyenge rugóval rögzítették a szegmensek pozícióit. Ezek után a szakítógépbe behelyezték a minta csövet. A szakítógép mozgó keresztfejére szerelt nyomótüskét a mandrel szegmensek érintéséig beengedték, ezzel a minta és a mandrel szegmensek minimálisan egymásra feszültek, így a mandrel berendezés már nem tudott darabjaira hullani. Mindeközben a mandrel szegmensek a nyomótüske geometriájához idomultak, befordultak, megfelelő mértékben oldalra csúsztak. Ekkor egy védő plexit húztak a mandrel berendezés köré. A szobahőmérsékletű mandrel berendezés előkészületeit ezzel elvégezték, a mérés során a szakítógép regisztere automatikusan elindult. A keresztfej elmozdulás függvényében felvették a nyomótüske irányában mért erő nagyságát. Egy ilyen mérés eredménye látható a 22. ábrán.

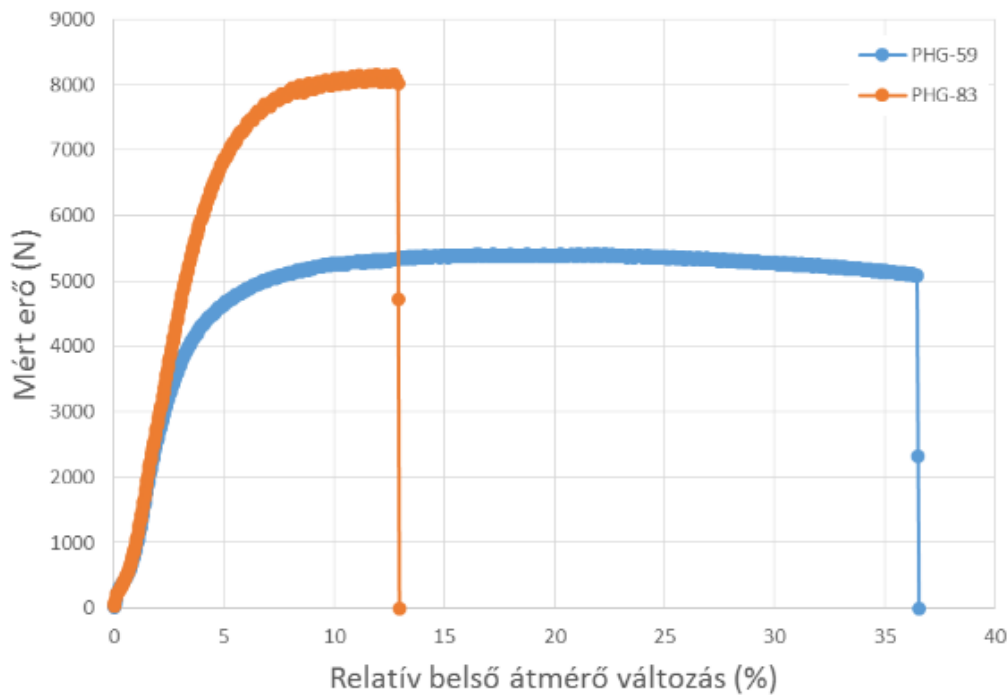


22. ábra. Egy 5 mm/perc keresztfej sebességgel, szobahőmérsékleten mért, alapállapotú E110 gyűrű (MSE8-06) erő – tűske elmozdulás görbéje.

A próbamérések során a legszembetűnőbb, első eredmény a kialakult mintaalak volt (23. ábra). Ahol a mandrel szerszámok felfeküdtek a minta felületére, ott a minták sugara megnőtt, ahol azonban a mandrelek között rés alakult ki, ott tangenciális húzás volt a jellemző a résben, azaz a minta egyenesen megnyúlt, és a szélei befűződtek. A mérés során a nyomótüske egyenletes sebességgel benyomva szétfeszítette a mandreleket, amelyek a mintát terhelték: szabad szemmel követhető volt a minta anyagának rugalmas, majd képlékeny alakváltozása, a minta elszíneződése a tönkremeneteli helyeken, majd a befűződés és a repedések megjelenése. A próbamérések során több alapállapotú mintát elszakítottak a mandrelek segítségével. A tönkremenetel 85%-os belső átmérő-növekedésnél következett be, vagyis az alapállapotú gyűrű szobahőmérsékleten képlékeny alakváltozással „jóval több”, mint másfélszeresére tágulhatott.



23. ábra. A mandrel szerszám által okozott alakváltozások az első próbamérés alkalmával.



24. ábra. Egy közepes (PHG-59, 627 ppm) és egy magas hidrogéntartalmú E110G minta (PHG-83, 2059 ppm) erő-átmérőváltozás görbéje, szobahőmérsékleten.

Több gyári állapotú minta próbamérését követően a kollégák kísérleti tervet állítottak fel annak vizsgálatára, hogy a fűtőelem csövekből készített minták képlékenységi tulajdonságai miként változnak meg adott mennyiségű, a mintákba beoldódott hidrogén hatására. Hasonló terv készült a különböző mértékben oxidált, és hőkezelt minták esetében is. A tervet E110 és E110G anyagú mintákon egyaránt végrehajtották. Példaként, a 24. ábra egy közepes és egy magas hidrogéntartalmú E110G minta szakítógörbéjét mutatja.

A kollégák a mandrel mérések során egy előre meghatározott mérési mátrix paramétereit követve az alapállapotú minták mellett előkezelt mintákat is elhelyeztek a mandrel berendezésben. Az előkezelés során az E110 és E110G jelű burkolat csövekből levágott gyűrűmintákat hőkezelték, oxidálták vagy hidrogénnel töltötték fel.

3.3 A gyári állapotú minták mandrel mérésének numerikus szimulációja

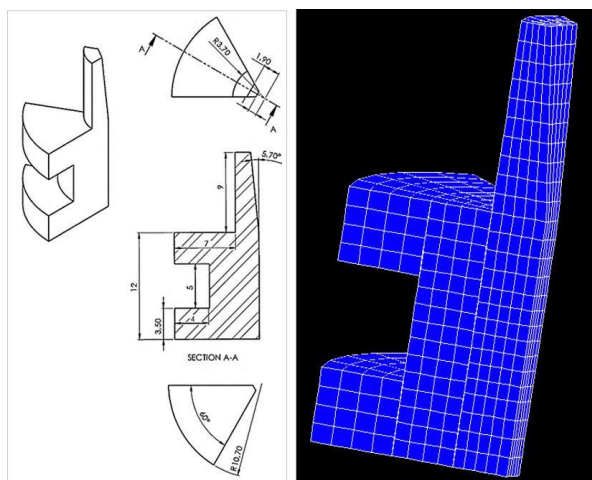
A feladatom az volt, hogy elkészítsem a kutatócsoport által megtervezett és megépített mandrel mérőberendezés numerikus modelljét. A futtatások során meg kellett határoznom azt az effektív súrlódási együtthatót, amelyet használva a modell hibahatáron belül visszaadja a mérés során kapott szakítógörbéket, mind a gyári állapotú minták, mind pedig a különböző mértékben hidrogénnel „töltött”, előkezelt minták esetében. Ebben a fejezetben részletesen leírom, hogyan készítettem el a mandrel modellben szereplő testek geometriai hálózását, és milyen anyagtulajdonságokat adtam a különböző elemeknek. Beállítottam a kísérlet kezdeti feltételeit, majd futtattam a modellt. Bemutatom

a futás eredményeit és a mérési eredményekhez való illeszkedés sikereit és hibáit. Megmutatom, hogy a befogószerzőm hibájából adódó rugalmas hatás hogyan módosította a mért görbealakot.

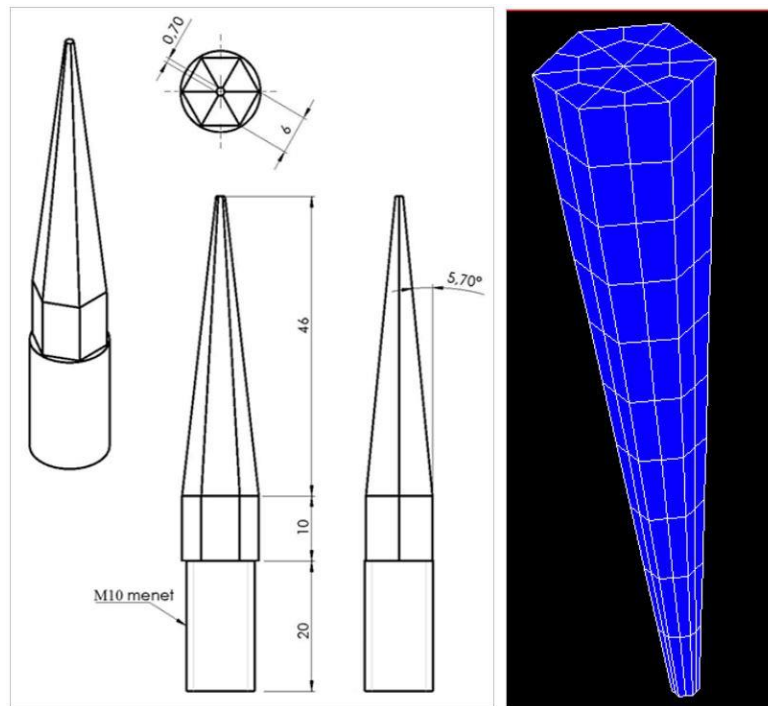
3.3.1 A geometria hálózása

A megvalósított szerzőmoknak megfelelő hálózást kellett kialakítani a további számításokhoz. A számoláshoz használt geometriát négy alakzat elkészítésével hoztam létre. A nyomótűskét, a szegmentált mandrel szerzőmöt, a mérést tartó alátámasztó asztalt és a cirkónium burkolat mintát külön hoztam létre, majd a térbeli hálózás után szerkesztettem egybe. A geometriai alakzatok méreteit a kísérletben alkalmazott méretekkel azonosnak vettem. A hálózás során kizárólag téglatest elemeket alkalmaztam. A hálózás felbontását egyedileg választottam meg, attól függően, hogy a modellezés szempontjából az adott alakzat mennyire tölt be fontos szerepet a számolás eredményében. A hálóelemek térbeli felbontásánál azt is figyelembe vettem, hogy a geometriai hálóelemek a téglatesthez képest mennyire torzulhatnak. Az elemek torzulását azzal tudtam elkerülni, hogy egyes bonyolult geometriai alakzatot kisebb egységekből építettem fel. Ennek a megoldásnak a hátránya az volt, hogy túl nagy felbontás esetén a számolási idő jelentősen megnőtt. A felbontás optimalizációja után minden geometriai alakzat kellő számú hálóelemet tartalmazott, a hálóelemek egymáshoz képest hasonló térfogatúak lettek és mégis sikerült egy olyan modellt felépíteni, amelynek a számolási ideje elfogadható volt.

Egy mandrelt, azaz a szegmentált szerzőm egy szegmensét a 25. ábra bal oldali képén látható adatok alapján készítettem el. Elkészítettem a szegmentált szerzőm egy oldallapjának egy oldalélét, amelyet 2D kiterjesztéssel síklappá nyújtottam. Az oldalél elemeinek és a síklap magassága mentén felvett nódusok számát paraméteresen adtam meg. A metszeti síklap elemeket $59,95^\circ$ -os szög hálóelemnyi részével, egymás után, sorozatosan megforgatva kaptam meg a mandrel szerzőm hálózását (25. ábra jobb oldali képe). A mandrelek közötti rést ebben a modellben $0,05^\circ$ -nak vettem. A mandrel szerzőmöt a hálózás során 1800 elemre bontottam.



25. ábra. A méréshez használt mandrel vázlata (balra) és a végeelemes hálózás eredménye (jobbra).

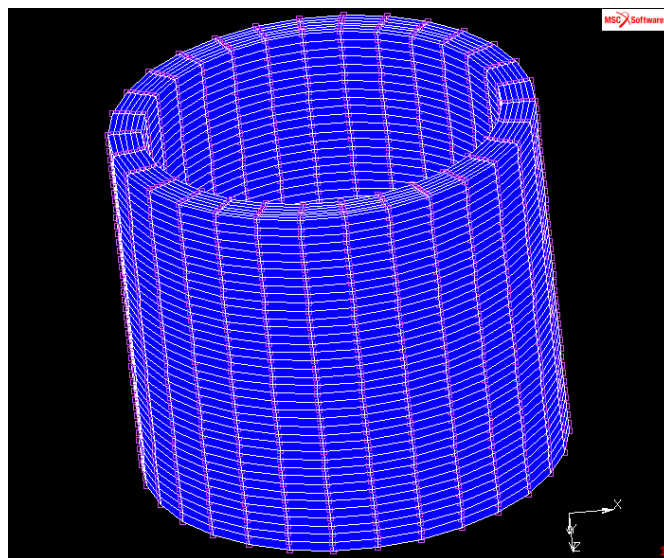


26. ábra. A méréshez használt nyomótüske vázlatja (balra) és a vége-selemes hálózás eredménye (jobbra).

A mérésben használt nyomótüske méreteit a 26. ábra bal oldali képe mutatja. A nyomótüske 46 mm hosszúságú, 12 mm lapátmérőjű, szabályos hatszög alapú csonka gúla volt. Az alakzatot úgy állítottam elő, hogy egy szabályos hatszöget háromszögekre vágtam, majd ezeket a súlyvonalaik mentén négyszög elemekre bontottam. A kapott alapot az alaplap és a csúcslap átmérő arányának megfelelő skálafaktorral kicsinyítve eltoltam egymás fölé, azaz kiterjesztettem háromdimenziós elemekké, amelyek egymáshoz illeszkedve teljes, 180 elemű geometriai alakzatot adtak ki. Az egymás mellett fekvő elemek közös határvonalait, azonos pozícióba eső nódusait és élvonalait törölve tömör testként értelmezhető hálózást kaptam, ahogy azt a 26. ábra jobb oldali képe mutatja.

Az alátámasztó asztalt trapéz elemek hasábbá kiterjesztésével készítettem, egy tömör anyagból. Az asztal modellje rugalmas, amelynek okát abban fogalmaztam meg, hogy a mért a hosszirányú benyomódás a rugalmas testek összenyomódásától függ, amely módosítja a „nyomóerőtüskebenyomódás” görbe alakját. A trapéz alakzat automatikusan „kiadta” az alátámasztó asztal közepén a furatot, amelybe a nyomótüske képes befürödni. Az asztal közepén sokszög alakú furat alakult ki, azonban annak alakja, eltérése a valódi mérésben alkalmazott alátámasztó asztalon készített kör alakú furattól nem lényeges a számolás szempontjából. A számolás szempontjából figyeltem arra, hogy az asztal felszínén ható tapadási és csúszási súrlódási erő, és a súrlódó felületek méretei feleljenek meg a valóságnak.

A cirkónium burkolat csövekből levágott minták külső átmérője 9,1 mm volt, a falvastagsága a modellben 0,7 mm méretű volt, a gyűrű magassága 8 mm volt. A gyűrű alakú csőmintát egy téglaelem sugár menti eltolásával, radiálisan 6 elemből építettem fel, amiket körbeforgatva kiterjesztettem tangenciálisan, 30 elemből álló körgyűrűkké, azokat pedig axiálisan kiterjesztett, 40 elem magas hengerré expandáltam. Az így kapott 7200 elemből álló minta modellje elegendően nagy felbontásúnak adódott a pontos számoláshoz, míg a számolás időigénye nem nőtt meg jelentősen. A futtatás ideje jelentősen csökkenthető lenne a szimmetriák alkalmazásával – azonban az algoritmikus hálózás megvalósításakor teljes modellt készítettem, és meghagytam a kész megoldást ebben a formában. A teljes modell előnye, hogy a szeletek közös felületeinek definíciói és a kezdeti, illetve a peremfeltételek egyszerűbbek. A cirkónium burkolatcső hálózását a 27. ábra mutatja.



27. ábra. A vizsgált cirkóniumgyűrű végeelemes hálója.

3.3.2 Az alkalmazott anyagmodellek

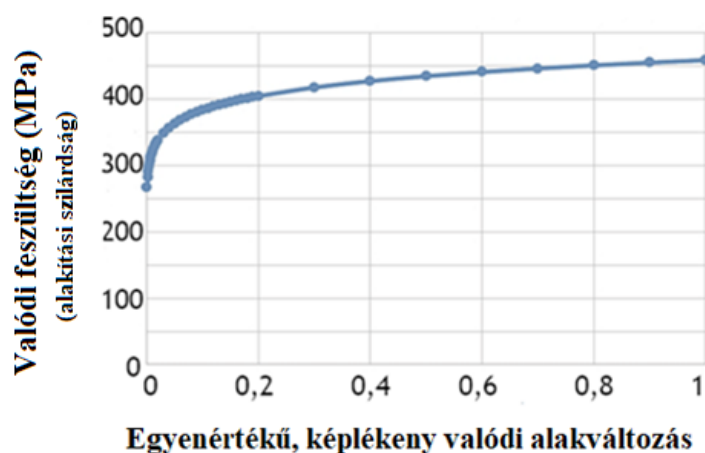
A modell fejlesztése során homogén, izotróp anyagtulajdonság-eloszlást alkalmaztam. Az hálózás ellenőrzését követően az elkészült alkatrészekből összeállítottam a mérés teljes 3D modelljét. A duplikált elemek eliminálása után az elemek nódusait újracsorszámoltam, ezt követően a téglatest elemek irányítottságát ellenőriztem. Az egymással ellenkező irányítottsággal sorszámozott elemek nódusait megfelelő sorrendben újracsorszámoltam. Az alakzatokat csoportosítottam. Végül a megfelelő csoportokhoz hozzárendeltem a megfelelő anyagi tulajdonságokat. Az anyagok jellemzőit a 4. táblázatban adtam meg.

A képlékeny viselkedést a cirkónium gyűrűnél vettem figyelembe. A cirkóniumburkolat viselkedését a képlékeny alakváltozás tartományában egy táblázat segítségével programoztam bele a modellbe. A program „Table driven input” adatként kezelte azt a tapasztalati görbét, amely a keményedő képlékeny alakváltozások számolására alkalmazható. A képlékeny tartományban az

alakváltozással szembeni ellenállást a képlékeny modulus fejezi ki. A Marc-ban a képlékeny tartományra az alakítási szilárdság – valódi alakváltozás diagramot kell megadni, amely során a független változó a képlékeny alakváltozás. Ezt a modellgörbét a korábbi mérések és elvégzett végeselemes számolások eredményessége alapján, tapasztalatból állapítottam meg [73]. A modelladatokat az MSC Marc által használatos táblázatból felvett, grafikus formában a 28. ábra mutatja.

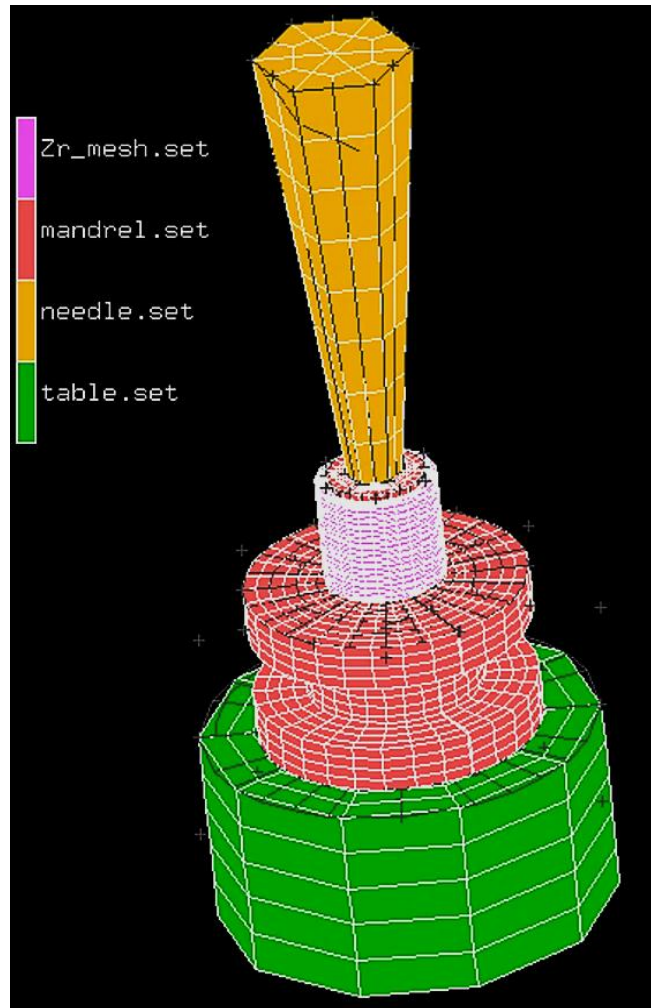
4. táblázat. A modellben használt anyagok fizikai tulajdonságai.

Cirkónium burkolat	Young-modulus	93850 MPa
	Poisson tényező	0,35
Nyomótüske és mandrelek (edzett szerszámacél)	Young-modulus	212000 MPa
	Poisson tényező	0,3
Alátámasztó asztal (hagyományos acél)	Young-modulus	193000 MPa
	Poisson tényező	0,3



28. ábra. A cirkóniumburkolat képlékeny alakváltozását leíró folyásgörbe, melyet a számolás során „Table driven input” típusú bemenetként alkalmaztam.

A 29. ábra mutatja a számoláshoz használt, összeállított geometria egyes részeit. A sárga test a nyomótüske, a piros testek a mandrel szerszám szegmensei, a zöld test az alátámasztó asztal, a rózsaszínnel jelölt, sűrűn hálózott test pedig a cirkónium csőminta. Az ábrából látható, hogy a nyomótüske a mandrel szegmenseket szétfeszíteni igyekszik, azonban ennek akadályát képezi a mandrelekre felhelyezett cirkóniumgyűrű.



29. ábra. A mandrel kísérlet összeállított végeelemes modellje, ahol mérési elrendezés egyes elemei különböző színnel látszanak.

3.3.3 A kezdeti feltételek

A számolás során a nyomótüske függőlegesen, egyenes vonalú pályán, egyenletes sebességgel haladhatott, illetve a tüske felső lapjához tartozó középső nódus oldal irányban nem mozdulhatott el. A tüske képes volt arra, hogy a mandrel szerszámok által meghatározott orientációba beforduljon, szabadon görbülhetett, torzulhatott. Sikerült olyan szimulációt futtatni, amely során a nyomótüske sarkai épp a mandrelek belső síkjának középvonalával estek egybe. Ezt a mérés során is megfigyelték, ezért a kísérlet kezdeti beállításakor a kollégák gondoskodtak arról, hogy ez ne következhesen be. Az ettől eltérő orientációjú nyomótüske mindig képes volt a mandrel szerszám belső felületeire felfeküdni.

A szakítógép nyomóerő-érzékelő felületét (erőmérő celláját) a végeelemes modellben egy, az asztal legalsó nódusaihoz rögzített merev síklap reprezentálta. A síklap előnye az volt, hogy automatikusan, minden irányban rögzíti az asztal legalsó elemeihez tartozó külső nódusokat, és az összes vele érintkező elem által átadott nyomást a teljes síklap felületére integrálva visszaadja azt a nyomóerőt, amit a szakítógép regisztrált a kísérletek során.

A modellben a geometriai nem-linearitások kezelésére a LARGE DISPLACEMENT opciót kellett bekapcsolnom. A számolás során az MSC Marc „dinamikus” egyenleteit használtam. A teljes szimulált idő, a nyomótüske mozgató sebesség, valamint a teljes nyomótüske-elmozdulás értéke az 5. táblázatban látható.

5. táblázat. A számítás során alkalmazott kezdeti feltételek.

Teljes szimulált idő (s)	Összes lépésszám	Tüske sebesség (mm/perc)	Maximális tüske benyomódás (mm)
120	50	3,0	6
120	240	5,0	10
300	600	6,0	30

A kezdeti feltételek megadása során a nyomótüskét az összeállított modellben olyan pozícióban helyeztem el, hogy az a futtatás kezdetén még ne érhesse hozzá a mandrel szerszám belső felületéhez. A program futásakor, az alkalmazott sebességtől függően, 20-50 időlépést követően kezdett összeérni a nyomótüske és a mandrel szerszám, illetve pár időlépés alatt ért el a mandrel szerszám a cirkónium burkolatcső belső felületéhez. A számolás kezdetén a mandreleket a nyomótüske tengelyéhez viszonyítva, tengelyszimmetrikusan, az asztalhoz érintve helyeztük el.

3.3.4 Testek közötti kontaktusok

A számolás során a modellezett testek érintkeztek egymással. A felületekre felírt geometriai kényszerek biztosították, hogy a testek ne tudjanak egymásba nyomódni. A legáltalánosabb megoldás szerint paramétereztem a programot, azaz a kontaktusokban szereplő testeknek nem csak a felszínét, hanem a testek egészét megadtam a program számára. A testek érintkező felületeire vonatkozó feltételeket a legáltalánosabban adtam meg. Így a mandrelek egyedi, a szomszédos testekre irányuló numerikus vizsgálat nélkül, automatikusan reagáltak a szomszédos testekkel való érintkezésre. A kontaktusokban fellépő súrlódási erők akkor kerültek bele a számításba, ha az érintkező felületű elemeknek voltak „közös” síkba eső nódusaik.

Annak érdekében, hogy nagyságrendnyi becslést tehesünk a súrlódás hatására, első közelítésben definiáltam az effektív súrlódást, amit ebben a számításban úgy értelmeztem, hogy az a súrlódó felületeken fellépő súrlódási erők eredő hatásából származtatható, átlagos súrlódási együttható értéke. A bevezetett súrlódási együtthatók segítségével megvizsgáltam a modell paraméterérzékenységét.

3.3.5 Az alapállapotú minták mandrel szimulációjának eredményei

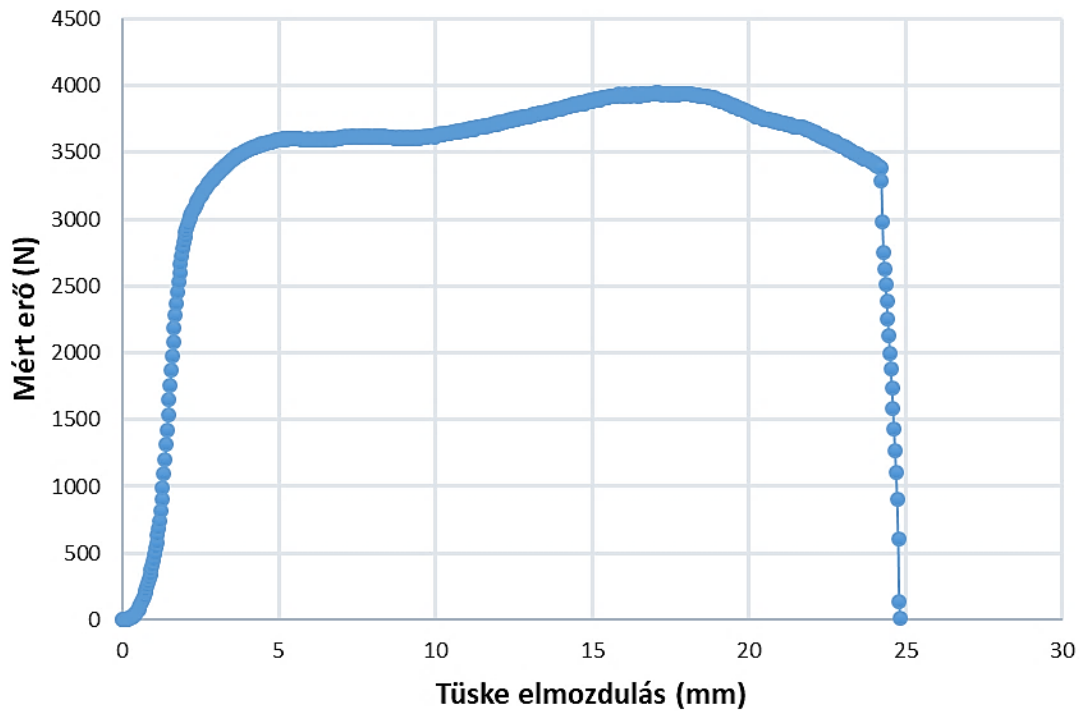
A kísérletek azt mutatták, hogy az alátámasztó asztal–mandrel, a cirkónium burkolat–mandrel és a nyomótüske–mandrel felületek közötti súrlódási együttható mértékétől nagymértékben függ a számított nyomóerő. Az effektív súrlódási együtthatót úgy kellett beállítani, hogy a számított nyomóerő maximális értéke megfeleljen a mért erő maximális értékének. A megfelelő beállítás céljából különböző effektív súrlódási együttható értékekkel futtattam a modellt. A különböző effektív súrlódási együtthatókhoz tartozó, a számítás során kapott, maximális nyomóerőket a 6. táblázat mutatja. A számítási eredmények alapján kicsivel $\mu = 0,3$ alatti effektív súrlódási együttható esetén kaphattam jó egyezést a számított és a mért erőértékek között. A méréskor a maximális erők 4000-5000 N körüli értékek voltak.

6. táblázat. A különböző effektív súrlódási együtthatókhoz számolt nyomóerők.

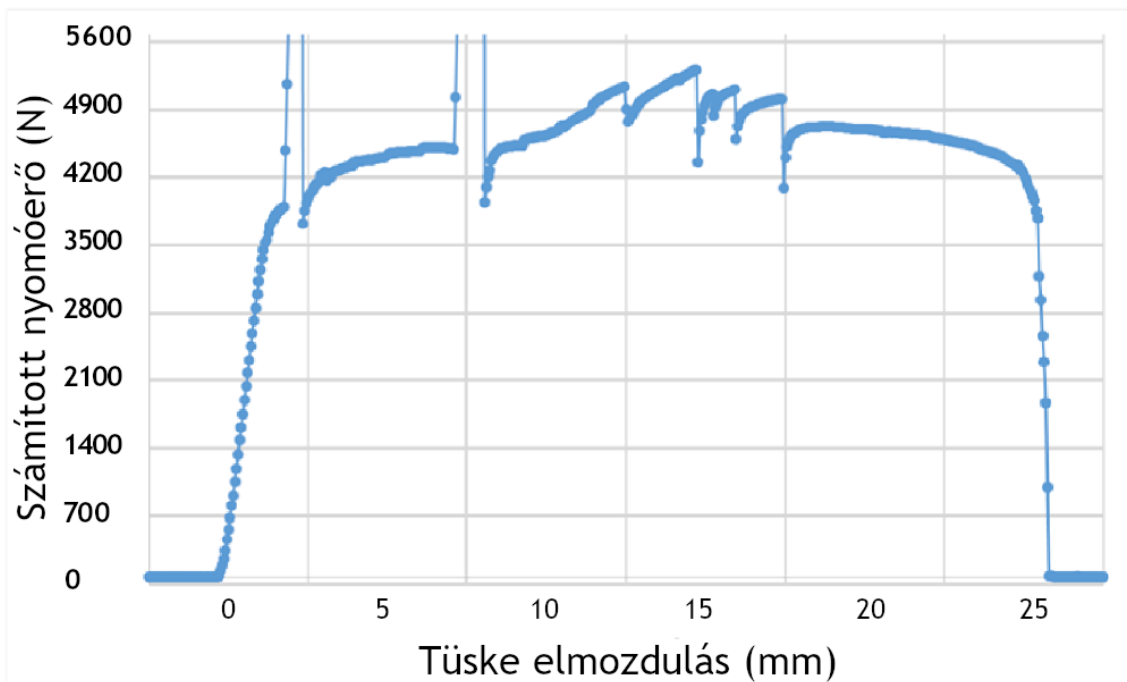
Effektív súrlódási együttható, μ (N/N)	0,1	0,3	0,5
Számolt maximális nyomóerő (N)	1550	4768	8544

A futtatás során látható volt, hogy amikor a nyomótüske a mandrel szegmensek belső felületére felfekszik, akkor a testek - az illeszkedés közben, annak hatására enyhén elfordultak. Erre az illeszkedési szakaszra jellemző volt egy néhány Newton nagyságú erőugrás. Az után, hogy a mandrelszegmensek és a cirkóniumburkolat egymásnak feszültek, a kísérleti eredményhez hasonlóan az erő a benyomódás függvényében elkezdett növekedni. Az erő növekedése kezdetben a nyomótüske benyomódásától függetlenül (azaz időben) állandó volt. Ahogy a gyűrű átmérője elérte a rugalmas alakváltozás határát, folyásnak megfelelő alakváltozást tapasztaltunk. Mivel a szakítógépet szigorúan tartotta a benyomódási sebességet, a folyás megindulásakor a nyomóerő növekedésének erőteljes csökkenését, az erő lassú növekedését tapasztaltuk, mind a mérések során, mind a számolás eredményeképpen.

A mérés során kapott eredményt a 30. ábra mutatja, a 31. ábrán pedig a számított erő-elmozdulás görbe látható. A maximális erő alapállapotú, 5 mm/perc nyomótüske mozgató sebesség mellett, szobahőmérsékleten mért minták esetén, nagyságrendileg 4000 N volt. A szakítógépet keresztfejének elmozdulása 25 mm körül volt, ami a gyűrű 65%-os belső átmérő növekedésnek felelt meg. A számolásban a nyomótüske benyomódásának maximális értékét 30 mm-re állítottam be. Az effektív súrlódási együttható ebben a számolásban $\mu = 0,3$ volt. Ezekkel a feltételekkel a gyűrű számolt belsőátmérő változása 6 mm volt. A számítás végállapotát a 32. ábra mutatja. Ezen az ábrán a már korábban ismerttetett elemcsoportok mellett, látható egy mérési elrendezés alatti „szürke négyzet” és egy fehér kontúrvonalú, a nyomótüske fölött elhelyezkedő, hatszög alakzat.



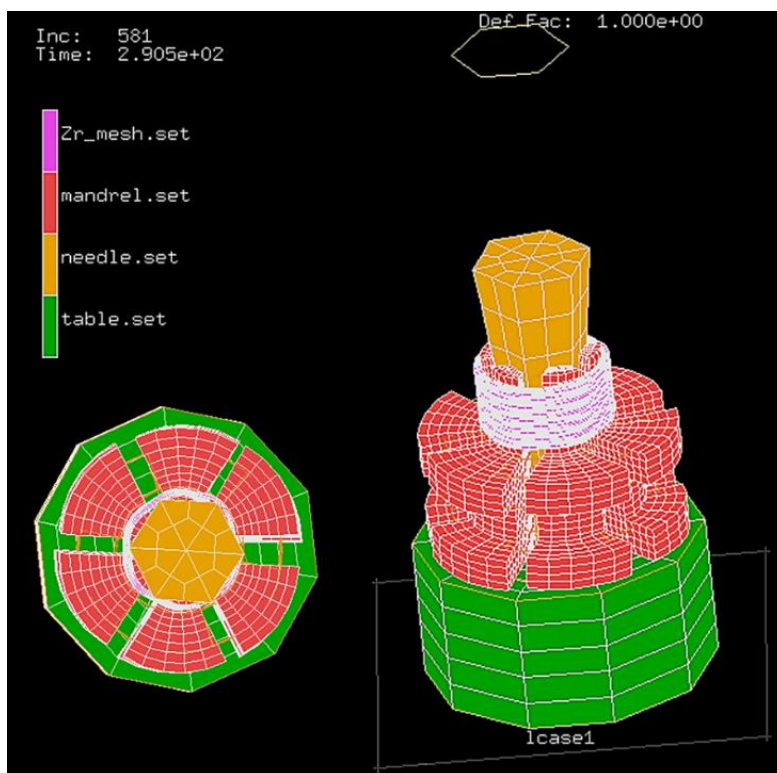
30. ábra. Egy 5 mm/perc keresztfej sebességgel, szobahőmérsékleten mért, alapállapotú E110 gyűrű (MSE8-06) erő – nyomótüske elmozdulás görbéje (kenőanyag használata nélkül).



31. ábra. A számítás során kapott erő – tüske elmozdulás értékek ($\mu = 0,3$).

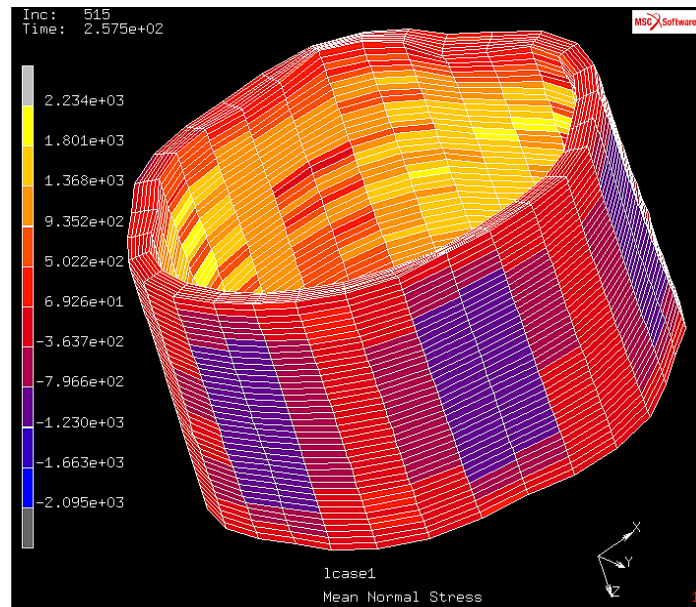
A négyzet az erőmérő cella felületét, hatszög pedig a tüske tetejének kezdeti pozícióját jelöli. A maximális erő az asztal alsó nódusaihoz rögzített síklap felületére integrálva, nagyságrendileg 5000 N volt. Ez a mért görbékkel összehasonlítva nagyságrendi egyezést mutatott, de nem volt elegendően pontos. Azonban az már ebből az egy számolásból is jól látható volt, hogy a modell

megfelelően futott. A várakozásoknak megfelelően sztochasztikus jelleg volt megfigyelhető a mendrelek kezdeti mozgásában és végállapotában, a szegmensek egymáshoz képest aszimmetrikusan csúsztak el a modellben. A pár mintából álló próbaméréseket követően egy szilikon-szén anyagú, súrlódáscsökkentő, Molykote-41 típusjelű kenőanyag alkalmazását vezették be a kollégák. A kenőanyag okán új effektív súrlódási tényezőt kellett találnom. A mérések alapján a legjobb illeszkedést $\mu = 0,25$ esetén kaptam a legtöbb mintára.



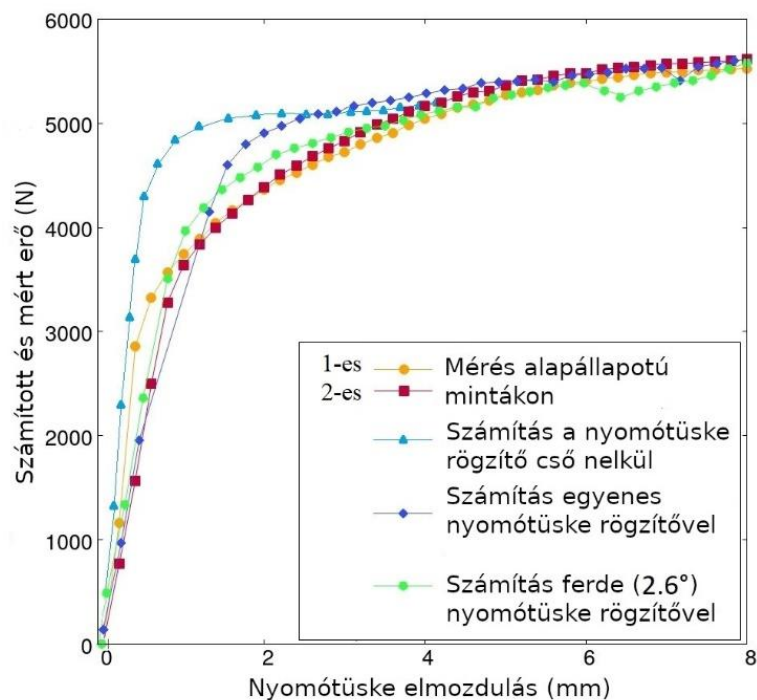
32. ábra. Az egyes elemek elmozdulása a számítás végén, felül- és oldalnézetből.

A számítás után felrajzoltam a cirkónium gyűrűnek a modell által számolt alakját (33. ábra). A színek a közepes normálfeszültség értékeket mutatják (a skála MPa egységekben látható). A kapott eredmény a vártnak megfelelt, a cirkónium gyűrű alakja a kísérletek során kapott alakkal egyezőt mutatott (23. ábra). Látható a cirkónium burkolatsó falának meghajlása a perem környékén. A normál feszültségeloszlásából látszik, hogy a mandrelek mennyire inhomogén módon terhelték a gyűrűt. A számolás eredménye ebben az értelemben megegyezik a korábbi, hasonló számításokkal. A modellszámítás és a mért görbék illesztésénél azt tapasztaltam, hogy a rugalmas tartományt követő kezdeti képlékeny szakaszon a mért görbék laposabbak, azaz kevésbé változik a túskebenyomódáshoz tartozó erő. Tekintettel arra, hogy az anyagállandók jól ismertek, a modellt javítani kellett. A modell abban tért el a valós méréstől, hogy nem tartalmazta a nyomótüskét rögzítő szerszámot (21. ábra, jobb oldal).



33. ábra. A cirkóniumburkolat számított alakja az 515. lépésnél, azaz a 25,75 mm túske elmozdulás után.

A szerszám nem edzett acél anyagáról joggal feltételezhettem, hogy a megnyúlás-eltérést ez okozza. A szerszám reális beépítése azt jelentette, hogy a szerszám nem lehetett tökéletesen centírozva, ennek modellezése során azt tehát megdöntöttem fél fokként. A 2,5 fokos ferdeség környékén 0,1 fokos dőlésszög lépéssel megkerestem a legjobb illeszkedést, amit a 34. ábra is mutat (zöld, kerek pontozott görbe összevetve a piros négyzög jellel és a narancssárga kerek pontozott görbével).



34. ábra. A valóságban alkalmazott nyomótüske tartó szerszám alkalmazása a modellben (1-es és 2-es próbaminta).

3.3.6 A szimuláció automatizálása

Az MSC Marc végeselemes modellező programcsomag lehetővé teszi, hogy párhuzamosan futtassunk több, különböző modellt úgy, hogy minden futó modell más-más paraméterbeállításokkal fut. A modell párhuzamosítása során kifejlesztettem egy futásszám-figyelő algoritmust, amely egy időben csak a megengedett négy, párhuzamosan futó MSC Marc-ot futtatja. A futásszám-figyelő algoritmus arra is figyelt, hogy mikor fejeződik be egy adott, korábban beállított paraméterekkel elindított futtatás, majd annak leállása után megfelelően újraparaméterezve indítsa el a következő futtatást. A futásszám-figyelő algoritmus az MSC Marc által kiszámolt eredményeket akkor tekintette késznek, amikor a program archiválta az eredmény fájlokat. A futásszám-figyelő algoritmus a paraméter-sorozat végén leállította a Marc-ot.

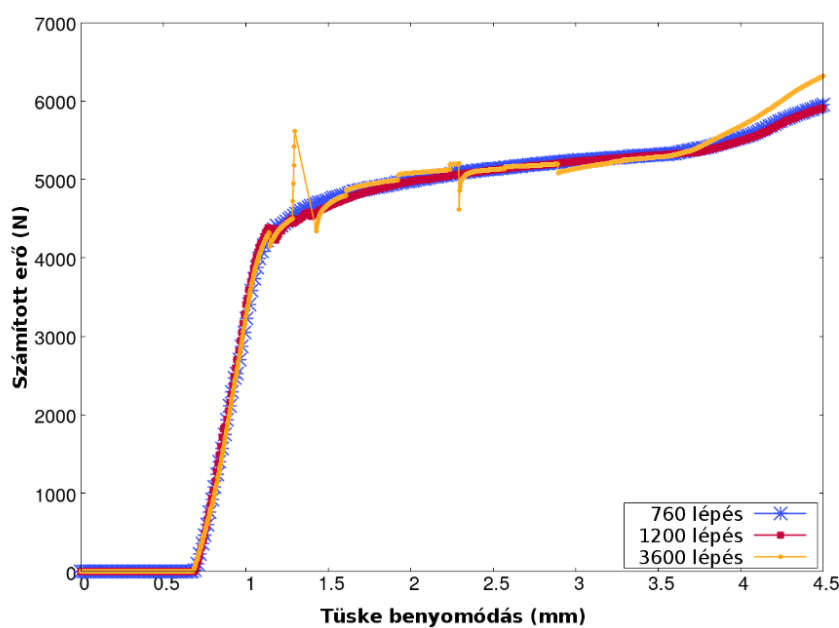
Az automatikus párhuzamos futtatás célja a számítási idő optimalizálása volt: a Mentat egy modellt pár másodperc alatt képes volt felépíteni, és hasonló idő alatt képes volt az MSC Marc az eredményeket exportálni, illetve archiválni. Az MSC Marc egyetlen modellfutási ideje azonban a sűrűdési együtthatótól függően 12-16 óra volt. A kenőanyag alkalmazásával mért adatokhoz illesztett $\mu = 0,25$ sűrűdés esetén az MSC Marc futási ideje 12 óra volt. Periodikus peremfeltételekkel sokkal rövidebb futási idővel is lehetett volna számolni, de a teljes modellben az aszimmetrikus jelenségek, a befűződés alakja jobban láthatóvá vált.

Tesztszámításokat végeztem a párhuzamos futtatások előtt a modell futási idejének csökkentése érdekében, miközben az elvárt pontosságot a rövidebb ideig futó verzióban is meg kívántam tartani. A tesztszámításokban a teljes idő és a maximális nyomótüske elmozdulás azonos értéken tartása mellett változtattam a számítási lépések között eltelt időintervallumok hosszát.

A lépésszámot alapesetben 720-nak állítottam be, amely 360 s valós időnek felelt meg, azaz az időlépés 0,5 s hosszú volt. Ez az alapbeállítás az első próbafuttatások során megfelelőnek tűnt, ezért nem változtattam rajta az optimalizálási folyamat elvégzéséig. Az határozta meg az alap időlépés hosszát, hogy az ennél lényegesen nagyobb időlépések esetén a modellben, leginkább az érintkező felületek érintkezésének matematikai definíciójában numerikus számítási hiba lépett fel. A túl nagy időlépés ugyan csökkentette volna a futtatási időt, azonban előfordult, hogy a nyomótüske elemei behatoltak a mandrel szerszám térfogatába, majd a számítás hibaüzenet kíséretében leállt.

Nagyobb lépésszám esetén, azaz rövidebb számítási időlépés alkalmazásakor a modell megfelelően végigfutott, azonban a futtatáshoz szükséges teljes futtatási idő jelentősen megnövekedett. A 35. ábrán látható számított görbék 720, 1200 és 3600 lépésközzel számított, 360 s időtartamú szimulációk eredményeit mutatják ugyanolyan kezdeti feltételek mellett. Az ábrán jól látható, hogy a 3600 lépés kivételével a számítás minden időlépés esetén ugyanazt az eredményt adja

vissza, numerikus hiba lépett fel, így az időlépés sűrítésével nem érhettem el pontosabb erő-elmozdulás eredményeket, mint a kisebb időfelbontású futtatással. A hálózás sűrűségének és az időfelbontás változtatásának együttes numerikus hatását nem vizsgáltam.



35. ábra. Különböző lépésközzel beállított futtatások eredményei.

A hidrogénezett minták modellszámításai előtt a korábbinál pontosabban terveztem beállítani az effektív súrlódási együtthatót. Azt a kísérleti eredményt tekintetem referenciának, amelyben alapállapotú (nem hidrogénezett) cirkóniumburkolat mintát mértek. Az alapállapotú mintákhoz $0,2 < \mu < 0,3$ közötti effektív súrlódási együtthatót 0,01-onként állítottam be, és kerestem azt az együtthatót, amellyel a legjobban illeszkedik a mért és számított erő-elmozdulás görbe. A lépésszámot a legkisebb értéken hagyva 360 s és 180 s ideig futtattam a modellt, amelyben a súrlódási együtthatót a kísérletben a súrlódó felületeken alkalmazott, különféle teszt-kenőzsírok használata miatt újrakalibráltam. Az újrakalibrálás esetében a számításokat 360 s szimulált ideig futtattuk. Ezalatt 12 mm nyomótüske benyomódásig jutott el a számítás. Ez 2 mm percenkénti keresztfej-elmozdulással azonos nyomótüske elmozdulási sebességet jelentett, vagyis azonos volt a kísérletben alkalmazott sebességgel. A legtöbb esetben alkalmazott kenőzsír esetén végül a legjobb szakítógörbe-illeszkedést megint csak $\mu = 0,25$ esetében kaptam.

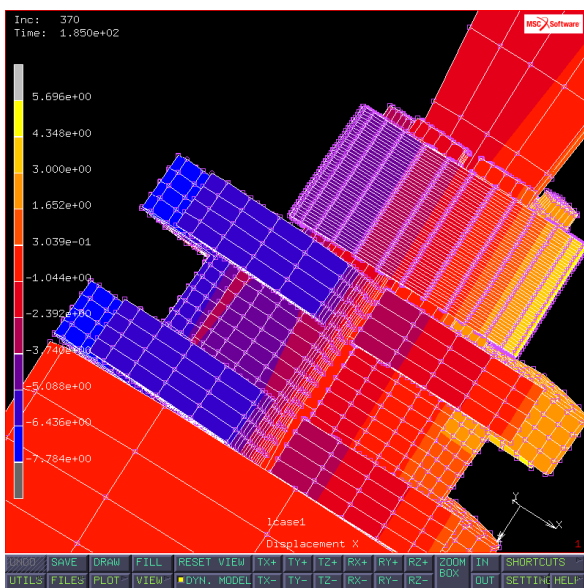
A súrlódás változtatásával változott a modell numerikus megbízhatósága. Amikor ugyanis a számítás elérte a fellépő legnagyobb erő értékét, a modellben alkalmazott, monoton növekvő folyásgörbe elérte a fizikailag értelmezhető alkalmazhatósága végét. A folyást elszenvedett mintadarab a legnagyobb ható erőnél mérhető alakváltozásnál nagyobb alakváltozásokra instabillá vált, a valóságban a gyűrű széle elszíneződéssel mutatta, hogy a képlékenységi változások határát elérte, majd elkezdett befűződni, a befűződő részen pedig más modellel jellemezhető alakváltozások mennek végbe, amely alakváltozást az általam használt modell nem tudta követni. A 7. táblázatban

láthatjuk, mekkora nyomótüske elmozdulásig számolt elfogadhatóan a modell a különböző effektív súrlódási együtthatók esetén.

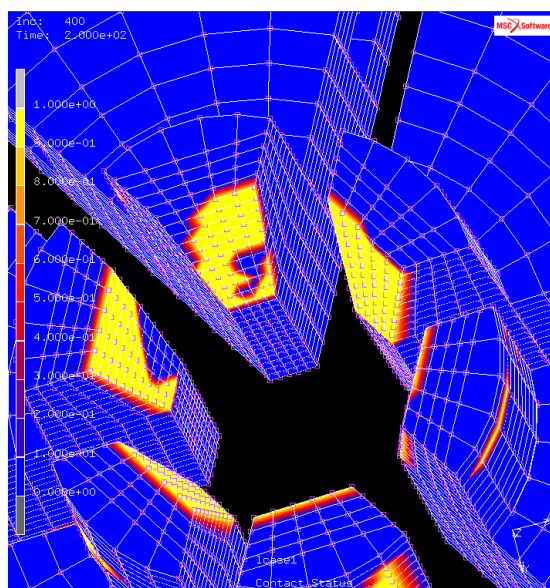
7. táblázat. Az effektív súrlódási együttható és a modell elfogadhatóságának határa.

Effektív súrlódási együttható, μ (N/N)	0,1	0,2	0,3	0,4
Max. idő (s)	150 s	200 s	250 s	360 s
Benyomódás (mm)	12,51	16,67	20,83	30

Az erő-elmozdulás görbék instabilitási szakaszában láthatók voltak véletlen egybeesésnek köszönhető illeszkedések (csökkenő erő értékek). Ennek okát keresve azt találtam, hogy a kibillenő mandrelek egyre kisebb felületen érintkeztek az alátámasztó asztallal. Ez egy nem vizsgált numerikus hiba, mely erősen hálófüggő jelenség lehet. A modell egy lehetséges feljlesztése, ha az asztal merev lenne, nem pedig hálózott, ezáltal ez a numerikus hiba nagyban javítható lehetne. A mandrel szerszámok és a nyomótüske felületei sem érintkeztek megfelelően ebben a számolási szakaszban, ezért a Marc a súrlódást sem számolhatta jól. A 37. ábra mutatja a hibás érintkezéseket a mandrel szerszámok belső felületén.



36. ábra. Az alátámasztó asztalon elbillent mandrel szerszámok képe.



37. ábra. A számolás során fellépő numerikus hiba miatt az érintkező felületek nem érintkeznek egymással.

A Marc a súrlódás növekedésével hosszabb ideig futott, hiszen sokkal többször kellett iterálnia a felületen keletkező tapadási és csúszási súrlódási erők nagyságát ahhoz, hogy konvergens eredménnyel térhessen vissza a függvény az algoritmusban. Tehát a nagy nyomótüske elmozdulás esetén a kitéréstől, vagyis a minta deformációjának mértékétől függetlenül állandó értéket kaptam,

ami azt jelezte, hogy ez a tulajdonság a modell sajátja. A modell alkalmazhatóságának jellemzőjeként azt állapítottam meg, hogy a mért és a számított görbe csak az első 200 másodpercig egyezett.

3.4 A hidrogén hatásának modellezése fűtőelem burkolatcső mintákban

A különböző mértékben hidrogénezett minták mandrel méréseinek végeselemes szimulációját is elvégeztem. A számítás eredményeként azt vártam, hogy található olyan folyásgörbe-sorozat, ami jól leírja a tetszőleges mértékben hidrogénezett cirkónium gyűrűk mandrel berendezésben végbemenő alakváltozási folyamatait. Az újrakalibrálás után, a kenéssel végzett mandrel mérésekhez tartozó, alapállapotú minták mérési eredményeihez nagy pontossággal illeszkedő súrlódási együtthatót $\mu = 0,25$ -nek választottam és a továbbiakban minden hidrogénezett mintához tartozó szimulációt ezzel az értékkel számítottam ki.

A körülbelül 0 ppm, 750 ppm, 1350 ppm, 2000 ppm, és 3000 ppm hidrogénnel feltöltött minták mandrel mérései során kapott erő-elmozdulás görbékhez illesztettem a számolt görbéket. A pontos értékeket az 8. táblázatban adtam meg. A kiválasztott minták mandrel méréseinek adataiból kigyűjtöttem a 4 mm nyomótüske-elmozduláshoz tartozó, mért erő adatokat. A 39. ábrán a különböző mértékben hidrogénezett minták mandrel mérési eredményei láthatók. A mért erők jellegéből látható, hogy a nagyobb hidrogéntartalmú minta ridegebb (kisebb átmérőváltozás esetén eltörik) és keményebb (nagyobb erő kell a töréshez).

8. táblázat. A mért minták illesztési adatai.

Minta	Hidrogéntartalom (ppm)	4 mm tüskeelmozduláshoz tartozó erő (N)
PHE-484	0	4548
PHE-59	612	5481
PHE-153	1045	5854
PHE-114	1555	6129
PHG-630	2039	6452
PHG-638	2526	6747
PHE-183	3189	6667

A folyásgörbét valódi feszültség (figyelembe véve a keresztmetszet-kontrakciót) és valódi megnyúlás párok (infinitezimális megnyúlásszakaszok integrálja) sorozataként adhatjuk meg az MSC Marc számára. Ennek az anyagtulajdonság-jellemzőmódnak az egyszerűségét használtam ki a következő számolásokban. Az alapállapotú minták relatív, valódi megnyúlását $[0;1]$ intervallumon definiáltam, a feszültség pedig az elemekre ható erők következtében kialakuló feszültségek mért egyenértékét mutatta. A reláció bal oldali rendezett párjai reprezentálták az eredeti folyásgörbe adatait, a jobb oldal a transzformált folyásgörbe. Ezt a folyásgörbét az alábbi transzformációval változtattam meg:

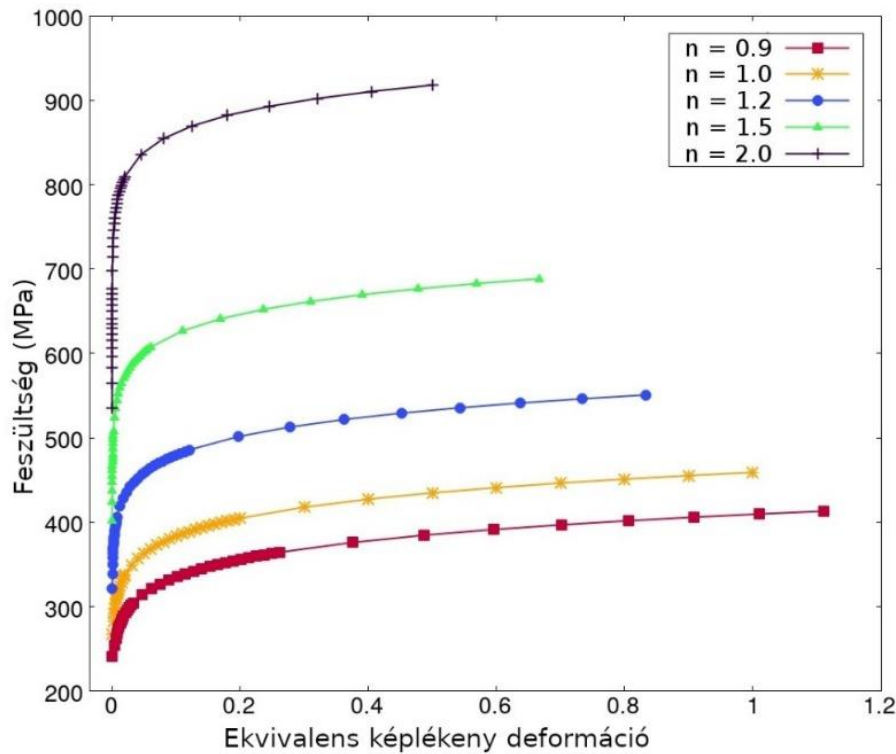
$$(\sigma, \varepsilon) \rightarrow \left(n\sigma, \frac{\varepsilon^n}{n}\right),$$

ahol σ az ε relatív megnyúláshoz tartozó valódi feszültség a folyásgörbealapán meghatározott értéke.

Ahhoz, hogy a hidrogénnel töltött minták mérése során kapott szakítógörbéket ki tudjam számolni minden egyes egyedi hidrogéntartalmú minta esetén, a modell időfelbontásának beállítását követően és a megfelelő effektív sűrűdési együtthatót beállítva már csak a számítások során használatos folyásgörbe alakját kellett változtatnom. Ehhez egy általam definiált „ n -transzformációt” alkalmaztam az alapállapotú folyásgörbe adataira. A különböző mértékben hidrogénezett minták [75, 76] mért adatainak illeszkedése alapján rendre megállapítottam azt az „ n paramétert”, amellyel az alap folyásgörbét adott módon transzformálva a szimuláció visszaadta a különböző hidrogéntartalmú cirkónium burkolatanyagokra jellemző mért paramétereket.

Ez a transzformáció olyan folyásgörbét eredményezett, amelynek a kezdeti szakaszában a meredeksége az n növelésével egyre nagyobb volt, mivel a minták rendre ridegebbek. Ez a matematikai formula a számítások szerint egy alkalmazható modell. A képlet egyszerű, és egyetlen valós szám-paraméterrel módosítható a mintában oldott hidrogén mennyisége függvényében. Ennek a modellnek a fizikai tartalmát nem vizsgáltam, kinetikai modellnek tekintetem. A transzformációval változtatott folyásgörbék a numerikus számításokhoz megfelelőek, jól differenciálhatóak maradtak.

A 38. ábra mutatja a kapott folyásgörbéket különböző n értékekre. Bár a modell folyásgörbék látszólag túlzott mértékű keményedést mutatnak az $0 < \varepsilon < 0,05$ tartományon, a kísérletben a nyomótüske elmozdulásból származó terhelés ezt a szakaszt ezt igen gyorsan meghaladja, így az a modell, amelyben a nyomótüskét tartó ferde tengelyű csövet nem hanyagoltam el, képes volt követni a mért görbe további szakaszát. A modellszámítások során azonban, különös tekintettel arra, hogy a nyomótüske tartócső hatása független a minták hidrogéntartalmától, elhagytam ezt az alkatrészt. Ebben a közelítésben a rugalmas szakaszból a képlékeny szakaszba történő átmenet során kis mértékű eltérés tapasztalható a mérés és a számítás során kapott görbék között. A 4 mm tükébenyomódásnál ez az eltérés természetesen már nem jelentkezett.

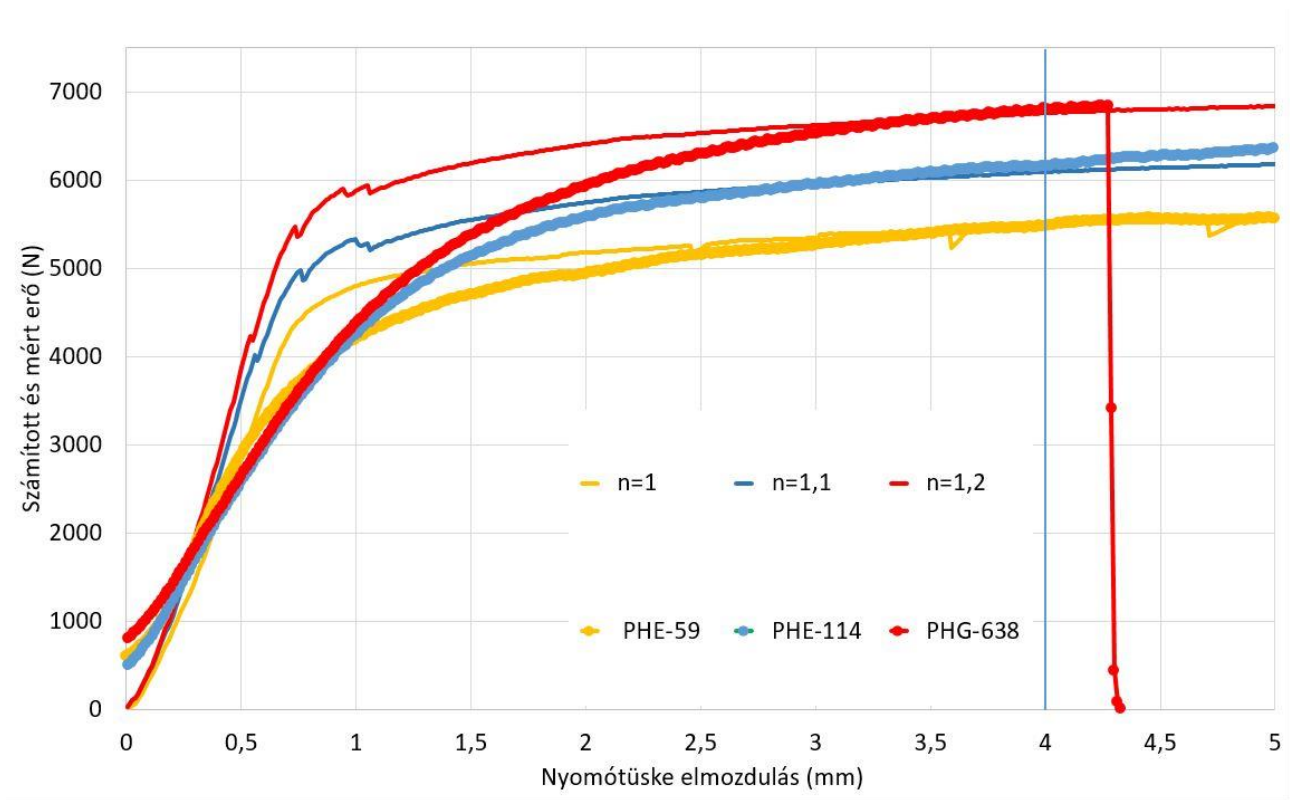


38. ábra. Az alapállapotú mintára jellemző folyásgörbe (sárga „csillagos vonal”), és a transzformált folyásgörbék különböző n értékek esetében.

A modellszámítás során azt vártam, hogy a nyomótüske elmozdulással arányban, ahogy az átmérő növekszik, a gyűrű minta ellenáll a mandrel szegmensek nyomásának. Ez a gyűrűre jellemző tulajdonságokat mutató görbét ad vissza, ahogy a mérésben is tapasztaltuk. A modell futtatásának eredménye a nyomóerő nagysága időben, vagyis az azzal ekvivalensen a nyomótüske-elmozdulás függvényében.

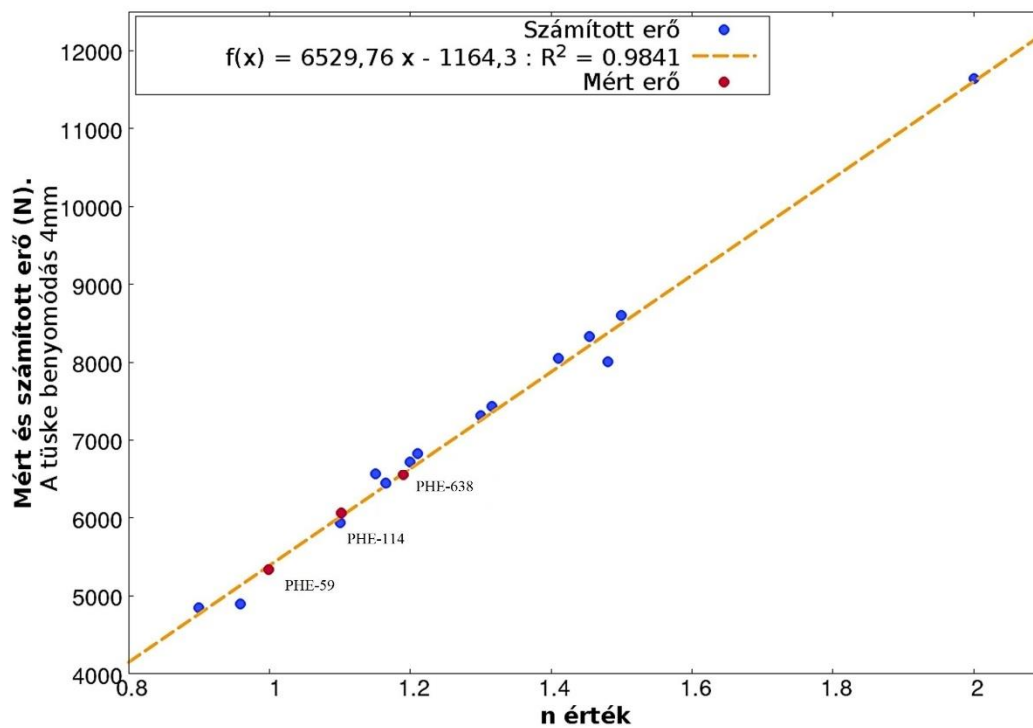
Írtam egy automatizált vezérlő algoritmust az MSC Marc futtatásához. Ez a vezérlőprogram párhuzamosan futtatta az MSC Marc-ot, azonban párhuzamos futtatások során azonos effektív súrlódási együttható mellett különböző n -ekkel transzformált folyásgörbét alkalmazott. A cél az volt, hogy a mért görbékre illeszthető, számított görbék alapján megtaláljam az adott oldott hidrogénmennyiséghez tartozó folyásgörbét.

A folyásgörbe transzformáció n értékét először $n = 0,9$, majd rendre $n = (1,2; 1,5; 2,0)$ értékre állítottam be. Ezeknél a beállításoknál a teljes, 360 s idejű futtatást választottam. Az $n = (1,1; 1,15; 1,19; 1,21; 1,25; 1,3)$ transzformációs konstansok esetén a futtatás 180 s ideig tartott. A 39. ábra bemutatott pontozott görbék mutatják a megfelelő nyomótüske elmozduláshoz tartozó mért erőt, a vastag, folytonos vonal mutatja a számított erő értékeket. A numerikus szimulációval azt az n értéket kerestem, amelyhez egy adott hidrogéntartalmú minta mandrel görbéje közel esik, majd ekörül az n érték körül részletesebb felbontással kiszámítottam további görbét, annak érdekében, hogy megtalálhassam az adott méréshez legjobban illeszkedő folyásgörbét.



39. ábra. Jellemző illesztések a számított és mért erő-elmozdulás görbékre.

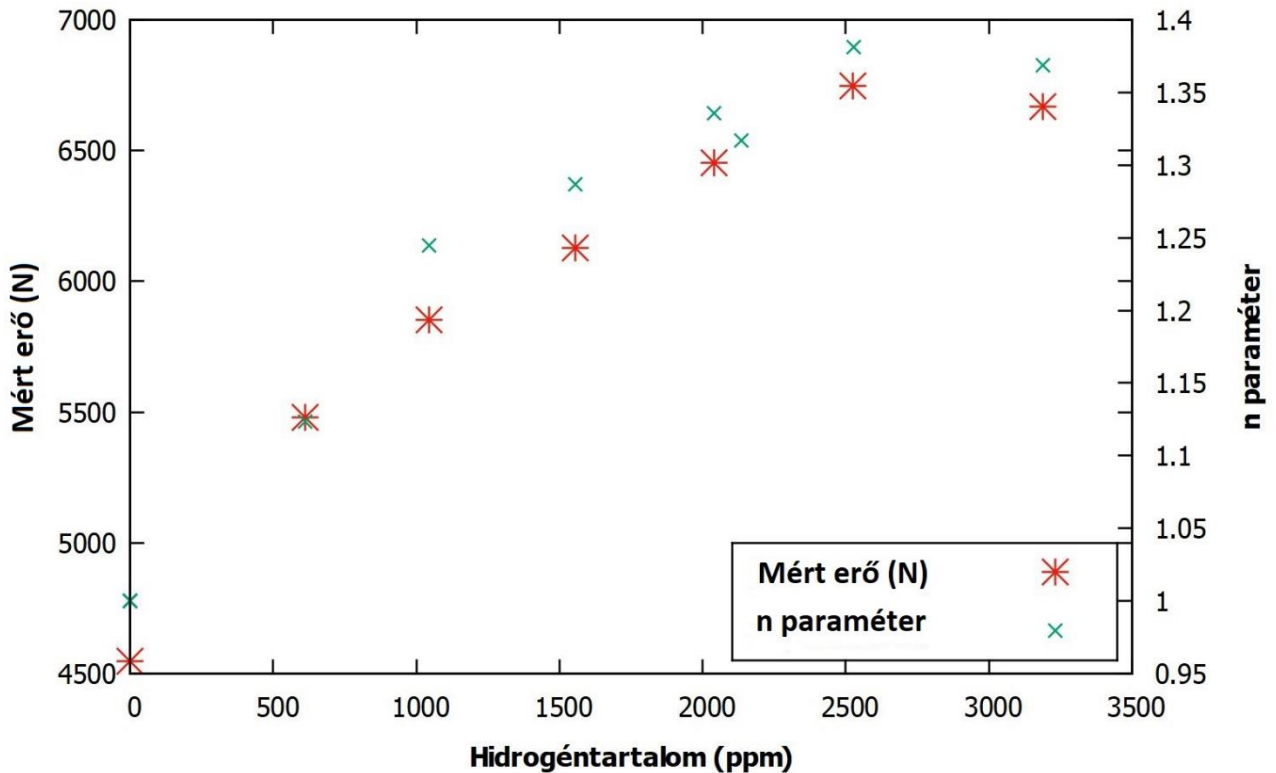
A 40. ábra szintén a 4 mm nyomótüske elmozduláshoz tartozó mért és számított erőket mutatja. Felrajzoltam az n -ekre kiszámított erőket (4 mm túskebenyomódásnál), majd egyenest illesztettem a pontokra.



40. ábra. A 4 mm nyomótüske elmozduláshoz mért és számított erők az n függvényében.

A 41. ábra pontjait alapul véve elkészítettem a minták folyásgörbéinek számolása során alkalmazott n értéket, és felrajzoltam annak hidrogéntartalomtól való függését, amelyet a 41. ábrával szemléltetek.

A mért erők változása az oldott hidrogén hatására ridegedő minták esetében, és az n -paraméter változása megfelelően hasonló tendenciát mutat. 2500 ppm hidrogéntartalom felett a mért erő nem növekedik tovább, az n -ek is ezt követik. Az ábra alkalmas lehet arra, hogy egy tetszőleges hidrogénmennyiséggel töltött minta mandrel mérésének erőkarakterisztikáját előre megbecsülhessük.



41. ábra. A hidrogéntartalom és az n paraméter összefüggése.

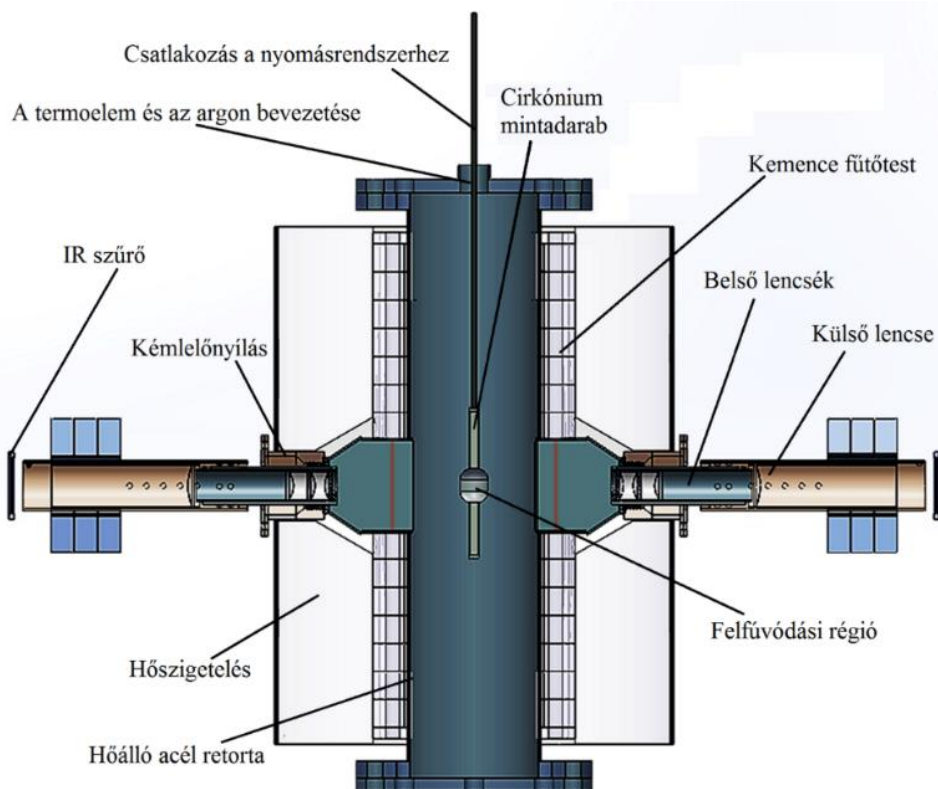
4. Burkolatfelhasadásos kísérletek

Az atomerőművi fűtőelemek burkolata egy hűtőközeg-vesztéses üzemzavar (LOCA) során a melegedés következményeként gyorsan veszíthet teherbíró képességéből. Ez a kedvezőtlen tulajdonság mind a használatos ötvözetek anyagfizikai tulajdonságainak (például szilárdság) hőmérsékletfüggő jellege miatt, mind pedig a magas hőmérsékleten felgyorsuló kémiai folyamatok (oxidáció, hidridizáció) okozta anyagtulajdonság-változásokból adódik. A hűtőközeg-vesztéses üzemzavar során a hűtőközeg általi, a fűtőelem külső felületét érő nyomás lecsökken és ha a fűtőelem belső nyomása elegendően magas, akkor a burkolat felfúvódhat és elveszítheti integritását. A felfúvódás közben a burkolatcső falában az adott hőmérsékletre tartozó folyáshatárt elérheti az egyenértékű feszültség, ezért a pálca igen rövid idő alatt is maradandó alakváltozást szenvedhet és sérülhet.

A doktori tanulmányaim alatt, kezdetben azt a célt tűztem ki, hogy a cirkónium fűtőelem burkolat csövek felfúvódása során létrejövő alakváltozást nyomon követhessem, hagyományos kamerával. A LOCA során bekövetkező felfúvódási és felhasadási jelenségek megértéséhez, a fizikai paraméterek méréséhez jól bevált módszert ismerünk az Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok laboratóriumában. Ennek a hagyománynak a folytatásaként a felfúvódási és felhasadási kísérleteket továbbfejlesztettük, és a fent megfogalmazott új feladathoz új kísérleti berendezést építettünk meg [66]. A korábbi kísérleti alapelveken nem változtattunk, a korábbi mérésekkel és numerikus számításokkal való összehasonlíthatóság céljából. Egy kemencében, magas hőmérsékleten tartott, nagy nyomású argonnal belülről terhelés alatt álló fűtőelem burkolat cső felfúvódásának optikai megfigyeléséhez olyan berendezést kellett kifejleszteni, amely eléri, vagy meghaladja a korábban használt mérőberendezés pontosságát, és amely a 700-1100 °C tartományban is működik, és amelyhez különböző optikai eszközöket csatolhatunk. A kísérleti berendezésben alkalmazott csőkemence tervezésében az én feladatomban az volt, hogy tanácsokkal segítsem a tervezést és a kemence megépítését vállaló kemencegyártó cég mérnökeit. A megfelelően kialakított kémlelőnyílással ellátott kemencéhez én terveztem a magas hőmérsékleten működő optikai fénykicsatolótagot, amit távcsőnek neveztem. Megterveztem egy nagy felbontású mérési adatgyűjtő programot, amely a mért adatokat nemcsak regisztrálta, de fel is használta azokat a kísérleti berendezés nyomásszabályozó rendszerének vezérlésére. Biztosítanom kellett, hogy a létrehozott vezérlés stabil marad a mérés során. Javaslatot tettem a laboratóriumban dolgozó programozó kollégáknak arra, hogy a videófelvétel képkockáin látható minta képén milyen eljárással lehet a mintaátmérőt meghatározni egy egész időszoron keresztül. Ebben a munkában kis részt vállaltam, és C++-ban készítettem egy saját programot. Megterveztem és elkészítettem a nyomásszabályozó berendezés elektronikai paneleit, majd kalibráltam a mérőberendezést. A mérések során lehetőségünk nyílt nagy felbontású gyorskamera és gyors felvételre alkalmas hőkamera alkalmazására is.

4.1 Optikai eszközök tervezése

A magas hőmérsékletű fűtőelem burkolatcsövek felfűvódásának és felhasadásának méréshez egy speciális mérőberendezést kellett építenünk, mely egy magas hőmérsékletű csökemencéből, egy optikai rendszerből és egy, a mérési adatokat regisztrálni is képes nyomásszabályozó rendszerből áll. A korábbi felfűvódásos és szekunder hidridizációs vizsgálatok [77], [78] során a cirkónium burkolatokból maximum 300 mm hosszú darabokat használtunk [79], ezért ilyen méretű minták köré terveztünk egy 1000 °C-ig fűthető, háromzónás, kantál fűtőszálas egyedi csökemencét. A kemence retortája egy 104 mm belső átmérőjű és 520 mm hosszúságú acélcsőből áll (42. ábra). A kemence szabályozója ± 3 °C pontossággal képes tartani a kemence középső szakaszának hőmérsékletét, a kijelölt hőmérsékleten. Az egyes zónák teljesítményét két egymásba épített szabályzó kör hangolja össze, mivel a kemencetest (a kerámia fűtőtest és a kaolingyapot szigetelés) hőtehetlensége nagy, és ezáltal a szabályozási holtidő jelentős. A vizsgált cirkónium burkolat minta a kemence közepén helyezkedett el, a kemenceteret a mérés közben nagy tisztaságú argonnal öblítettük a minta oxidációjának minimalizálása érdekében. Ez az argon biztosította a hőátadást a retorta felszínétől a mintára.



42. ábra. A méréshez használt csökemence keresztmetszeti rajza a távcsövekkel és a mintadarabbal.

A kemence kialakítását a Kalória Hőtechnikai Kft. mérnökeire bíztuk. A kemence-elrendezéssel kapcsolatban azt a kérést fogalmaztuk meg a gyártónak, hogy a kemence függőleges elrendezésű legyen, és a kemencében 300 mm hosszon egyenletes legyen a hőprofil. A hőprofil egyenletességét a kemence alsó és felső szakaszának a külön fűtésével oldották meg. A

kemencevezérlő külön vezérli a két külső zóna fűtőbetéteket, és külön a középső zónát. A középső, mesterzóna szabályozó egysége egy H-Ga KD481P típusú PID szabályzó, a párhuzamosan vezérelt két, külső fűtőbetétet egy H-Ga KD481DD elektronika szabályozza. A mesterszabályozó egy LTP-F 3X16A áramvezérlő kapcsolótáblát kapcsol. A szabályozók belső memóriájába be lehet programozni egy időbeli hőprofil, de az állandó hőmérsékleten végzett izoterm mérésekhez elegendő az, hogy a kemence a lehető leggyorsabban, ám a legkisebb mértékű hőmérséklet-túllövés nélkül érje el a kívánt hőmérsékletet. A méréseink során a 800 °C célhőmérséklet 3 °C pontossággal állandó volt és 40 perc alatt, a 950 °C célhőmérséklet pedig 5 °C pontossággal 3 óra alatt volt elérhető. A hosszú felfűtési idő kényelmetlensége ellenére a túlméretezett hőszigetelő fal nagy hőtehetetlenségéből adódóan a kemence nagy előnye az, hogy a fenti kívánalmaknak megfelelt.

A kemence két, a hőszigetelő falába beépített, K típusú termoelem jelei alapján állítja be és tartja a célhőmérsékletet. Emellett a kemence terébe bevezettünk egy független termoelemet, amelynek a vezetékpárjait egy Measurement Computing által gyártott USB-2408 típusú adatgyűjtő A/D bemeneti csatornájára kapcsoltuk. A mérendő minta felszínére dróttal felerősítettünk további három K típusú termoelemet. A dróttal felrögzített termoelemek a rögzítés helyén 10 mm hossz szoros illeszkedéssel, fémes kontaktusban álltak a minta felszínével, és ezekkel mértük a minta felszíni hőmérsékletét. A kemence beállításakor empirikus hőmérsékleti korrekciót alkalmaztunk. Jellemzően a kemence mesterszabályozóját 10 °C-kal, a szolgaszabályozót pedig 50 °C-kal kellett melegebbre állítani ahhoz, hogy a minta felszíne a hőmérsékleti egyensúly beállása után megegyezzen a célhőmérséklettel.

Habár az 1000 °C-on üzemelő kemence belsejében lezajló jelenségeket leggyakrabban kvarcüveg kémlelőnyíláson át vagy egy kvarcüveg falú kemence oldalán keresztül szokták megfigyelni, ezek a kémlelő nyílások, illetve átlátszó kemencefalak jellemzően nem megfelelő optikai minőségűek, igen vastag falú vagy több rétegű kvarcból, esetleg zafírból készülnek, a hőszigetelés javítására pedig vékony aranyréteggel vannak bevonva. A kemence izoterm jellegét a kevésbé szigetelt kémlelőnyílás elrontja, erős hőáramlás indulhat meg kifelé, ami miatt a kemence hőprofiljának szimmetriája eltorzul. Ezért a fűtőelem felfűvódás és felhasadás megfigyelését egyedileg tervezett optika segítségével végeztük.

Olyan optikai teleszkópot terveztem, ami a kemence 80 mm vastag hőszigetelésének egyenletességét csak kis mértékben rontotta el, mindemellett az átmérőjéhez képest sokszoros hosszúságú minták egészének megfigyelését is lehetővé tette. Az optikai leképezési hibáknak minimálisnak kellett maradnia. A távcsőnek olyan képalkotó eszköznek kellett lennie, amelyhez bármely típusú optikai eszköz csatlakoztatható (spektrométer, fotométer, videokamera, fényképezőgép) és az képes legyen a mérésre. Meg kellett oldanom azt is, hogy a távcső az 1000 °C működési hőmérséklet ellenére fókuszálható maradjon, minimális képhibák mellett pedig a lehető legnagyobb méretű tárgyat képezze le bármely, aktuálisan használt kamera detektorára. A távcső lencséjének és

anyagának tartósan ki kellett bírnia az 1000 °C-os hőmérsékletet, továbbá el kellett viselnie a 100 °C/cm hőmérsékleti gradienst. Az is követelmény volt, hogy a lencsék magas hőmérsékleten hasonló fókusztávolsággal rendelkezzenek, mint szobahőmérsékleten, illetve az okulárkihuzat méretei tegyék lehetővé a nagyobb mértékű fókuszlást.

A tervezett teleszkóp objektív lencséje egy háromtagú, defókuszált kondenzor lett, amit egy külső okulár korrigál élesre. Az objektív valójában egy diafragma-limitálás nélkül épített Huygens típusú, két szembefordított sík-domború lencséből álló összetett lencse volt, amelynek a képsík-görbületét egy harmadik taglencse korrigálta ki, a látómező sugarának négyötödéig. Az okulár lencse egy egytagú, sík-domború, az előzőekkel azonos anyagból készült sík-domború lencse lett.

A teleszkóp lencséit a magas üzemi hőmérséklettel szembeni ellenállóság miatt Heraeus[©] Suprasil-1 anyagú kvarcból gyártattuk le. A tapasztalat szerint a lézer CNC vágógépekben használt Suprasil-1 lencsék a várható hőmérsékleti gradiens sokszorosát is kibírják képtorzítás és a belső hőfeszültségek miatt kialakuló repedések nélkül. Ennek a kvarcüveg anyagnak a tulajdonságait katalógusból [80] kerestem ki. Hőtágulási együtthatója $0,51-0,48 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ között változik, 100-1000 °C között. A szobahőmérsékleten megadott, látható tartománybeli törésmutatója $n = 1,467$ volt, mely nem változott meg jelentősen magas hőmérsékleten sem. A Suprasil-1 kvarcüveg anyagnak emellett rendkívül kicsi a hőtágulása.

Az optikai tervezéskor több dolgot kellett figyelembe vennem. Elsősorban, a kemence fűtőszálai 40 mm távolságokban helyezkedtek el, ezért a maximális objektív lencseátmérő: belemérve a kettős falú távcsőtubus vastagságát és a kemence maradékszigetelését is, $27,0 \pm_{0,02}^{+0,00}$ mm lehetett, amiből a tartócső végére hegesztett lencseütköző kítakart körülbelül 1 mm-t. A kialakult belépő pupilla átmérője így 24 mm-nek adódott. A lencsék szélét 1,58 mm sugarú lekerekítéssel úgy alakítottam ki, hogy a lencseütközőre könnyen és biztonságosan fel tudjon ütközni a lencse, akár a magas hőmérsékleten kitágult acél távcsőtubus esetében is. Másodsorban, a mintából minimum 60 mm hosszúságú szakaszt kívántunk megfigyelni az éles képen.

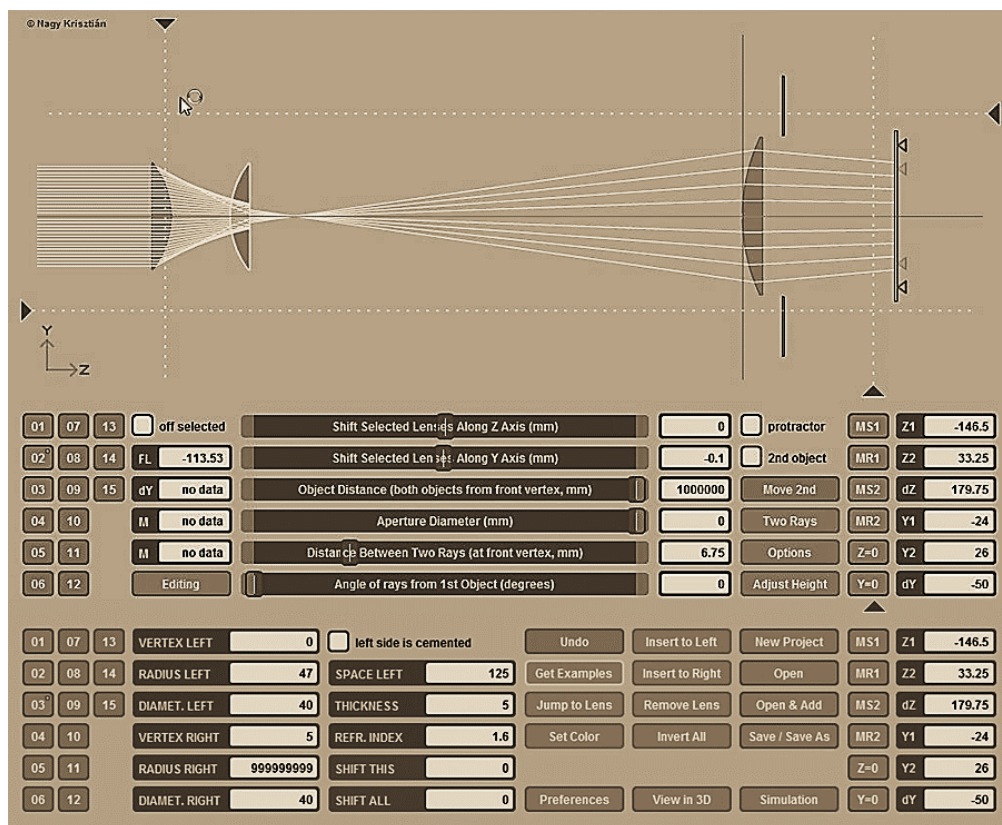
Először optikai próbapadon, műanyag lencsékkel kísérleteztem, ez alapján egy becslést adtam az egyedi lencsék fókusztávolságára. Miután az egyedi lencsék fókusztávolságát $42 \pm 0,02$ mm-re választottam, kiszámoltam, hogy amennyiben nem műanyag lencsét használok, hanem Suprasil-1 üvegből csiszolt lencsét, akkor milyen elrendezésben kapom meg azt a tárgy-távolság-látómező arányt, amelynek kétharmada képhiba-mentesen leképezhető egy végtelenre fókuszlalt kameralencse detektorára. Számításaim szerint az objektívben lehelyezett lencse-hármas tagjai közötti távolság 20 mm kell, hogy legyen. A lencseegyenlet alapján az egyedi lencsék $22,0 \pm 0,2$ mm görbületi sugarú, 6,6 mm vastagságú vastaglencsék. A sík-domború lencsét úgy kellett a megadott geometriájúra csiszolni, hogy a kék fény hullámhosszának hatodánál nagyobb eltérések ne legyenek a felszínén. Ennek megvalósításához szurok-polírozóra volt szükség. Ezt a munkát az Optilab Kft. elvégezte számunkra.

A 6,6 mm vastag lencsék esetén nem volt kellően ismert az, hogy a kvarc rossz hővezetése miatt kialakuló, nagyságrendileg 60 °C-os hőmérséklet-különbség mekkora belső hőfeszültséget jelentett a lencsék első és hátsó felszíne között. A használat során a lencse megfelelő leképezéssel alkalmazható volt. Ebben fontos szerepe volt annak, hogy a lencsék üvege, amelyből csiszolták őket, nagyon jó minőségű, igen lassan lehűtött, egykristály öntvények voltak.

Az okulár lencsét úgy terveztem, hogy a 80 mm vastag kemenceszigetelésen kívül nyúló távcsőbefogó csonttól kellő távolságban legyen ahhoz, hogy ± 10 dioptriát korrigálni lehessen vele. Az okulár az objektív lencse által alkotott, nagyított képet párhuzamos nyalábként továbbítja. Ezzel az elrendezéssel elértem, hogy ezt a távcsövet bármely olyan optikai eszközzel együtt lehessen használni, amely képes a végtelenben elhelyezkedő tárgyról éles képet készíteni. Az okulár tervezett anyaga megegyezett a többi lencse anyagával, átmérője $40 \pm 0,2$ mm volt. Ezt is sík-domború lencseként terveztem a fényútba, fókusztávolságát pedig a fent említett geometriai és nagyítás-feltételeknek megfelelően $100 \pm 0,2$ mm-re választottam. Ezt a kívánt fókuszt, a lencseegyenlet alapján, $46,7 \pm 0,2$ mm görbületi sugárral lehetett elérni, a lencse legnagyobb vastagsága pedig 5,5 mm volt. Ez a lencse már a kemence szigetelésén kívül helyezkedett el, így jelentős hősokk nem érte a mérés során.

Az optikai tervezéskor kéttagú-objektív közelítést alkalmaztam, mivel az objektívben a harmadik, képsík-korrigáló lencse az első lencsetag fókuszához elegendően közel helyezkedik el, tehát módosító hatása nem volt jelentős az eredő fókusztávolságra. Lineáris, paraxiális közelítésű mátrix optikai egyenlettel kiszámoltam, hogy a kettős tagú objektív mellé mekkora távolságban kell elhelyezni a harmadik, okulár lencsét, ahhoz, hogy a kimeneten párhuzamos fénynyaláb legyen látható. A számítás ellenőrzésére SynthRays nevű optikai szimulátor programot használtam [81]. A program futásának eredménye a 43. ábrán látható. Az ábrán, felül a számított fényút, alul a táblázatban az okulár lencse geometriai méretei és a referencia síktól való távolsága látható mm-ben. A számítás során a referencia sík az okulár lencse baloldali érintője volt (VERTEX LEFT 0). A középső lencse kilépő élén látható „fényugrás” a sík-domború lencsék szférikus aberrációjaként értelmezhető (ezt korrigálja a harmadik lencse). Az ábrán a középső táblázatban a kiszámított eredmények láthatók. A program egy diafragma alkalmazását javasolta, amellyel ki kellett volna takarni a kilépő fénynyalábból a teljesen torzított formában leképezett, néhány milliméter külső részt. Ezt jelöli az ernyő elé rajzolt, sötét színnel jelölt rész. Ez azt jelentette, hogy ezen számítás szerint az elfogadható mértéket már meghaladó, egyszerű lencsével már nem korrigálható mértékű szférikus aberráció okozta hiba volt jelen a képsík külső, néhány százaléknyi tartományában. Tekintettel arra, hogy paraxiális közelítéssel számoltunk, a leképezési hiba korrigálására a felajánlott diafragmánál lényegesen nagyobbat kellett volna alkalmazni, de ennél a mérésnél diafragma helyett az objektív fókuszsíkjába helyezett korrekciós lencsét alkalmaztam. A szimuláció során a számítógép monokromatikus fényvel számolt. A használat során, Wien közelítésben azt mondhattuk, hogy a 800-

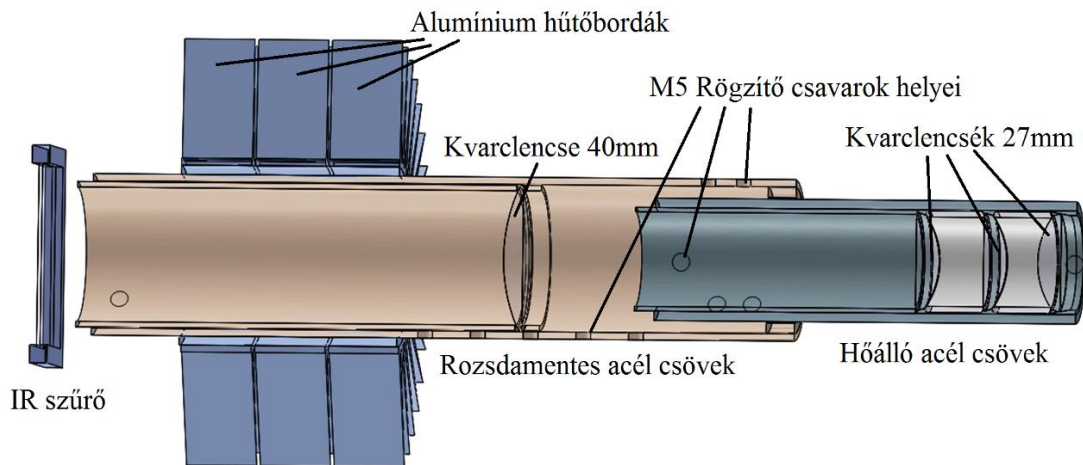
1100 °C-os felszíni hőmérsékletű minta hőmérsékleti sugárzása jó közelítéssel sárgászöld monokromatikus fényforrásnak volt tekinthető. Az optikai tesztek során bebizonyosodott, hogy a lencsék elviselik a magas hőmérsékletet, a lencserendszer fókuszálható, és a numerikus számításnak megfelelően, a távcsőbe bemenő párhuzamos fénynyaláb valóban párhuzamosan távozik a kilépő pupillán. Így azt mondhattam a fejlesztés és a tesztelés végén, hogy bármely kamera végtelenre állított fókuszú objektívlencsével le lehet képezni a tárgyat az adott kamera szenzorára.



43. ábra. A SynthRays program kimenete a tervezett optika vázlatával.

Elkészült két darab távcső (44. ábra), amelyek tehát egyenként három kisebb (27 mm) és egy nagyobb (40 mm) átmérőjű kvarclencséből, valamint két kis távtartó kvarccsőből álltak, és amelyek képesek voltak az 1000 °C-os hőmérsékletnek ellenállni. Az objektív lencsék kiszámolt, 20 mm-es távolságát 25 mm átmérőjű, 1 mm falvastagságú kvarcüveg csőből levágott távtartókkal biztosítottuk. A távcsőtubus kemencén kívüli anyaga 1.4301 rozsdamentes acél, a kemence belsejében pedig 1.4841 hőálló acél lett. Ez utóbbi az a fajta acél, amelyből a kemencetest is készült.

A távcsőben látható kép fordított állású és 40°-os látószögű lett, így a kemence középvonalában elhelyezett tárgy 60 mm-es szakaszát lehet vele látni. Bár a minta felülete és a kemence fala azonos hőmérsékleten, vagyis azonos színnel, azonos fényességgel izzott, a minta megfigyelt szakaszának sötét háttérét maguk az optikát tartó, hűvösebb kemencecsonkok üregei biztosították, mivel azok a kemencéből kinyúlva a környezet felé hőt vezettek el (alacsonyabb volt a hőmérsékletük), azaz élesen elváló, egyenletes, sötét háttérrel biztosították a videófelvételek rögzítéséhez.



44. ábra. A távcső modelljének keresztmetszeti rajza.

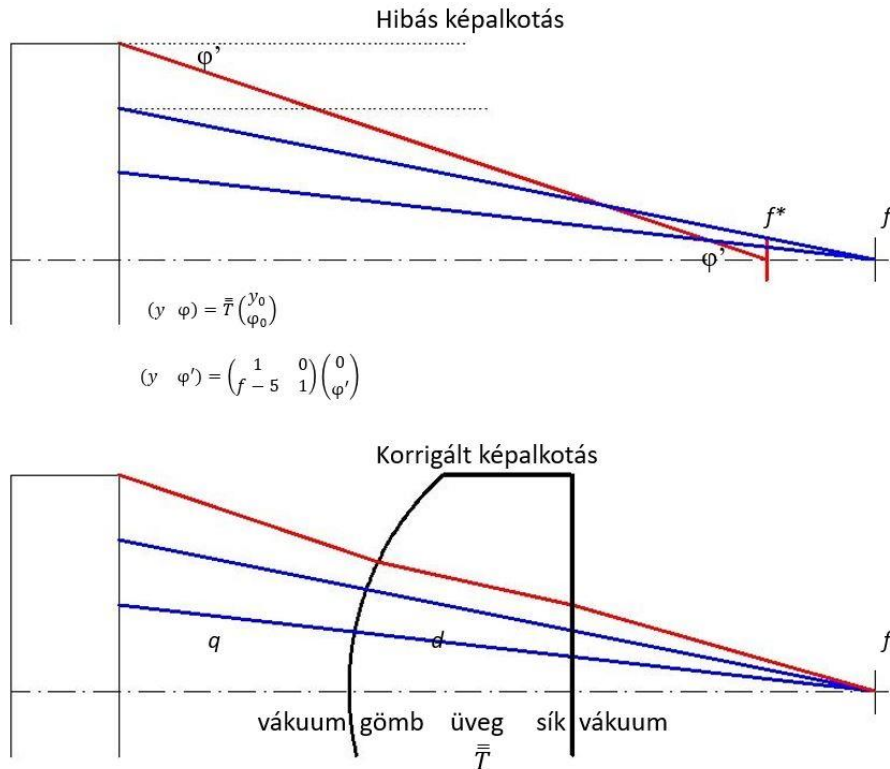
A megépített távcső optikai padon történő próbájánál azt tapasztaltam, hogy a látómező külső 20%-a homályosnak mutatkozik. Ekkor a próbapadon megmértem, mely fókusz távolságnál éles a külső perem képe, és mely pontban éles a kép közepe. Szférikus aberráció lépett fel a sík-domború lencséken. Ennek korrigálására mátrix optikai számítást végeztem a következő feltételekkel:

- a két egymással szembe fordított lencse egy „ismeretlen fekete doboz”, amelyből fény lép ki: a fénysugarak az f fókuszpontba haladnak a lencse sugarának kétharmadáig,
- azok a fénysugarak, amelyek a lencse pereméről jönnek, $f^* = f - 5$ mm-rel közelebbre fókuszálódnak le a mérés szerint,
- a korrigáló lencse vastaglencse, a gömbfelület görbületi sugara $R = 22$ mm, a lencse átmérője $D = 27$ mm, a lencse vastagsága $d = 6$ mm az optikai tengelyben, az üveg törésmutatója $n = 1,467$,
- a mátrix optika a megszokott természeténél fogva, paraxiális közelítésben ad helyes eredményt, a fény jobbról balra halad,
- amennyiben a korrigáló lencsét q távolságban elhelyezzük a kiindulási optika optikai tengelyében, a külső felülettől mérve, akkor a lencsén áthaladó fény a lencse kétharmadáig körülbelül párhuzamosan, fókusznyújtás nélkül halad, a külső peremről azonban a lencsén áthaladó fénysugár is az $f = 42$ mm fókuszpontba képeződik le.

Ezt a közelítést paraxiális közelítésben valóban megtehetem, mert a korrigáló lencse két oldalfelülete párhuzamosnak közelíthető.

A mátrix optikai elrendezés a 45. ábra látható. A fény terjedése vákuumban (levegőben) és a lencsében történik, így egyetlen lencse és az üres térben való átviteli mátrix jobbról szorzata elegendő ahhoz, hogy a fénysugár kitolódjon f^* -ből f -be. A lencse átviteli mátrixát a vákuumból üvegbe haladó fény gömb alakú üvegfelületen való törése, azután az üvegben terjedés, majd az üvegből vákuumba való felületen számolt fénytörés mátrixainak jobbról szorzata adja.

Két mátrix egyenletet írtam fel: a lencse nélküli terjedés két fénypályáját f -be és f^* -ba, majd a lencsén, az objektív széléről induló fény útját a f -be. Ez utóbbi számolás során, azonban, az egyenletet a lencse nélküli rendszerben felírt kiindulási szöggel írtam fel (45. ábra).



45. ábra. A mátrixoptikai számítás kiinduló geometriája.

A \bar{T} átviteli mátrix általános esetben:

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{f-q-d}{n_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{d}{n_2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2-n_1}{n_1 R} & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \frac{q}{n_1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A \bar{T} átviteli mátrix vákuumra felírva ($n_2 = v$), behelyettesítve a következő T mátrixot kaptam:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \begin{pmatrix} 1 & f-q-d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{d}{v} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{v-1}{R} & v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & q \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \dots \\ &= \frac{1}{vR} \begin{pmatrix} fv - f - vq + vR + q & fvq + fvR - fq - vq^2 + q^2 \\ v-1 & vq + vR - q \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Az ismert adatokat behelyettesíttem (d, f, R, v) és a mátrix egyenletet átalakítom vektoregyenletekké, és a hibás fénypályából az $y_0 = 0,5d$ távolságot és a számolt φ' szögvektort alkalmazom, akkor φ és q ismeretlenekre kapok két egyenletet.

$$(13.5 \quad \varphi') = \left\{ \frac{16}{21} \varphi(1,467(0,681663(14,4 - q) + 4,49898) + \dots \right. \\ \left. + q(0,0212273(0,681663(14,4 - q) + 4,49898) + 1) + 0) , \right. \\ \left. \frac{16}{21} \varphi((0,014699q + 1)) + 0 \right\}$$

Az egyenletrendszer megoldva kaptam, hogy

$$\varphi = \frac{117684}{138298} = 0,851 \dots [rad], \text{ azaz } \varphi \approx 54,195^\circ \text{ és } q = \frac{80685}{3736} = \mathbf{21,596[mm]}$$

Ez az eredmény több mint „megfelelő közelítés”. A számolás során kapott eredmény alapján a próbapadon összeállítottam a korrigált optikát, majd „kipróbáltam”, mennyire felel meg a méréskor kitűzött elvárásoknak. A lencserendszer végül kiváló képet mutatott a képmező kicsivel több, mint 90%-ában. A korrigáló lencsével javított optika legeléesebb képe esetén a korrigáló lencse 20 mm távolságban helyezkedett el az objektívtől.

A távcső tervezésekor meg kellett oldanom, hogy a távcsőtubus hőtágulása okán ne essen szét a háromtagú objektívlencse a felmelegítéskor, hűléskor pedig a nagyobb hőtágulási együtthatójú távcsőtubus ne roppantsa össze a fixen befogott lencsüket. A lencsék és az acélcsővek különböző hőtágulása miatt a lencsék rögzítését a távcsövön belülről, egy kisebb átmérőjű hőálló rögzítő csövekkel oldottam meg. Az ötletem alapján a hőálló acél tubus minta felőli végére hegesztett lencseütközőnek szorított objektív lencsüket belülről szorítottuk oda, egy kisebb átmérőjű, azonos anyagú acél cső segítségével. Az egymásba tolt csöveket M5 csavarral rögzítettük egymáshoz. Ennek az elrendezésnek az volt előnye, hogy a kemence felfűtése során képesek voltunk a lencsüket hézagosan pozícionálni, majd mikor minden elem felvette állandósult hőmérsékletét és a hőtágulásból származó végső méretét, akkor a lencsüket végleges pozíciójukban tudtuk rögzíteni. A hűtés megkezdése előtt újra kilazítottuk a lencserögzítő belső cső csavarrögzítéseit, biztosítva ezzel a szükséges, szabad lencsemozgást.

A lencsék fókuszálhatóságát úgy oldottam meg, hogy a nagyobb átmérőjű lencse a belső, melegben elhelyezett lencsékéntől függetlenül mozgatható, és önálló egységként rögzíthető volt. A kemence működési hőmérsékletére hevült optikát kívülről, hőálló kesztyű és fémből készült csőfogó segítségével mozgathattuk, amennyiben erre szükség volt. A fent leírt technikai megoldások összességében lehetővé tették a fókuszálást magas hőmérsékleten is. A lencserendszer eredő optikai úthosszát úgy állapítottam meg, hogy a kilépő fénynyaláb párhuzamos legyen. Egy tetszőleges belépő pupillájú, tetszőleges átmérőjű és tetszőleges fókusz távolságú, de végtelenre akkomodált kamera objektívje ilyen módon már illeszthető volt a képkiemelő távcső végéhez. A mérés során használt kamerák mindegyike éles képet és megfelelően nagy nagyítást tudott visszaadni.

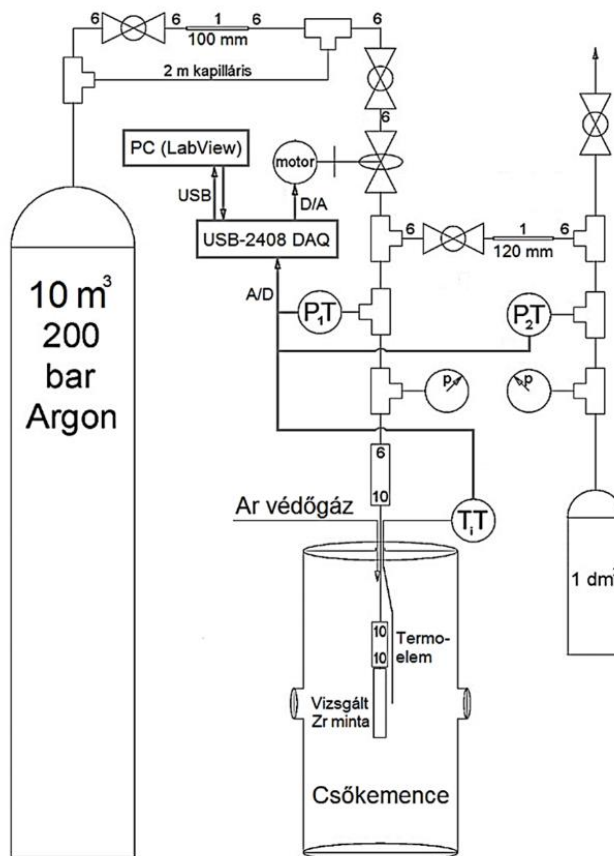
Mivel a méréseket hősugárzásra érzékeny, CCD és CMOS detektoros kamerákkal végeztük, gondoskodnunk kellett azok védelméről. A távcső külső részének megfelelő hűtését két módon

oldottuk meg. Egyrészt a kemencéből kijövő fényből egy IR műszervédő szűrővel kiszűrtük az infravörös tartományt (kb. 750 nm hullámhossz fölött), mely károsíthatná a detektorokat, másrészt a távcsőre kívülről hűtőbordákat szereltünk. Mivel a méréshez csak CMOS szenzorú kamerát és BL-CCD (hátsó megvilágítású CCD) gyorskamerát használtunk, mely az infravörös tartományban is érzékeny, így a látható fényt áteresztő, infravörös szűrő a mérés során jelenösen csökkentette a rendelkezésre álló fény mennyiségét. Emiatt ezt a szűrőt végül csak teszteléskor használtuk, majd a továbbiakban szűrőt nem alkalmaztuk.

4.2 Nagynyomású gázadagoló rendszer

A paksi fűtőelem-burkolatokkal végrehajtott kísérleti programok többségében – a numerikus modellek továbbfejlesztéséhez – izoterm méréseket hajtottunk végre lineáris nyomásnöveléssel [53, 79, 82, 83, 84]. A mérésekben szükség volt egy nagynyomású gáztöltő rendszerre, amellyel széles tartományban lehet beállítani a nyomásnövelési rátát.

Egy nagynyomású (200 bar) argon gázpalack reduktor nélküli kiömlő nyílására 6 mm átmérőjű impulzus csövet szereltünk, majd ezt vágógyűrűs, T alakú csatlakozó segítségével két párhuzamos ágra osztottuk. Az egyik ágra 0,23 mm belső átmérőjű, 2 m hosszú kapillárist, a másikba pedig 0,7 mm belső átmérőjű, 0,1 m hosszú, vékony falú csövet szereltünk. Az különböző csőágakra a tervezett, nagyságrendben eltérő mértékű nyomásnövelések miatt volt szükség. Kis nyomásnövekedési ráta esetén a hosszabb kapillárison keresztül áramoltattuk a gázt, a nagyobb nyomásnövelési sebességek eléréséhez (0,2 bar/s fölött) a vastagabb ágon engedjük a gázt. A gáz egy léptetőmotorral vezérelt túszelepen haladt át, majd az ehhez csatlakozó impulzuscső végére vágógyűrűs toldóval rögzítettük a vizsgálandó mintát. A túszelepet követően a gáz egy 1 liter térfogatú, 110 bar belső nyomásig hitelesített puffer tartályba áramolhatott, egy vékony falú csövön keresztül. A mérésben részt vevő kutatók biztonsága érdekében egy nyomásmérőt szereltünk a puffertartály ágra. A puffertartály a feladata az volt, hogy a pneumatikus hullámokat kiegyenlítse, ezáltal a hirtelen nyomásugrásokat időben integrálja (hidraulikus akkumulátor), valamint kis nyomásnövelési sebességek esetén (0,1 bar/s alatt) növelje a mérés pontosságát. A primer nyomást (P_1) az impulzuscső mintaoldalán mértük, a túszelep után (46. ábra). Az ábrán a PT jelzi a nyomástávadót, 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.



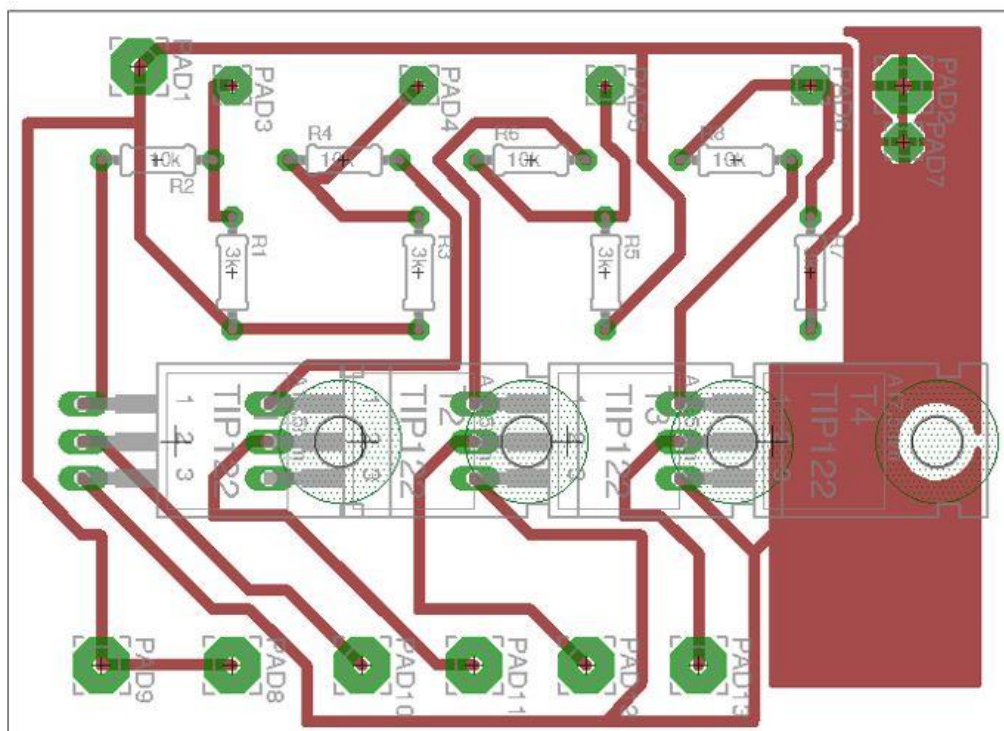
46. ábra. A felfűvódás mérés nyomásrendszerének vázlatja.

A méréskor az volt a cél, hogy a burkolatcső mintában a bevezetett argon nyomása egyenletes ütemben növekedjen. A célhőmérsékletre felmelegített minta az adott hőmérsékleten nem képes elviselni az egyre növekvő nyomást, ezért deformálódni kezd. A létrejövő átmérő-növekedés miatt a minta falvastagsága csökken, ennek következményeként még kevésbé viseli el a nagy nyomás okozta terhelést, a falvastagság-csökkenés kritikussá válik, a minta egy adott nyomásnál felhasad. Amennyiben a mintában a nyomásnövekedés sebessége a túszelep adott állása mellett időben állandó volt, akkor nem volt szükség szabályozásra. Ez azonban sokáig nem tudott állandósulni, mert már maga a minta térfogat-növekedése megkövetelte, hogy időegység alatt beáramló argon mennyisége a térfogatnövekedés ütemében növekedjen.

A nyomásnövekedés állandó értéken tartása érdekében a következő vezérlést terveztem: a nyomásrendszerben lévő túszelepet léptetőmotor segítségével, a mért nyomásadatok alapján szabályoztam, azaz a túszelep szárához erősített hatpólusú, unipoláris típusú léptetőmotor (Sanyo StepSyn 103-770-4243) segítségével nyitottam vagy zártam. 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 tekercseit egyesével tudtam kapcsolni. Az egyesével kapcsolt tekercsek vezérlése esetén ez a típusú motor 250 lépés alatt tett meg egy fordulatot, tehát egy argonra tervezett, nagy nyomású, laboratóriumi túszelep esetén elegendően kicsi túszelep mozgatóást érthettem

el. A motor tekercseire közvetlenül digitális 1 jelszintet, vagyis 5 V-ot kapcsoltam. Ezt a LabView VI segítségével, a digitális kimeneti csatornákon (D-OUT) keresztül végeztem el, és a kimeneti csatornák jeleit egy feltételes kapcsoló segítségével tudtam 0 szintről 1 jelszintre kapcsolni. Az 1 szint bekapcsolásának feltételeit a kutató által megadott nyomásnövekedési ráta alsó és felső határai, és a mért nyomásnövekedési ráta tényleges, mért értéke adta.

Mivel a vezérlő egység analóg kimenete nem volt terhelhető, mert a rá kapcsolt terhelés hatására leesett a feszültség, ezért a léptetőmotor tápellátását egy 5 V-os USB tápfeszültségről oldottam meg. Egy USB tápegység 1,1 A kimeneti áramot volt képes szolgáltatni. A motor mozgatáshoz nem használtam léptetőmotor vezérlő áramkört, ezért terveznem kellett egy olyan tranzistoros kapcsolót, amelynek a bemenő ellenállása technikailag végtelen, amellyel tehát elérhető volt, hogy ne essen le az USB-2408 kimenő csatornájának feszültségszintje. Az áramerősítő elektronika a léptetőmotor kapcsaira rákapcsolja az áramforrás teljesítményét, amennyiben a vezérlőegység a motor tekercsét bekapcsolja. A tranzisztorok melegedését figyelembe kellett vennem, ezért TIP122C nagy teljesítményű tranzisztor mellett döntöttem. Nyomatott áramkör tervező programmal megterveztem a használatos áramkört, majd megépítettem a motorvezérlőt (47. ábra).



47. ábra. A léptetőmotor vezérlő nyomatott áramköre.

A motor léptetését a virtuális (VI) műszer vezérli (48. ábra), amelyet a következőkben részletezek. A VI a nyomásmérő jeleit egy mozgó átlagot képező LI-FO (data last in – data first out) és egy, a felhasználó által beállítható, változó elemszámú tömbben tároltam. A tömbbeli legkorábbi

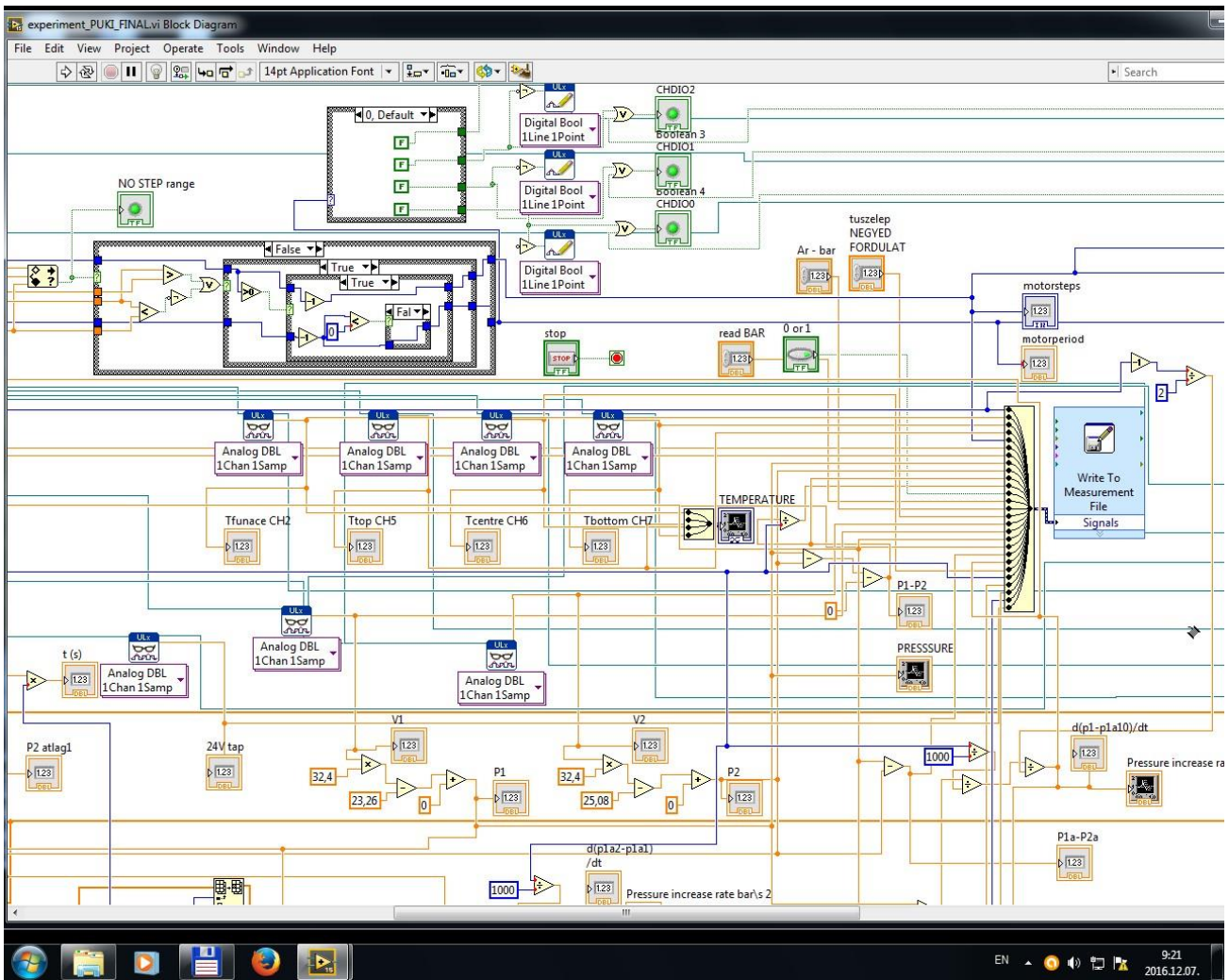
adatot minden mérésnél töröltem, az adatokat mutatókkal átpermutáltam a következő tömbelembe, majd a felszabaduló nulladik tömböt a legfrissebb mérési adattal frissítettem. A lépérről lépésre elkészített átlagot egy másik memóriahelyen tároltam. Meghatároztam programfutási ciklusonként a sokelemű tömb mozgóátlagának előző ciklusbeli és az aktuális ciklusra vonatkozó nyomásértékeinek differencia-hányadosát. A léptetőmotor lépéseit az határozta meg, hogy a felhasználó által megadott nyomásnövekedés minimum és maximum értéke a mért differencia-hányadoshoz képest mekkora. Amikor a mért nyomás túl sokat növekedett, akkor a léptetőmotor visszafelé lépett, és zárta a túszelepet, amikor a nyomás nem emelkedett a megfelelő ütemben, akkor a léptetőmotor előre felé lépett és nyitotta a túszelepet. A felhasználó által definiált nyomásnövekedési intervallum-értéken belül mért nyomásnövekedés esetén a léptetőmotor nem lépett.

A nyitás és zárás másodpercenként ötször történt, és a lengések a puffertartályban kiegyenlítődték, így a nyomásnövekedésben megfelelő pontosságot lehetett elérni. Tapasztalat szerint, a léptetőmotor mindig pár lépést előre felé, majd ennél kevesebb lépést visszafelé lépett, így hosszabb időátlagban képes volt egy egyenletesebb ütemű argonadagolást végezni a megnövekedett belső térfogat ellenére is. A 0,02 bar/s és a 6 bar/s között bármely nyomásnövekedési ütemet be lehetett állítani, amit a szabályozó tartani is tudott.

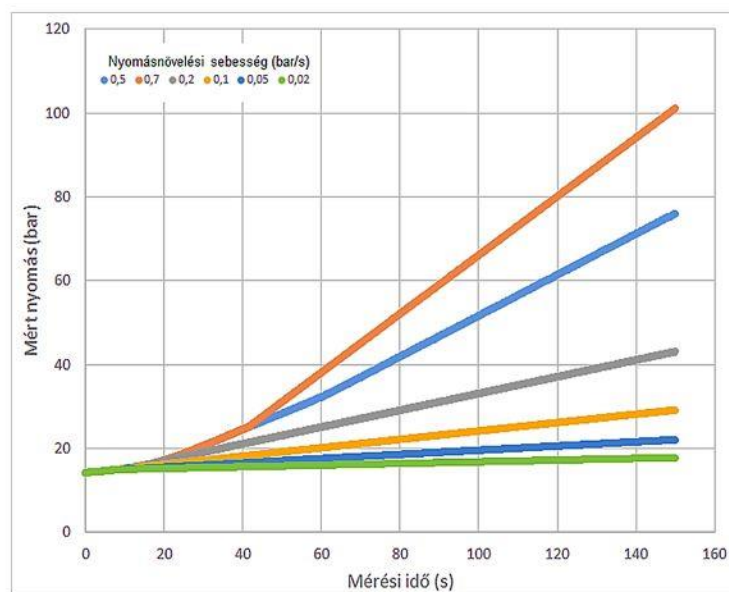
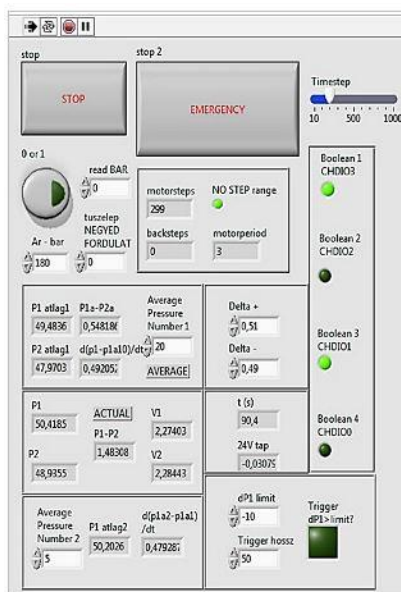
Nagyobb számú mérési adat mozgó átlaga esetében sem szabályoz lassabban a motor, ráadásul kevésbé zavarja a mérést a nyomástávadók saját zaja, ám az első n darab mérés lefolyása alatt a léptetőmotorok vezérlése blokkolt volt.

Hasonlóan blokkolt volt a motor lépése a túszelep védelme érdekében, amikor a léptetőmotor a kiindulási, zárt túszelep-állásnál záró irányban kapott vezérlőjelet, illetve 1500 nyitóirányú lépés utáni, további nyitó irányú vezérlőjel esetén. Meg kellett oldanom a túszelep visszaállítását is: ezt úgy oldottam meg, hogy a nyitóirányban történő lépéseket hozzáadtam, a záróirányban történt lépéseket pedig kivontam az összes lépések számából. A végén a mérés befejeztével a motor a megfelelő számú lépéssel visszazárja a túszelepet a kiindulási állapotba.

Annak érdekében, hogy felmérjük, milyen pontossággal voltunk képesek szabályozni a nyomásnövelést, több különböző, egyre kisebb sebességgel is kipróbáltuk a mérőrendszert. A teljesen kinyitott túszelep esetén, amikor az argonpalackban 200 bar nyomás uralkodott, szabályozatlanul 6 bar/s nyomásnövekedést sikerült elérni. A rendszer egészen alacsony, 0,012 bar/s nyomásnövelési sebességig képes volt az argonpalack kiindulási nyomásától és a minták növekedési ütemétől, illetve a szivárgások nagyságától függetlenül a kapott nyomásnövekedést kielégítő pontossággal létrehozni, azaz a nyomásgörbék időben, igen nagy pontossággal lineárisak voltak (49. ábra, jobb oldal). Az 49. ábra bal oldalán a virtuális műszer kezelőfelületét láthatjuk. A műszer beállítása szerint a léptetőmotor nem lép, ha a nyomás növekedése 0,49 és 0,51 bar/s közötti értéket vesz fel („Delta +” és „Delta -” paraméterek).



48. ábra. A kísérleti berendezés virtuális műszere (részlet), vezérlője és adatgyűjtő regisztere, LabView környezetben.

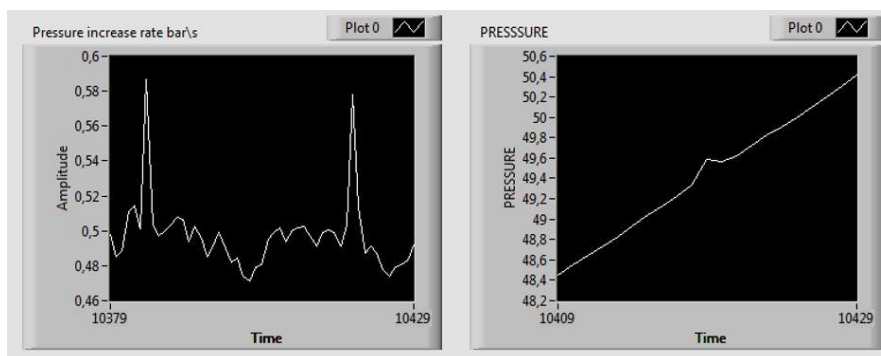


49. ábra. A LabView-ban készített mérőprogram kezelői felülete (balra), valamint a mért nyomás a nyomásnövelési próbák során, különböző beállítások esetén (jobbra).

Az 50. ábrán egy 0,5 bar/s nyomásnövekedés beállítása során mért nyomás és a mozgó átlagból számolt differencia-hányados értéke látható. A megengedett „nem lépés” tartománya a fenti példában említett értékek közé esik.

A minták felhasadását követően a gáz gyors kiáramlását egy csap elzárásával akadályoztam meg. Ezután, a mérés tervezett leállítása során, a léptetőmotor a nyitáshoz ötször gyorsabban automatikusan visszazárta a túszelepet a kezdeti pozícióba, egy leeresztő szelep kinyitásával pedig a puffer tartály kiürülését gyorsítottam.

A nyomásmérők és a puffer tartály épségének biztosítására 110 bar nyomás fölött vészleállást hajtottunk volna végre, melynek során az argonpalackot a leválasztó szeleppel elzárjuk, a motor automatikusan gyorsított szelepszárásba kezd, a leeresztő szelepen keresztül pedig a mérőberendezés nyomását azonnal csökkentjük. A mérések során éles vészleállásra egyszer sem került sor. 100 bar fölött várható maximális nyomás, valamint nagy nyomásnövelési sebességek esetén a méréseket a puffertartály kizárásával végeztük.



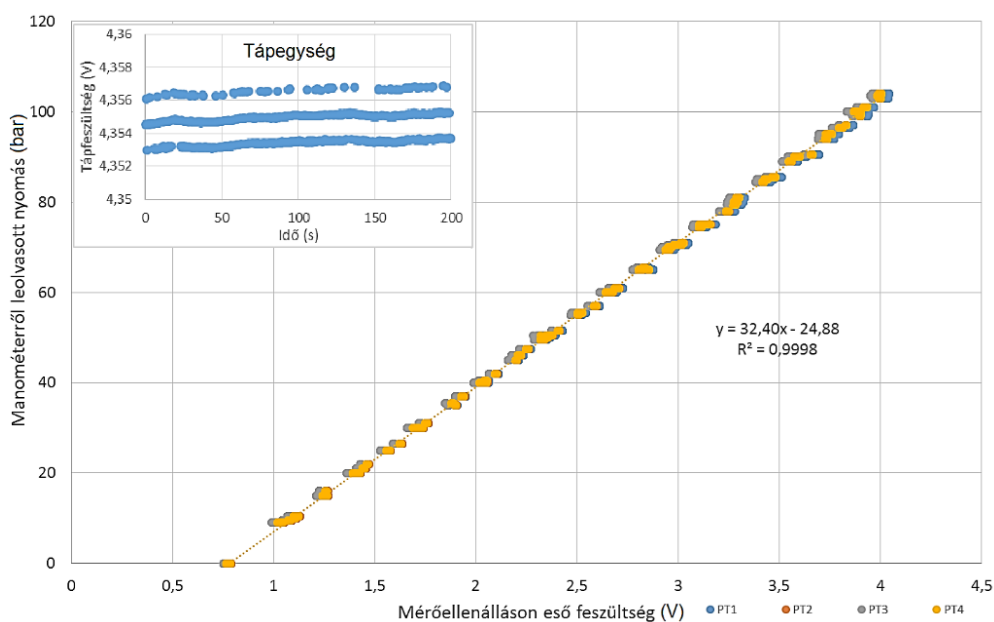
50. ábra. A 0,5 bar/s nyomásnövekedés során bekövetkező hiba automatikus korrigálása.

4.3 A nyomásnövelés problémáinak kezelése

A nyomás méréséhez 4-20 mA egyenáram válaszjelet kiadó, analóg, 100 bar méréshatárú induktív nyomástávadókat használtunk (WESTA-T 3145-0-220-0), amelyeket WEHO MS-50-24 típusú, kapcsolóüzemű, 24 V (2,1 A) egyenfeszültség-generátorra csatlakoztattunk. A feladat az volt, hogy készítsék egy, a megadott feszültséggenerátorra csatlakozható mérőellenállást tartalmazó elektronikát, amely 0-5 V kimeneti jelet generál a nyomástávadó áramával arányosan. A lent vázolt módon kalibráltam az elkészített mérőberendezést. Amikor a mintákat alacsonyabb hőmérsékleten vizsgáltuk (700 °C-on), a burkolatcső képes volt elviselni a 160 bar nyomást is, ezért az alacsonyabb hőmérsékletű mérésekhez új detektort szereztünk be. Az új detektorok SUCO 07202520-3-B001 típusú, a korábbival teljesen azonos impedanciájú távadók voltak, amelyeket a lent részletezett módon kalibráltam. A két jeladó azonos impedanciája lehetővé tette, hogy pusztán a vezetékek csatlakoztatásával egy új, ugyanolyan elektromos jelszintek között működő távadót kapjunk. Az új

távadó nyomástávadó két és félszer volt nagyobb a korábbinál, így a hozzá tartozó kalibrációs görbének csak a meredeksége változott.

A WESTA-T nyomástávadó kimenete 0-100 bar nyomás esetén 0,4-20,0 mA közötti egyenáram volt. Az egyenáramot megfelelő arányú feszültségosztó mérőellenálláson keresztül vezetve 0,7-4,0 V közötti feszültségeket kaptam. A mérőellenállások pontatlanságai a kalibráció során kiestek, így az általunk tervezett, a nyomástávadóhoz kapcsolt jelátalakító áramkör a mérés során nem befolyásolta az érzékelő elektronika pontosságát. A mérőellenálláson eső egyenfeszültséget egy Measurement Computing által gyártott USB-2408 típusú adatgyűjtő A/D konverterének két, egymástól független, közös földelésű jelcsatorna bemenetére kötöttem, és differenciális üzemmódban mértem a feszültséget. Az A/D konverter differenciális módban a két kapocsfeszültség különbségét képezve adta vissza a pólusok közötti jelet. Ennek nagy előnye az volt, hogy, bár a két kapocs bemeneti impedanciája a föld bemeneti impedanciájától különböző volt, mégis egymáshoz képest egyformának mutatkozott, ezért a föld potenciálon (árnyékoló vezetékben) kialakult zaj jelszintje mindkét kapocs jelszintjében fáziskésés nélkül, azonosan jelent meg, amelyek különbségképzéskor pedig annullálódtak.



51. ábra. A vizsgált négy nyomástávadó együttes kalibrációs görbéje. Az index képen a tápegység kimenetére kapcsolt mérőellenállás feszültsége látszik.

A nyomástávadók kalibrációja során néhány bar lépésközzel felvettem a nyomástávadóra kapcsolt mérőellenállás válaszjelét. A nyomás nagyságát kalibrált Bourdon-csöves manométerrel mértem. A kalibrációt 10 bar nyomásról indítottam, mivel alacsonyabb nyomások esetén az általunk használt manométer sem olvasható le megfelelő pontossággal. A kalibrációt 110 bar nyomásig végeztem. A kalibráció során egyszerre, mind a két nyomástávadó görbéjét felvettem (51. ábra, sárga és kék pontok). A mért pontokra egyenest illesztettem (51. ábra, narancssárga pontozott vonal). A méréshez kiválasztott két nyomástávadó között csak az atomszférikus nyomáson mért alapjelben volt

különbség (offset), az eltérést nem kellett figyelembe venni akkor, 100 bar feletti nyomások voltak a rendszerben. Amikor 100 bar alatti nyomású argonnal mértük a felfűvódásokat, azaz 750 °C-nál magasabb hőmérsékleten, akkor a két nyomástávadó jelszintbeli különbségét a mérőprogramban korrigáltam. A nyomástávadók cseréje után a 250 baros érzékelők jelei közötti különbségek elhanyagolhatóak voltak.

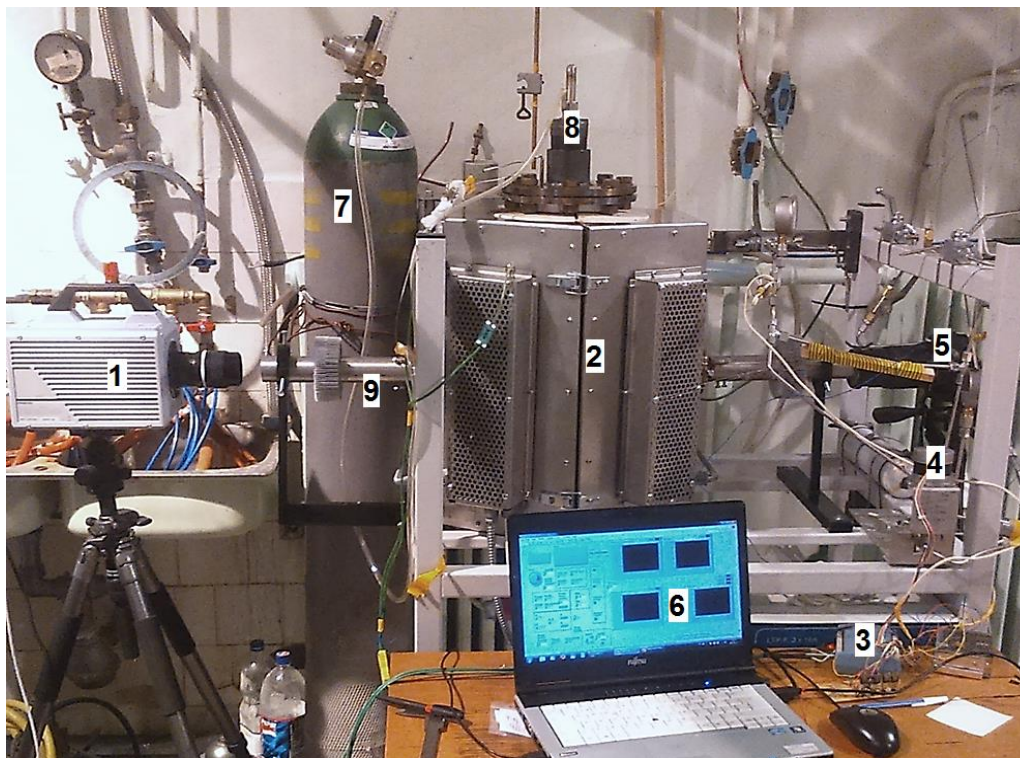
A nyomástávadók impedanciája a nyomással változik, azonban a kiadott 4-20 mA jel mértéke erősen függ a megápláló feszültségtől. A kísérletben használatos kapcsolóüzemű tápfeszültség kimenő jelét feszültségmérőre kötöttem, majd hosszú időn keresztül rögzítettem a mért feszültségeket. Azt tapasztaltam, hogy a 4,355 V mellett $\pm 0,02$ V véletlen időben bekövetkező feszültségugrás lép fel (51. ábra, index kép). Ennek hatására a nyomásmérő műszer jelátalakítója pontatlan, azonban ennek a pontatlanságnak a nagysága elhanyagolható. A végeredményben nem csak a nyomásnövekedési ráta nagyságrendjében látszik ez a hiba teljes mértékben jelentéktelennek, hanem a magában az egzakt nyomásmérésben is.

Amennyiben a mintában a nyomásnövekedés sebessége a túszelep adott állása mellett időben állandó, akkor nincs szükség további szabályozásra. Néhány előkísérlet során azonban előfordult, hogy a kemencében a minta rögzítésénél szivárgás lépett fel, illetve olyat is tapasztaltunk, hogy az argon palack nyomása csak kicsivel volt több, mint a felhasadáshoz szükséges nyomás. Ilyenkor a mintában a felhasadás előtt folyamatosan csökkenő mértékű volt a nyomásnövekmény – adott túszelep állás esetén az időegység alatt beáramló argon mennyisége nem fedezte a megfelelő nyomásnövekedés argonszükségletét.

A nyomásnövelést ellenőrző nyomáspróbák alkalmával azt tapasztaltuk, hogy a szabályozó a kívánt mértékű nyomásnövekedéssel összemérhető, a rossz tömítettség miatt bekövetkező, akár 50%-os szivárgás esetében teljes mértékben képes volt kompenzálni a nyomásvesztést. Ezen 50%-os szivárgás alatt azt értettük, hogy adott túszelep állás mellett, a minta belső nyomásában az aktuális nyomásnövekedés fele akkora mértékű volt ahhoz képest, mint amit ugyanazon túszelep-beállítás esetében mértünk volna, egy nem szivárgó minta esetén. Tapasztalat szerint tehát a szabályozó nagyobb méretű szivárgás esetén is képes volt akkora szelepnnyitásra, vagy akár a szelep folyamatos nyitására, hogy a szivárgó mintában a kísérlethez kívánt nyomásnövekedés fennálljon. Ehhez csak elegendően nagy többletnyomásnak kellett lennie az a kísérlethez használt argon gázpalackban.

Amikor a nyomás eléri azt az értéket, amit a burkolat már nem képes az adott hőmérsékleten elviselni, felhasad. Ekkor a nyomás egy mérési ciklus időskáláján leesik atmoszférikusra. Meg kellett építenem egy olyan lefűvátószelepet, amely a felhasadást követően tized millimásodperc alatt kinyit és védi a csőhálózatot és a kemencét. A szelep egy trigger jelre kapcsolt. Ez a trigger a gyorskamerának is megfelelő jelet szolgáltatott, amellyel egy nagyságrenddel gyorsabban leállítható volt a felvétel, mint manuálisan.

A mérési elrendezés az 52. ábrán látható. 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 tükörreflexes fényképezőgép (5) látható a távcsövek (9) tengelyében. A minta a cserélhető kemencefejhez van rögzítve (8), mellette a kemenceteret mosó argon gázpalackja (7).



52. ábra. A mérőberendezés képe.

4.4 A minták előkészítése és a mérés menete

Az E110 és az E110G jelű ötvözetekből a laboratórium a MVM Paksi Atomerőmű Zrt-től kapott gyári állapotú, azaz nem előkezelt, nem besugárzott burkolatsöveket. A csövekből esztergával, lassú forgácsolási sebességgel, adott hosszúságú mintákat vágunk le, amelyeknek az egyik végébe 2 mm vastag, tiszta cirkónium anyagból esztergált dugót hegesztettünk. A minták másik végére 9,1 mm belső, 10 mm külső átmérőjű, 12 mm hosszúságú acél tömítőgallért hegesztettünk, amelyre vágógyűrűs, nagy nyomású csatlakozót szereltünk. A mintára dróttal rögzítettünk három darab K típusú termoelemet (53. ábra). A jobb oldalon a minta mellett a referenciaháló és a termoelemek, a bal oldalon pedig a cserélhető kemencefej és a vágógyűrűs gyorscsatlakozó láthatók. A minták szivárgása a vágógyűrűk tömítetlensége okán fordulhatott elő egyes esetekben. A minták belső nyomását 99,999% tisztaságú argon gázzal biztosítottuk. A mintához hőálló acél rácsot erősítettünk, az optika kalibrálása céljából. A mérések során kiderült, hogy a kalibrálás elvégezhető az alapállapotú minta képének felhasználásával, így a rácsot elhagytuk.



53. ábra. Egy hegesztett cirkónium minta a kemencébe történő behelyezés előtt.

A kemencét a célhőmérsékletre melegítettük, és közben behelyeztük a képkicsatoló távcsöveket a tartócsonkokba, illetve a kamerákat hozzáillesztettem a távcsövek optikai tengelyéhez. A kemence terébe 5 l/perc sebességgel tiszta mosóargont áramoltattunk. A felhevülő, zárt kemence terébe egy 10 mm vastag acélrudat helyeztünk el, a minták helyére. Az acélrúd a célhőmérséklet beállása során maga is felizzott, így el tudtam végezni a fókuszálást.

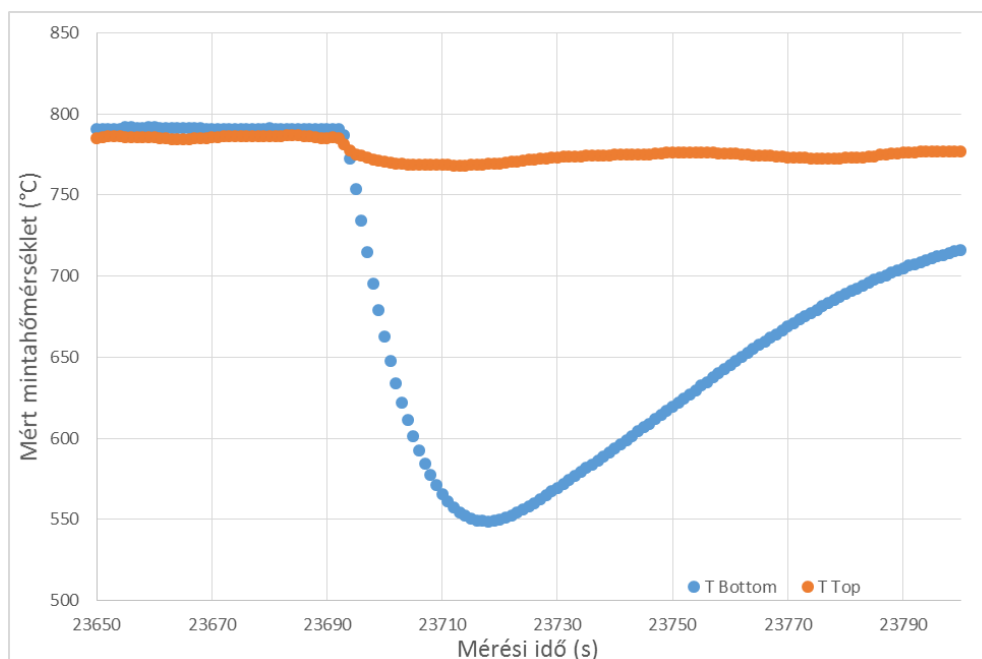
A termoelemeket bekötöttem a jelfeldolgozó és adatgyűjtő A/D konverter megfelelő csatornáiba, majd elindítottam a LabView virtuális mérőműszert. Beállítottam a 200 ms adatgyűjtési ciklusidőt, a 20 adatból álló tömb méretét, és a nyomásnövekedési ráta megengedett minimum, illetve maximum értékét. Elneveztem a keletkező adatfájlt, melynek nevezéktana a mérés idejére, a nyomásnövekedés mértékére, a minta felszíni hőmérsékletére és a minta ötvözet-összetételének a jelölésére utal. A túszelepet zárt állásba állítottam, a léptetőmotor tekercseit megtápláló vezérlőelektronikát bekapcsoltam, de nem adtam neki vezérlőjelet, mert jelen állapotban még nem érte el a mért nyomásnövekedés a kívánt értéket: a léptetőmotor vezérlés automatikusan nyitotta volna a túszelepet. Az argon palackot nyitott, állapotban készenlétebe helyeztük. Az acél rudat kiemeltük a kemencéből és hőálló hűtőtálcába helyeztük, majd a legrövidebb időn belül a mintát a behelyeztük a kemencébe. A minta egy hidraulikus gyorscsatlakozóval volt kapcsolható a nyomásrendszerhez. A minta pozícionálása a már előre fókuszált kamerák látómezői alapján gyorsan megtörténhetett, és máris indíthattuk a mérést. Az előkészületek során a minta 5 percnél rövidebb idő alatt felvette a célhőmérsékletet, és amint a hőmérsékleti egyensúly beállt, bekapcsoltuk a kamerákat, elindítottuk a felvételeket, az argon főcsap kinyitásával, illetve a léptetőmotor vezérlőjelének bekapcsolásával elindulhatott a léptetőmotor forgása. Ezzel a túszelep kinyitott, az argon beáramlott a mintába.

A mérés akkor fejeződött be, amikor a minta felhasadt, a lefúvatószelep biztonsági állásba kapcsolt, a gyorskamera leállított állapotban elmentette a mérés során elkészített felvételt, lezártuk a nagy nyomású argon palackot, és lezártuk a biztonsági szelepet. A videokamerákat leállítottuk, a LabView biztonsági mentést készített a nyomásadatokról, a léptetőmotor visszalépett a kiindulási pozíciójába, bezárva ezzel a túszelepet. Lecsatlakoztattuk a hidraulikus gyorsárat, kivettük a mintát a kemencéből, a hűtőtálcára helyeztük azt, az acélrudat pedig visszahelyeztük a kemencébe, az enyhén kihűlt kemence pedig visszamelegedett a célhőmérsékletre. A felhasadt mintát le kellett hűteni, a termoelemeket le kellett pattintani a mintáról. A nagynyomású, vágógyűrűs csatlakozó szerelhető felét le kellett szerelni, a helyére pedig egy új mintát kellett felerősíteni.

4.5 A próbamérések eredményei

Az első négy mérést 800 °C hőmérsékleten, argon atmoszférában, 150 mm, 65 mm, 70 mm és 85 mm hosszúságú E110G mintákkal, 0,4-0,7 bar/s közötti belső nyomásnövekedési sebességgel létrehozott terhelés mellett végeztük. (A minták hossza az eredetileg levágott csődarabok hosszára utal. A mérés során a minták utolsó mintegy 8 mm-e a toldóban volt, a minták a hegesztett dugók miatt pedig mintegy 2 mm-rel hosszabbak lettek.) Az eredmények azt igazolták, hogy a kifejlesztett rendszerrel képesek voltunk beállítani tetszőleges nagyságú nyomásnövekedést (0,01 és 5 bar/s között), a beállított nyomásnövekedést pedig nagy pontossággal állandó értéken tudtuk tartani. A kemence hőmérséklet-ingadozása 800 °C-os beállítások mellett ± 5 °C volt. A leghosszabb, 150 mm-es minta 77 bar nyomáson vált inhermetikussá, ez részben az általa elszenvedett oxidációnak, részben pedig annak volt köszönhető, hogy egy hosszú mintadarabban kisebb a végdugók és hegesztések merevítő hatása, valamint több lehet a hibahelyek száma.

A vizsgált kísérleti elrendezésben a felmerülő nehézségek (a háromzónás csőkemence fűtőtestének és szigetelésének nagy hőtehetetlensége, a kemencét vezérlő automatika okozta hőmérsékleti lengések, az optikai mérőberendezés hűtő hatása, és a kemence nem hermetikus volta miatt beszivárgó kis mennyiségű levegő hatására bekövetkező oxidáció) ellenére az E110G felhasadáshoz szükséges nyomásértékek jól reprodukálhatók voltak. A próbamérések eredményei a 9. táblázatban találhatóak.



54. ábra. A felhasadás során a minta hőmérsékletének csökkenése a felhasadás során kiáramló argon miatt.

Látható volt a videokamerák felvételein, hogy a mintákat a kitóduló argon gáz adiabatikusan lehűtötte. A felvételeken is látszik, hogy a minták minden esetben a vörös izzás hőmérsékleténél

hidegebbre hűltek. Ezt a felhasadáshoz legközelebb elhelyezett termoelemek is megerősítették. A termoelemmel mért hőmérséklet adatok alapján úgy becsültem, hogy a minta a felhasadást követően mintegy 10 s alatt 500-600 °C-ra hűlt (54. ábra), azonban a videófelvételen a kihűlés egy expozíció alatt megtörténik, azaz 1/60 s-nál lényegesen gyorsabb hűlést látunk. Az ábrán a narancssárga pontok a nyomáscsatlakozó csavarfejhez rögzített termoelem adatait, a kék pontok a minta hegesztett végéhez illesztett termoelem adatait mutatják, 800 °C-os kemencehőmérséklet esetében.

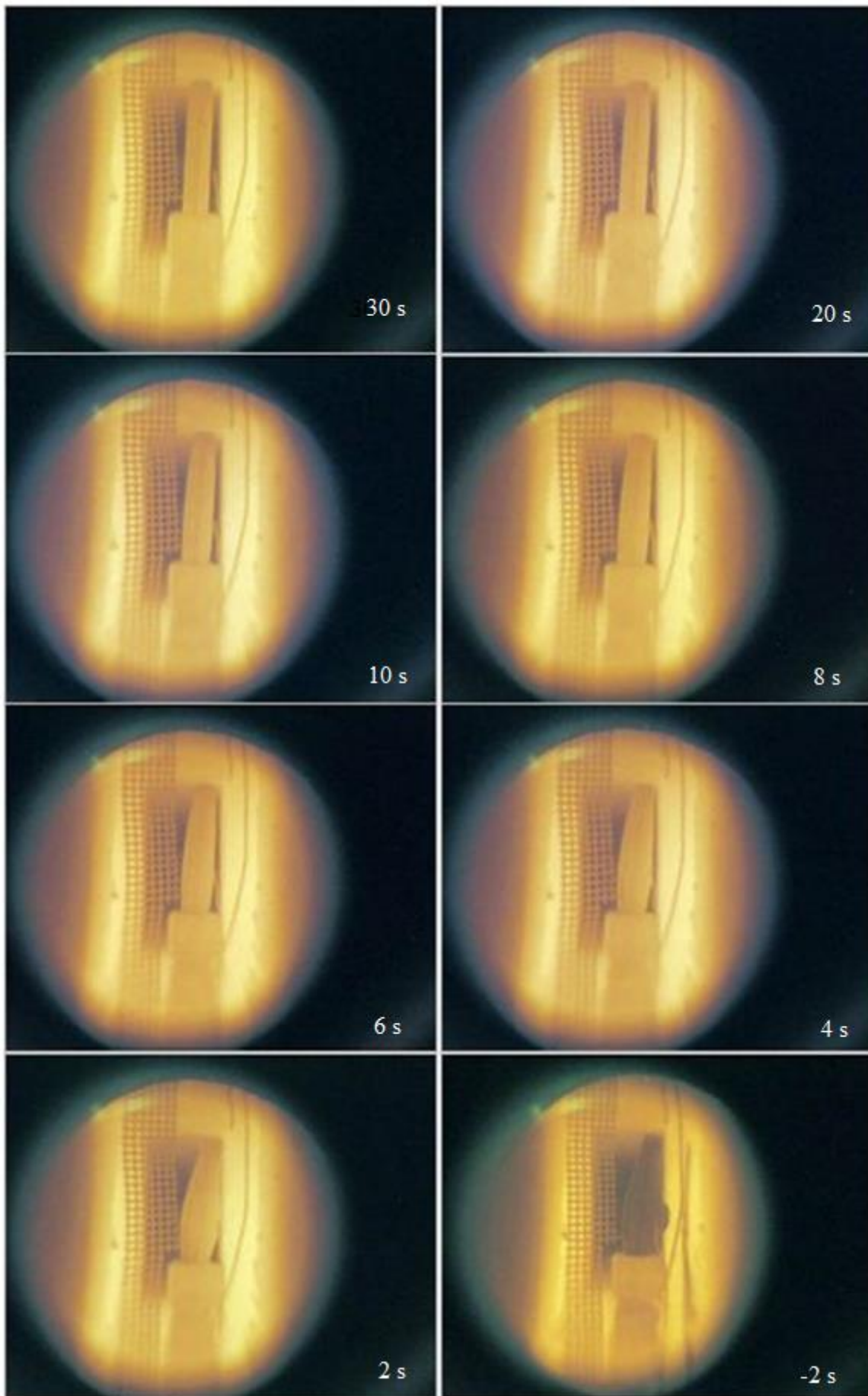
A négy minta próbamérése során nyolc videófelvételt készítettünk, és a felvételek tanúsága szerint éles, hibahatáron belüli sík, nagy felbontású képet tudtam létrehozni a 800 °C hőmérsékletű minták 50-60 mm-es részéről. A 150 mm hosszúságú minta felfűvódó tartománya nem esett a kamerák látómezejébe, ezért úgy döntöttünk, hogy rövidebb mintákat alkalmazunk. A minták felfűvódásának elemzése során azt tapasztaltuk, hogy a felfűvódás 20-30 s-mal a felhasadás pillanatát megelőzően már szemmel látható (becslés szerint 100 µm-nél nagyobb) mértékű volt. Az 56. ábrason látható a 2. minta alakjának változása a felfűvódás miatt. A képsorozaton a minta a felhasadása előtti 30., 20., 10., 8., 6., 4., 2. másodpercben, valamint a felhasadás utáni 2. másodpercben készített pillanatképeket láthatjuk. A képeken a minta terhelés hatására felvett alakja és a méret-referenciának használt drótháló látható.

A kísérletek során kapott, a felfűvódás során enyhén elhajlott, felnyílt oldalú minták az 57. ábrán láthatók. A felső sorban a 2. a 3. és a 4. számú minta fotója, az alsó sorban az 1. számú minta képe látható. A minták végéről a hollandi anyákat nem tudtuk roncsolásmentesen leszedni, mivel a minta végére szerelt vágógyűrű rápréselődött a csőre. Azt láthatjuk, hogy mindegyik minta tengelye elgörbült, a görbült csövek a konvex oldalukon hasadtak fel.

A felhasadt minta konvexitásának definícióját az 55. ábra szemlélteti.



55. ábra A felhasadt minta konvexitásának definíciója.



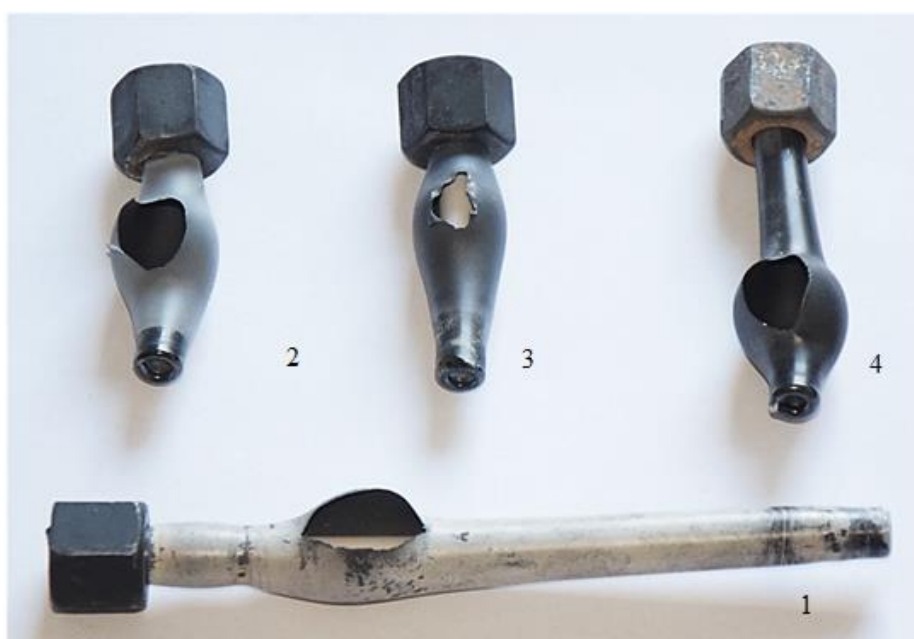
56. ábra. A 2. próbamérés videóképkockái.

A leghosszabb, 1. számú, és a legrövidebb, 2. számú minták színe szürke árnyalatú, ez egy kialakult oxidréteg jelenlétére utal. A többi minta nem oxidálódhatott ilyen mértékben, mert a mérés során a hosszú idejű felfűtés és az optika élesre állítása alatt a kemencén kívül voltak, majd a mérés után közvetlenül ismét kivettük őket a kemencéből.

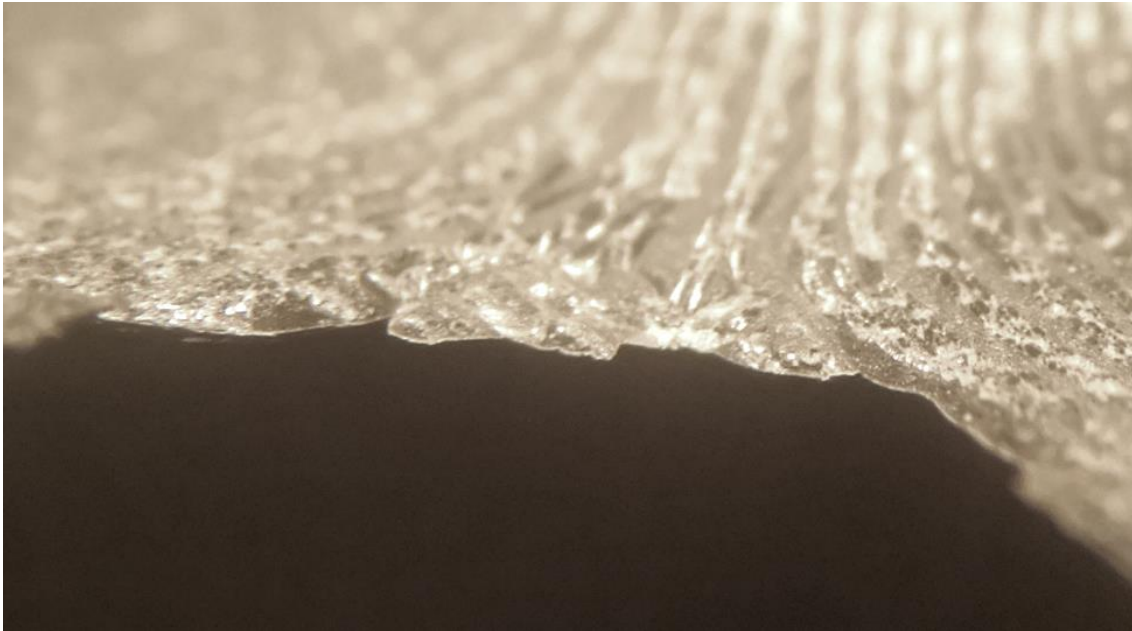
Egy 6,3-szeres nagyítású optikai mikroszkóppal vizsgálva a minták felhasadt széleinél azt találtam, hogy a hossz tengellyel párhuzamos, barázdás mintázat rajzolódott ki a húzással készült minták felszínén. Ez a mintázat egy E110G minta és a két E110 minta kivételével mindegyiken jól megfigyelhető volt. A mintákon kialakult barázdák minden esetben hosszirányban alakultak ki a magas hőmérséklet és a terhelés hatására. Az 58. ábrán látható a 4. számú minta felhasadt széle és a minta felszínén húzódozó barázdák mintázata.

9. táblázat. Az előkísérletek mérési adatai.

Mérés sorszáma	Mintahossz (mm)	Nyomás-növelés (bar/s)	Hőmérséklet (°C)	Felhasadási nyomás (bar)	Minta anyaga
1.	150	0,48	795	76,9	E110G
2.	65	0,43	755	91,1	E110G
3.	70	0,69	805	94,1	E110G
4.	85	0,39	820	89,9	E110G



57. ábra. Az előkísérletek különböző hosszúságú, a felfűvódás során különböző mértékben elhajlott mintái.



58. ábra. A 4. számú minta felhasadt széle és a felszínen futó barázdák rendszere 6,3-szeres nagyítású optikai mikroszkópban.

A mintázatból az látszik, hogy a barázdák a minta torzulásait követik, nem mutatnak a repedés kezdeti pontjába futó sugaras szerkezetet. A repedés a barázdákkal párhuzamosan fut, ami jól látható az 1. számú minta eloxidálódott felületén is (59. ábra). A rideg oxidréteg a felszínen nem volt képes a tiszta cirkóniummal azonos módon megnyúlni a felfűvódás közben. A réteg felrepedezett, a lekopott oxidréteg alatt felszínre kerülő sötét cirkónium a barázdákhoz hasonló mintázatot rajzolt ki.



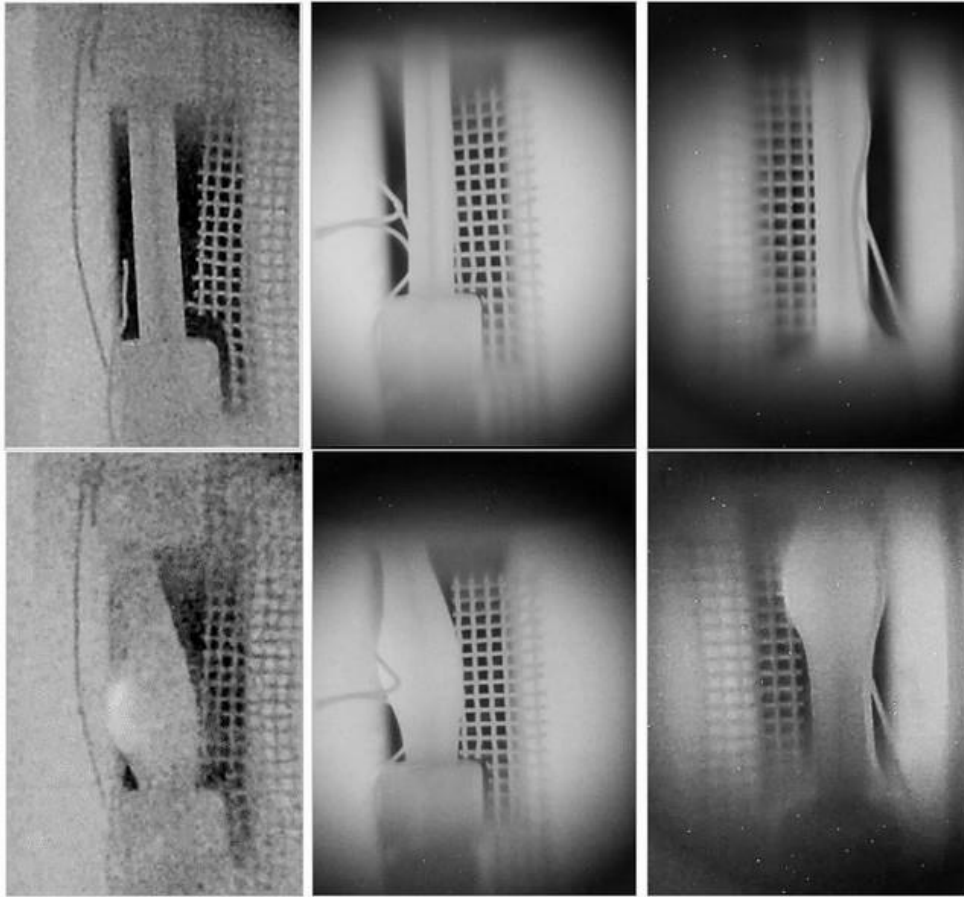
59. ábra. Az 1. számú minta oxidálódott felületén megjelenő barázdák rajzolata.

Az előkísérletek során minden alkalommal megfigyeltem, hogy a felhasadást megelőző 0,1-1 s során a burkolatanyag a felhasadás leendő pozíciójában jól láthatóan kifényesedett, a minta egyenletes halvány vörös színe egy foltban sárgás színben felfényesedett. A képlékeny alakváltozás általában hőmérséklet-növekedést okoz. A hőmérséklet kiegyenlítődére hővezetéssel a gyors alakváltozás miatt nincs idő. A falvastagság jelentős csökkenése elősegíti a melegedési folyamat gyors lefolyását. A képek RGB csatornás fényességméréséből megbecsülhető volt, hogy a felfényesedett és sárgult folt a minta magasabb hőmérsékletű tartománya, vagyis a megemelkedett hőmérséklet miatt változott meg a minta színe. A forró folt felfényesedése valószínűleg nem fényszóródási, vagy árnyékjelenség, hiszen a „már enyhén” felfűvódott minták más tartományain ehhez hasonló foltokat nem tudtam azonosítani. A felmelegedés első jelei csak a felhasadást megelőző másodperc környékén váltak egyértelművé. A kamera felvétel RGB pixelintenzitásai alapján, a 800 °C-ra jellemző meggyvörös színtől eltérő, sárgásabb folt a színhőmérsékleti becsléseim alapján körülbelül 840-850 °C hőmérsékletű lehetett.

Ezt egyelőre a videokamerás megfigyeléssel nem tudtuk alátámasztani, azonban egyszerű fotometriai becsléseket végeztem a jelenség pontos felmérésére. A felforrósodás hőmérsékletének értéke amellet, hogy a jelenleg használatos véges elemes szimulációk anyagmodelljeibe lehet majd beépíteni, további elméleti számítások és anyagtudományi kutatások alapjául szolgálhat. Úgy gondolom, hogy a felmelegedést a megfolyó anyag belső súrlódása hozza létre ott, ahol a felhasadás előtt nagymértékű képlékeny alakváltozás zajlik le a mintában. Azt találtam a gyorskamerás mérések alapján is, hogy ahol a minta felhasadása során gyors alakváltozást szenved, ott kivilágosodik.

Az első mérések során kiderült, hogy a felhasadáskor a minta nagysebességű, oldalirányú lengésbe kezd, a kitóduló argon gáz impulzusváltozása és a zárt rendszer impulzusmegmaradásának tétele miatt. Az alkalmazott 60 fps sebességű videófelvétel ennek a lengésnek a megfigyelésére lassúnak bizonyult, a minta lengése ennél rövidebb idő alatt volt mérhető. A rezgés kiküszöbölésére egy speciális támasztóasztalt építettünk be a kemencébe, mely a mintát a kemence közepében rögzíti, a minta alsó pontján, azonban a rakéta hatás akkora erővel vágta oldalra a mintát, hogy az kifordult a tartó furatából. A további minták szabadon lógó végeit a későbbi mérések során nem rögzítettük.

A korábbi elgondolások szerint a görbülés a kitóduló gáz rakétahatása miatt következhet be. A 65 mm, a 70 mm és a 85 mm hosszúságú mintákkal végzett kísérletek videófelvelelei alapján egyértelműen azt tapasztaltam, hogy a felhasadást megelőző egy-két másodpercben a minták elkezdtek elhajlani, a felhasadást közvetlenül megelőzően már jelentősen, körülbelül 5°-ot elhajlottak. Az elhajlás a felfűvódás lokalizációjával egy időben kezdődött.



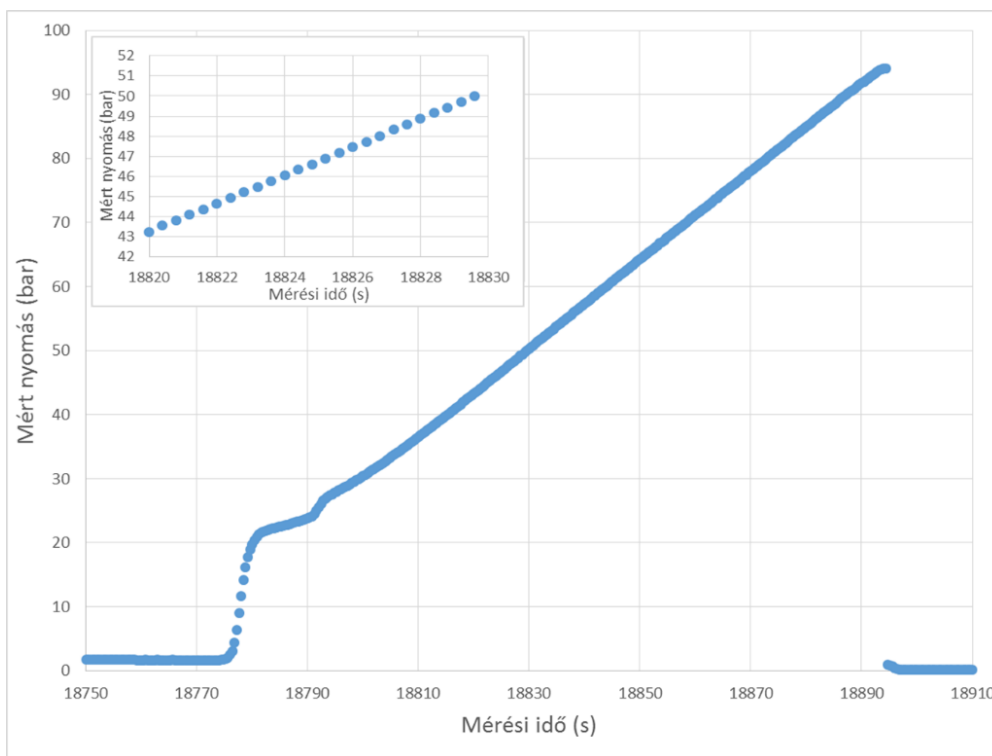
60. ábra. A 65 (balra), 70 (középen) és 85 mm hosszú mintákkal (jobbra) végzett mérés képei. A felső képeken a minta eredeti alakja és pozíciója, az alsókon pedig az felhasadás előtti utolsó képkockán rögzített alak és a forró folt látható.

A 60. ábrán három próbamérés (2., 3., 4. minták) képei láthatók, a jobb kontraszt miatt fekete-fehérben. A felső képeken a minta eredeti alakja és pozíciója, az alsókon pedig az felhasadás előtti, utolsó rögzített képkocka látható. Mindhárom képen látszik a minta oldalának felhevülése, kifényesedése a felhasadás helyén. Az első két esetben jól megfigyelhető a minta elhajlása, a harmadik esetben ez nem látszik, mert a minta a kamerától távolodva hajlott el. Az elhajlás mértéke a felhasadást követően nem változott lényegesen, vagyis a görbülés nem a felhasadás, hanem a felfűvódás során jött létre. Ezzel a berendezéssel már három minta mérése alapján is igazolhattam, hogy a felhasadás az elhajló minták esetében a korábbiakban jól megismert tapasztalatokkal azonosan, a konvex oldalon következett be.

A 60 kép/másodperc sebességű, szokványos, nagy felbontású (HD 1080p) videókon a felhasadás előtti tizedmásodpercig követhető az alakváltozás, azonban a felhasadás részletesebb vizsgálatára ezek a kamerák nem alkalmasak.

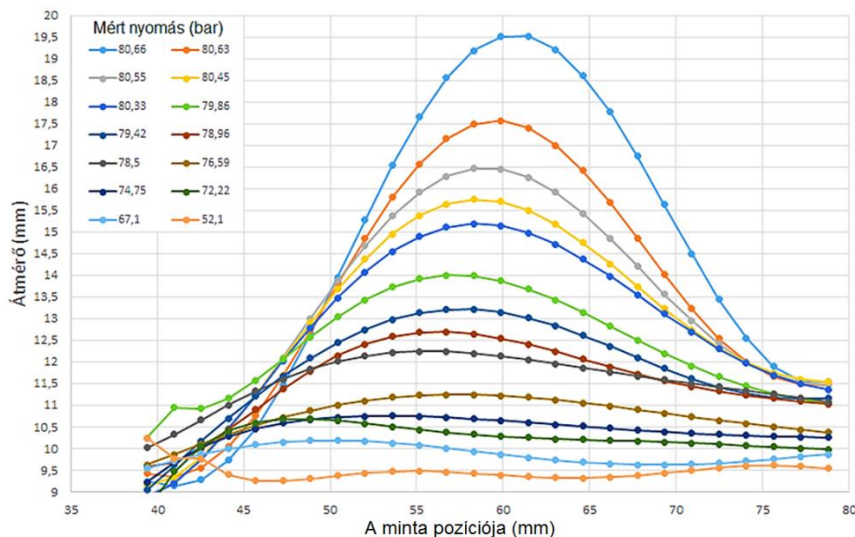
A tesztmérések során felvett nyomás időfüggését a mintában a 61. ábrán láthatjuk. Látható, hogy a tranziens lengések beállása után a szabályozó megtartotta a nyomásnövekedési ráta értékét

annak ellenére, hogy a kísérlet során folyamatosan csökkent az argon palack nyomása, és a felfúvódó minta térfogata is egyre nőtt a felhasadást megelőző pár másodpercben. A 61. ábra index képe a nyomás növekedésének pontosságát mutatja, 10 másodperc időintervallumban. A görbe végén a nyomás leesik atmoszfériusra. Ennek az oka épp a mérés célja, ekkor a minta felhasadt, a nagy nyomású argon pedig eltávozott a mintából. Az ábráról meghatározható a felhasadáshoz tartozó nyomás nagysága. Az ábra tanulsága szerint ez az előkezelés nélküli, 85 mm hosszú E110G minta 800 °C-on, 0,5 bar/s nyomásnövekedés mellett 92 bar nyomáson veszítette le integritását.



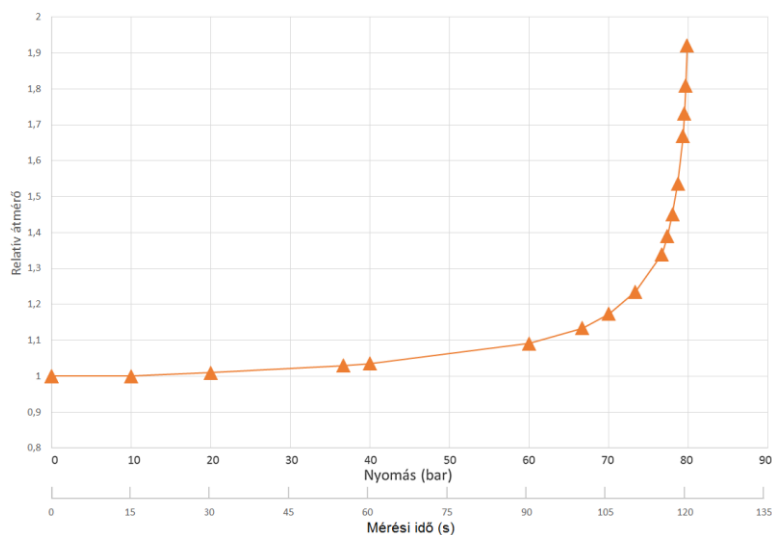
61. ábra. A minta belsejében mért nyomás a 3. próbamérés során.

A HD kamerás felvételek segítségével megmértem, hogy a felfúvódás során mekkora a cső átmérőjének növekedése az időben. Az egyes időkhöz hozzárendeltem az aktuális belső nyomás értékét. Az átmérőnövekedés a 7. minta (a gyorskamerás mérés esetén az átellenes oldali kémlelőnyíláshoz hagyományos kamerát rögzítettem) esetében a 62. ábrán látható. A nyomásértékek a minta felhasadását megelőző időpontokhoz tartoznak 0,03, 0,3, 0,6, 0,8 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 és 60 másodperccel a felhasadás előtt. A minta átmérőjét a videófelvételek alapján, több ponton végrehajtott „kézi illesztéssel” határoztam meg a fenti időkben készült pillanatfelvételeken, majd hatodfokú polinomokkal közelítettem a minta alakját (jobb és bal szélét), melyek alapján, interpolálva több időpontban meghatározhattam a minta legnagyobb átmérőjét.



62. ábra. A 7. minta átmérőjének növekedése a belső nyomás függvényében a felfúvódás során a felhasadást megelőző pillanatig.

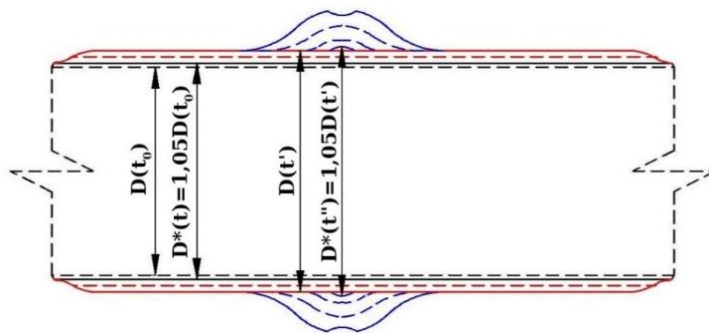
Az 62. ábra látható, hogy a felfúvódás miatt kialakuló átmérőmaximum helye eltolódik a felhasadás előtt. Ez abból adódhat, hogy a minta a két végén, egymástól mintegy 80 mm-re van rögzítve (a hegesztés és a toldó által), és ez kihat a fúvódásra. A minta először a legmelegebb helyen kezd el a legjobban tágulni. A legkönnyebben azonban a rögzítésektől távolabb, a minta közepén tudna tágulni, így a minta közepe felé tolódik a maximum. A 62. ábra szerinti adatsort 58,3 mm-nél (a legnagyobb átmérő környékén) „elmetszve” megkaptam az átmérőnövekedés lefolyását a nyomás függvényében (63. ábra).



63. ábra. A relatív átmérőváltozás a belső nyomás függvényében a 7. minta esetén.

A felfúvódó mintán szabad szemmel látható minimális átmérő-növekedését azon megfigyelés alapján definiáltam, hogy a minta alapállapotú átmérőjének 5%-os megnövekedése már a Shannon-féle mintavételezés szerinti, megfelelő számú pixelre esik. A dudorképződés definícióját hasonlóan

adtam meg, de a már megnövekedett csőátmérőhöz képest kerestem az 5%-os növekményt (64. ábra). A próbamérések esetében OpenShot képfeldolgozó program segítségével, a gyorskamerával vizsgált mintáknál pedig a kamera saját szoftverével feldolgozott videófelvételek képei alapján azonosítottam, majd meghatároztam a minták szabad szemmel éppen észrevehető, kezdeti átmérőváltozását és a hozzá tartozó nyomást, illetve a lokális fűvódás megjelenéséhez tartozó nyomást. Meghatároztam a minták felhasadási nyomását. A mérési eredményeket a 10. táblázatban foglaltam össze. Az 1. minta esetén a felfűvódás a kamera által nem látható részen kezdődött el, így azt nem vettem bele ebbe a számításba.

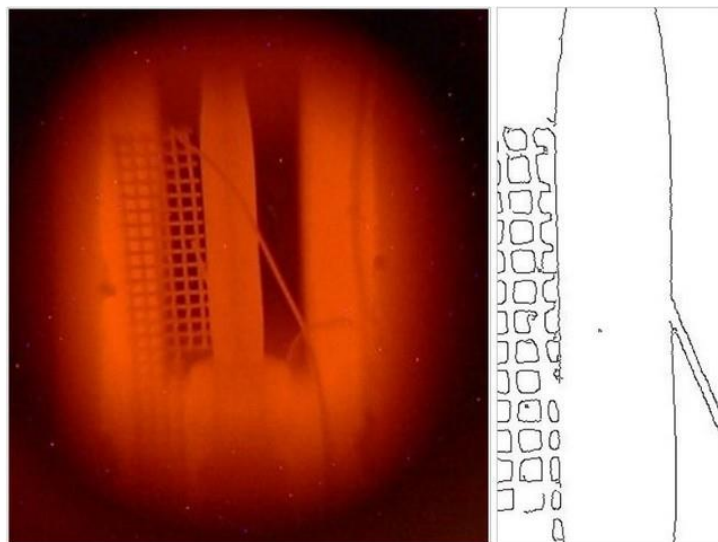


64. ábra. A minimális felfűvódás és a minimális (szabadszemmel látható) dudorképződés definíciója.

10. táblázat. A nyomás hatására felfűvódó minták átmérőjének 5%-os, illetve a lokális felfűvódás esetén látható 5% relatív átmérőváltozásához tartozó nyomások, zárójelben megadtam a felhasadási nyomáshoz viszonyított értéket. *A 7. és 9. minta E110 ötvözetből készült.

Minták	Hőmérséklet (°C)	A minimális növekedés felfűvódási nyomása (bar)	Minimális dudorkialakulási nyomás (bar)	Felhasadási nyomás (bar)
2.	755	77,28 (84,82%)	91,00 (99,89%)	91,1
3.	805	75,72 (80,46%)	93,25 (99,09%)	94,1
4.	820	67,80 (75,41%)	85,58 (95,19%)	89,9
5.	770	72,19 (78,89%)	nem látható	91,5
6.	796	65,42 (85,07%)	76,77 (99,83%)	
7.*	850	45,82 (56,84%)	75,98 (94,26%)	80,6
8.	760	95,43 (95,81%)	99,31 (96,20%)	99,6
9.*	847	62,64 (84,42%)	74,10 (99,98%)	74,2
10.	758	97,45 (94,98%)	102,3 (99,70%)	102,6
Átlag (%)		81,85±11%	98,02±1,5%	

A 65. ábra bal oldalán egy eredeti mérési videó egy képkockáját láthatjuk (800 °C, 0,4 bar/s, E110G). A képen látható az ellenoldali távcsövet tartó kemencecsonk hidegebb felületének fekete háttére, valamint az előtte elhelyezkedő, 800 °C felszíni hőmérsékletű, vörösen izzó minta, és a méretreferencia-rács képe. Az OpenShot nem volt automatizálható, ezért a mérések videófelvevételeit Free RadStudio videószerkesztő program segítségével dolgoztuk fel. Először levágtuk a képek széleit és kompenzáltuk a csövek esetleges dőlését, majd a kivágott részleteket képkockáról képkockára elemeztünk – ehhez C programot fejlesztettem. Javaslatomra a pixelekhez rendelt RGB színskála alapján színátmeneteket kerestünk a program beépített moduljai segítségével. Azokat a helyeket kerestük a felvétel képkockáin, ahol a szürkés árnyalatok (árnyékok) élesen találkoznak a vörös árnyalatokkal (fémfelületek). Ehhez megadtam a vörös színárnyalat legsötétebb és legvilágosabb határértékeit, majd az átmeneteket azzal jellemeztem, hogy ezek hány pixelen keresztül húzódnak. A minta színe a feketetest hőmérsékleti sugárzásához tartozó vörös narancssárga színnek felelt meg. A program beépített algoritmus lehetővé tette, hogy minden képkockán ugyanazzal a matematikai művelettel keressem meg a kontúrvonalakat, amelynek lényege az volt, hogy az R, a G és a B színcsatornákon belül 0-255 egész számmal jellemezhető a szín. A program a kontúrvonalakat fekete, a többi pixelt pedig fehér színnel jelenítette meg (a 65. ábra jobb oldala). A kapott kontúrvonal mintázatot videóként elmentettük, majd a Virtual TUB program segítségével ezeket a videókat egyedi képekre szedtük szét. A 32 bites képeket ASCII szöveggé konvertáltam, így az adatfájlban a pixelkoordinátákhoz rendelt 0 (fehér), vagy 255 (fekete) értéket kaptam.



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

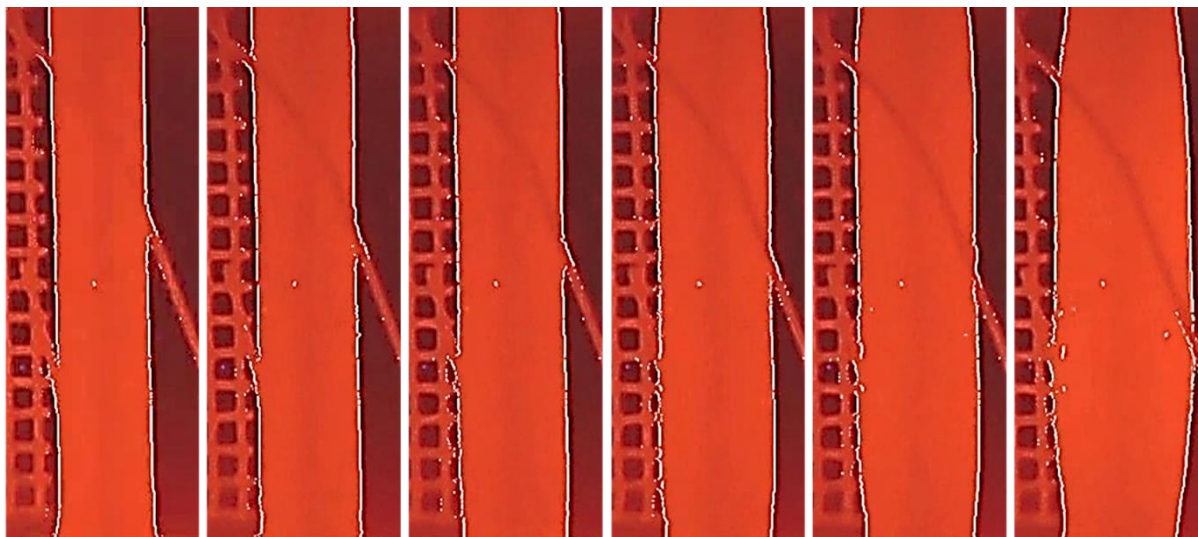
Az átmérő meghatározására egy másik, C++ programot fejlesztettem. Az algoritmus először kiírta a fekete-fehér képek fekete pixeleinek koordinátáit. Ezután középről indulva jobbra és balra is megkereste az első fekete pixelt, így megkapta a minta jobb és bal szélét. Ezután elvégezte a kapott

profil simítását, a kép zaj és a képbe belógó tárgyak (háló, termoelem, rögzítődrót) miatt kiugró pontok eliminálását. A kiugró pontok helyett az előző pontok pozíciójának az átlagát vitte tovább. Ezzel a pontok mintegy 90%-a a megfelelő helyre került, így lehetővé vált a minta átmérőjének automatizált mérése a jobb és bal oldali koordináták különbsége alapján.

A térbeli felbontás kalibrációját minden mérés esetén elvégeztem. Azokon a képeken, ahol jól azonosítható a kalibrációs rács, ellenőrzésképpen elvégeztem a rács alapján a kalibrálást, azonban a legtöbb mérés esetében ez nem állt rendelkezésre, így általánosan alkalmazható, új módszert dolgoztam ki. A cső kezdeti átmérőjét 9,10 mm-nek feltételezve a kezdeti állapotot rögzítő képen mért átmérőből számoltam ki a képek valós, térbeli felbontását.

A képkockák videóbeli sorszámához mérési időt kellett rendelnünk. Ehhez össze kellett hangolnunk a mért nyomás adatokat és a mintáról készült videókat, melyek rögzítése nem a mérés kezdetével együtt indultak. A tükörreflexes fényképezőgép 60 full-HD (1920×1080 pixel) felvételt készített másodpercenként. Mivel a minták felhasadása egy nagyon gyors és egyértelműen látszó mérési pont volt, ami mind a rögzített nyomásadatokon, mind a videókon jól látható volt, így ettől a ponttól számoltunk vissza a mérés kezdetéig. Ez alapján minden képhez mérési időt és mért nyomást tudtunk rendelni.

Ellenőrzésképpen visszarajzoltuk az eredeti videóra a feldolgozás eredményeként kapott minta kontúrokat (66. ábra). A fehér vonalak alapján megállapítható, hogy az algoritmus helyesen állapította meg a minta határvonalait.



66. ábra. Egy mérésről (800 °C, 0,4 bar/s) készült videóból 3 s-onként kivett képek a képfeldolgozás során kapott minta körvonalakkal. A képek a felfűvődés folyamatát mutatják.

A videómérés célja az volt, hogy megmérjük a felfűvődő minta hossz tengelye mentén az összes átmérő időbeli változását. Az automatizált átmérőmérés mellett egy mintának a videófelvételén manuálisan is meghatároztam a minta átmérőjét, különböző időpontokban. A minta

átmérőváltozása a felfűvódás során eddig ismeretlen volt, illetve csak numerikus modellek segítségével lehetett megjósolni a görbe lefutását.

A videók elemzése megerősítette, hogy a minták átmérője kezdetben a cső teljes hosszában, egyenletesen növekszik, majd a legmelegebb részen – rendszerint a minta közepén vagy egy hibahelynél – a növekedés hirtelen felgyorsul és aszimmetrikussá válik. A felhasadás előtti néhány másodpercben, a felhasadási nyomás 95-97%-ánál, az átmérő növekedése hirtelen felgyorsul, és a felhasadás pillanata előtt akár 80-100%-kal megnövekszik a minta átmérője.

4.6 A gyorskamerás mérés eredményei

Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézettel való együttműködésben lehetőségünk adódott arra, hogy a felfűvódást és a felhasadást nagy időfelbontással tanulmányozhassuk egy gyorskamera segítségével.

A gyorskamerás mérések 800 °C-on, 0,5 bar/s nyomásnövekedés mellett történtek, a minták előkezelése nélkül.

A kemence kémlelőnyílásában elhelyezett leképező rendszer optikai tengelyébe elhelyeztünk egy Photron SA-5 típusú monokróm kamerát, amelynek a cserélhető, Nikon F-bajonettes objektív lencséjét végtelenre akkomodáltuk. A képkicsatoló távcső mozgatásával elértük, hogy a minta a teljes látómezőt kitöltse. Ezt követően a távcső okulárkihuzatának mozgatásával élesre állítottuk a képet. A kamera saját vezérlőprogramja segítségével meghatároztuk, hogy a mintáról érkező fény intenzitása melyik pozícióban a legnagyobb. Ezek után az objektív beépített blendéjének állításával beállítottuk a kívánt fényerőt úgy, hogy a beállított, blendézett kamera objektív belépő pupillájának átmérője megfeleljen a távcső kilépő pupillájának. Ezzel csökkentettük a szórt fény beszűrődését.

A fókuszálást követően a kameravezérlő szoftver (Photron FastCam Viewer) segítségével levágtuk a kép szélén lévő fölösleges pixeleket (a látómezőn kívül eső háttér). A kapott képen hosszirányban kihasználtuk az érzékelő chip nagy részét, ezzel megtartottuk a nagy térbeli felbontást. A chip nem használt részének levágásával jelentősen tudtuk növelni a másodpercenkénti expozíciók számát, ugyanis a háttér ki nem olvasásával nem kellett további időt tölteni. A legkisebb chip-szegmens kiolvasásakor százezer képet készíthettünk másodpercenként. A kamera ennél is rövidebb expozíciós időt is képes lett volna kezelni, de a felhevített, izzó cirkónium fűtőelem pálcá nem volt elég fényes ahhoz, hogy láthassuk az alakváltozásait a felvételen. A kemencetér aljára szerelt 200 W-os izzó a minta körüli fényviszonyokat nem javította jelentősen, bár a hagyományos kamerával készített felvételek kontrasztarányát javította. A jellemző gyorskamera-beállításokat a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat. A gyorskamera optikai és a felvételt jellemző beállításai. Az X és Y pixel a rögzített kép méretét jelöli a levágások után.

Minta sorszáma	Expozíciós idő (s)	X pixel	Y pixel	Maximális felvételi idő (s)	Fókusz távolság (mm)	Fényerősség (mm/mm)
5.	1/2000	640	984	3,7	180	2,8
6.	1/10000	640	984	2,7	180	2,8
7.	1/30000	320	680	2,1	180	2,8
8.	1/100000	128	296	1,2	50	1,8
9.	1/100000	128	296	1,2	50	1,8
10.	1/25000	384	680	2,4	180	2,8

A kamera többféle üzemmódban képes nagy sebességű felvételek készítésére. Méréseink során a post-trigger leállítási módot választottuk. Ebben az üzemmódban a kamera a felvételeket a belső memóriában folyamatosan rögzíti, majd megtelt memória esetén a soron következő adatot a memóriairás sorrendjét megtartva a memóriacímzés elején folytatja és előrefelé haladva felülírja a korábbi adatot. A leállításkor a kiolvasás visszafelé irányban, a legutolsóként beírt memóriaegység címéig történik. A kamera megállítása után tehát a legutolsó néhány másodpercnyi felvétel marad meg. A több gigabyte méretű memória tartalmát a Photron FastCam Viewer program segítségével lapozhattuk.

Először kiválasztottuk a felhasadást megelőző és az azt követő pártized másodpercig tartó felvételrész, majd ezt tömörítés nélkül, úgynevezett multipage-tiff formában archiváltuk.

12. táblázat. A gyorskamerás mérések adatai.

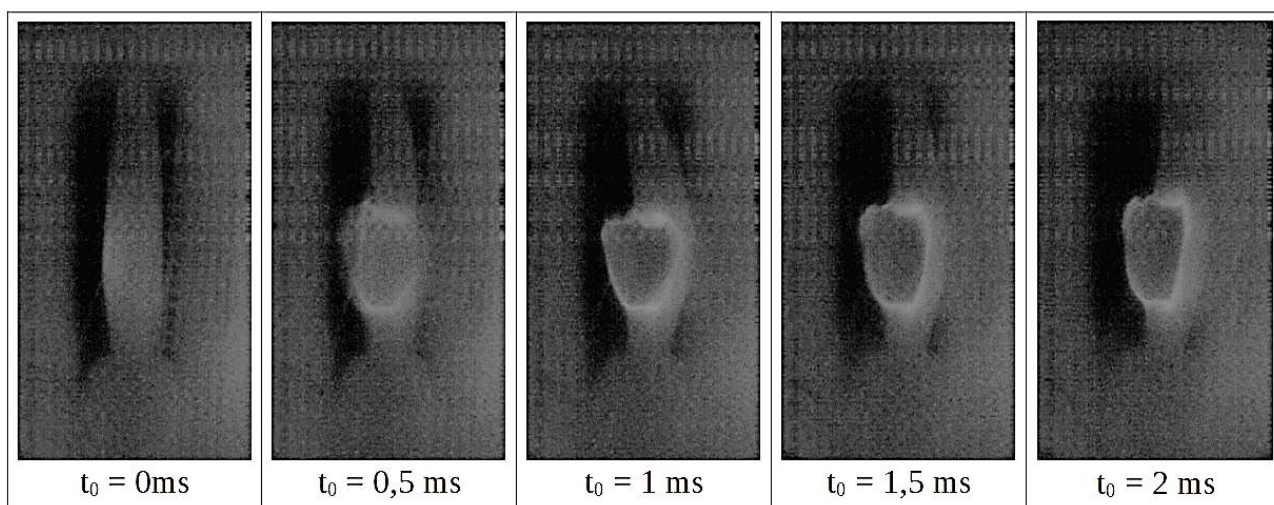
Minta sorszáma	Minta anyaga	Mintahossz (mm)	Nyomás-növelés (bar/s)	Hőmérséklet (°C)	Felhasadási nyomás (bar)
5.	E110G	85	0,48	770	91,5
6.	E110G	85	0,38	796	76,9
7.	E110	85	0,49	850	80,6
8.	E110G	85	0,48	760	99,6
9.	E110	85	0,46	847	74,2
10.	E110G	85	0,37	758	102,6

Csak a felhasadást és az azt követő első mintalengés képét mentettünk el, mivel a felfúvódás folyamata a HD videó alapján visszakövethető, lassabb folyamat, melyet gyorskamerával rögzítve nem jutunk új információhoz. A program segítségével közvetlenül avi formátumú tömörített videókat is tudunk készíteni, a rögzített képeket felhasználva, tetszőleges visszajátszási sebességgel.

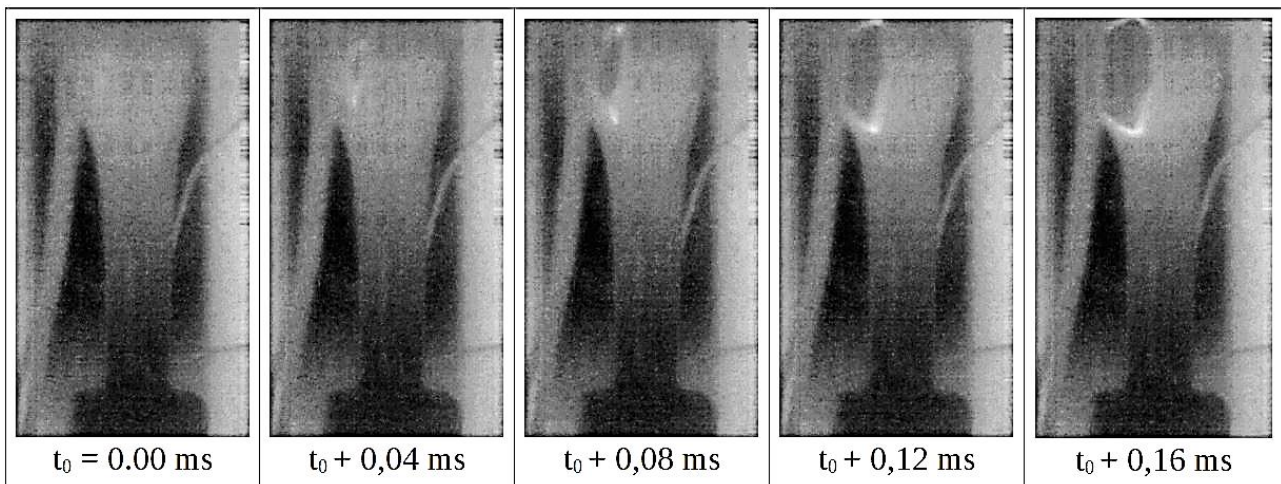
A mérés során kisebb és nagyobb időfelbontású felvételeket is készítettünk. A kisebb időfelbontású felvételeken jól látszik, hogy a kitóduló gáz hatására a minta körülbelül 30° -ot elgörbült, de azonnal rugalmasan vissza is nyerte a felhasadás előtti alakját. A felhasadás helyén az argon olyan rövid idő alatt és olyan sebességgel tódult ki a cirkónium csőből, amelynek hatására a minta közepe rakétaszerűen elmozdult, miközben a csővégek tehetetlenségüknél fogva ezt ilyen rövid idő alatt képtelenek lekövetni. Az 5. mintáról készült 1/2000 másodperces expozíciós idejű felvételeket elemezve megfigyeltem, hogy a minta felső felfüggesztési pont (mely a kép alján van a fordított állású miatt) körüli lengése gyorsan csillapodott (67. ábra). Jól látható a rugalmas kihajlás, mely 2 ms alatt eltűnik. A merev felfüggesztés miatt a lengés három-négy perióduson belül, mintegy 5 ms alatt megállt. A kissé hidegebb, emiatt nagyobb nyomásértéknél felhasadó 8. számú minta esetén az erőteljes kihajlás hatására a minta 30° -ban rugalmatlanul elhajlott.

A 67. ábrason az első és második kép összevetésekor észrevettem, hogy 1/2000 másodperc nem volt elegendő idő ahhoz, hogy magát a cső felrepedését láthassuk. Ez azt jelenti, hogy az 5. minta esetén a felhasadás teljes folyamata kevesebb, mint 0,5 ms alatt megtörtént. 25000 kép/másodperc felvételi sebesség azonban már képes megörökíteni a repedés felnyílásának folyamatát: a 10. számú minta felhasadása során éppen ezt láthatjuk 68. ábra sorozatán

A többi gyorskamerával készített felvételen a felhasadás nem látszott, mert a minták látóiránnyal ellenkezőleg hasadtak fel.

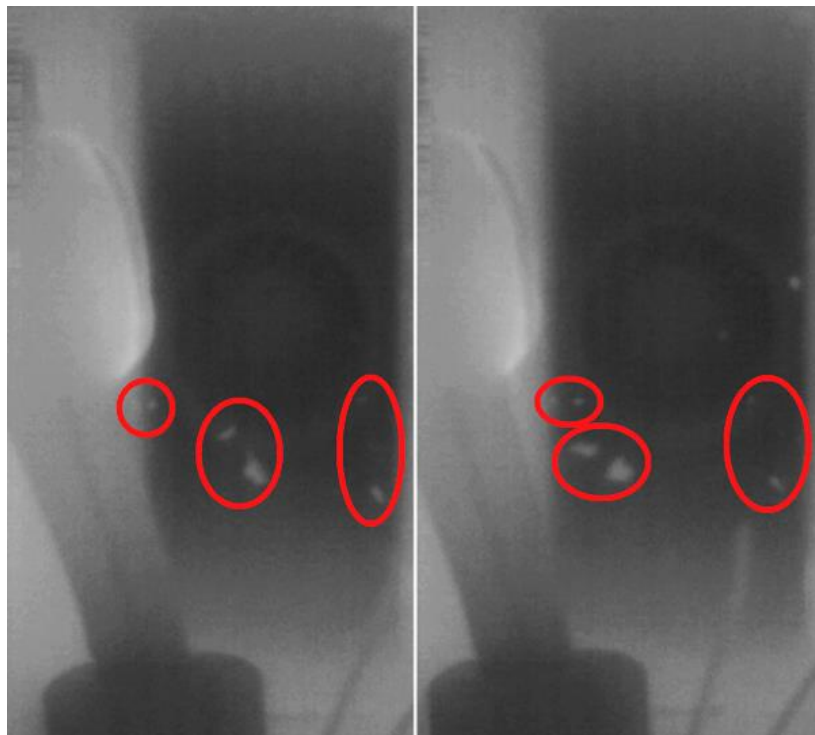


67. ábra. Az 5. számú minta 1/2000 expozíciós idejű felvétele, a felhasadás előtti és az azt követő képkockák.



68. ábra. A 10. minta felhasadásának folyamata 1/25000 s expozíciós idejű képeken.

Néhány felvételen látható volt, hogy a felhasadás során apró darabok törnek le a mintából. Ezeket a darabokat azonosítottam, és a 8. minta mérését mutató 69. ábrán láthatók. A lepattogzott törmelékdarabokat piros ellipszissel jelöltem meg a (nem közvetlenül) egymást követő felvételeken. A képpáron a minta jobbról balra történő mozgása mellett a letöredezett darabok hasonlóan jobbról balra történő, sokkal gyorsabb elmozdulását is érzékelhetjük. A darabok trajektóriájából kikövetkeztethető volt, hogy azok már a kemence faláról visszapattanva repültek be a képbe. A darabok méretét igen változónak találtam, mennyiségét pontosan nem tudtam meghatározni. Jól látszik, hogy a legnagyobb darabok fél milliméteresek, illetve tizedmilliméteresek. A szemmel azonosítható legapróbbak tized akkorák.



69. ábra. A 8. minta mérésének pillanatképei (1/100000 s expozíciós idő).

Az Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumában a kollégáim korábban is hajtottak végre atomerőművi fűtőelem felhasadási nyomás-méréseket [53, 79, 82, 83, 84], legtöbbször összekapcsolva a szekunder hidridizációs méréssel, azonban a felfűvódás során a burkolatcső mérhető átmérőváltozásának kinetikájáról nem voltak ismeretek. A magas hőmérsékletű burkolat átmérője belső nagy nyomású argon terhelése hatására teljes hosszában lassan növekedni kezd, majd a felhasadási nyomás 75%-át követően lokális felfűvódás kezdődik. A lokálisan felfűvódó régióban az átmérőváltozás sebessége drasztikusan megnövekszik. Ezalatt a minta hengersizmetriája megváltozik, és a minta tengelye a lokálisan felfűvódott régióban 5°-ot elgörbül.

Az atomerőművi burkolatcsövek felfűvódásának és felhasadásának optikai megfigyelése során sikerült egy többtízezer képkocka felvételére alkalmas gyorskamerát a mérőberendezéshez illeszteni. A gyorskamerás felvételekből megmértem és becslést tudtam adni a kialakuló repedés terjedésének időskálájáról, és a mintáról lepattogzott darabokat fedeztem fel.

4.7 A felhasadási nyomásmérések eredményei

Az EK-ban mind az E110, mind az E110G burkolatokkal történtek hasonló felhasadási kísérletek [53, 65, 82, 85], 700-1200 °C hőmérséklet-tartományban és 0,007–6 bar/s közötti nyomásnövelési sebességgel. A minták egy részét előzetes vízgőzös oxidációnak és hőkezelésnek tették ki a laboratórium szakemberei. Az újabb mérések tervezésekor, az alkalmazott nyomásnövelési sebességek megállapításánál az előző években végzett mérésekre hagyatkoztunk, hogy a kapott eredmények összehasonlíthatók legyenek a régi mérésekkel.

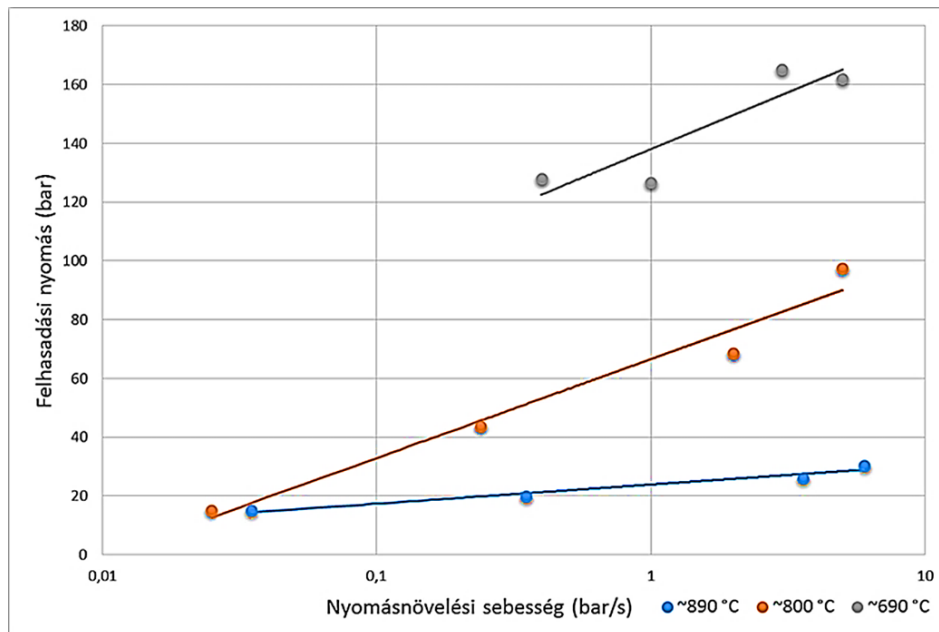
A FRAPTRAN kód új felhasadási modelljének illesztéséhez további mérési pontokra volt szükség. A következő kísérleti mátrixot vettük fel az újabb mérésekhez: 700 °C, 800 °C és 900 °C hőmérsékleten, 0,03 bar/s, 0,3 bar/s, 1,5 bar/s, 3 bar/s és 6 bar/s nyomásnövelés mellett terveztünk méréseket végezni, az ettől eltérő beállítások esetén a korábbi mérésekhez igazodtunk. A nyomásnövelési sebességet a beállított értékhez képest $\pm 1\%$ -os pontossággal tudtuk tartani a mérések alatt. Az újabb méréseket csak E110 burkolat csövekkel végeztük, mivel a korábbi felhasadásos mérések nem jeleztek különbséget az E110 és E110G ötvözetek között.

A mintákat 85 mm hosszúságúnak választottuk. A felhasadási nyomás a minták végeinek merev hegesztése miatt kis mértékben attól is függ, hogy milyen hosszú mintát vizsgálunk. Egy 2010-ben, 50 mm-es E110 mintával végzett mérésben 800 °C-on, 0,56 bar/s nyomásnövelés esetén a minta 71,3 bar nyomáson hasadt fel [85], míg a mi mérésünkben a 802 °C-on és 0,4 bar/s nyomásnövelés mellett 68,6 bar-on. A korábbi 50 mm-es és a 300 mm-es minták eredményei alapján mondhatjuk, hogy az utóbbi két évben mért adatok beleillenek a Kurcsatov Intézet és az AEKI által mért értékek közé [63]. Az AEKI és EK mérések eredményeit a 13. táblázat tartalmazza. A mérések során kapott adatokat az MTA EK-ban a FRAPTRAN kódfejlesztések során felhasználtuk [63].

13. táblázat. Az E110 minták mérésének eredményei.

Minta	Hőmérséklet (°C)	Nyomásnövelés (bar/s)	Felhasadási nyomás (bar)
burst-1	692	5	165,30
burst-2	692	3	169,60
burst-3	672	1	140,00
burst-4	684	0,4	129,30
burst-5	792	5	121,50
burst-6	780	2	99,70
burst-7	796	2	98,30
burst-8	802	0,4	68,60
burst-9	798	2,5	44,10
burst-10	890	6	30,50
burst-11	885	3,6	26,20
burst-12	895	0,35	19,90
burst-13	890	3,5	15,20

Az adatok alapján további összefüggéseket állapítottunk meg a megadott geometriához tartozó felhasadási nyomás nagyságára vonatkozóan. Az azonos hőmérsékleteken, különböző nyomásnövelés mellett mért felhasadási nyomások a nyomásnövelési ráta logaritmusával arányosan nőnek (70. ábra). A mérések kiértékelése alapján azt látjuk, hogy a felhasadás jelentősen függ a hőmérséklettől, és a nyomásnövelési sebességtől.

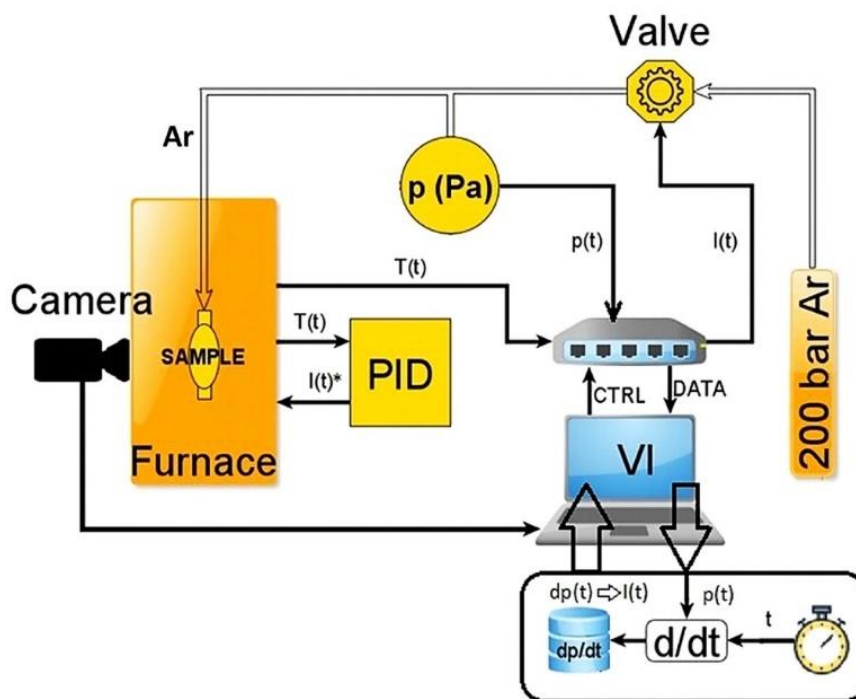


70. ábra. A mért felhasadási nyomás a hőmérséklet és a nyomásnövelés függvényében.

4.8 Hőkamerás mérés

Ahogy az a 4.5 fejezetben részletesen bemutatottam, az optikai mérés során megfigyelhető volt, hogy a felfűvődő fűtőelem burkolata a felhasadás előtt felfényesedik. Ezt a felfényesedést szerettem volna bebizonyítani a doktori kutatásaim utolsó szakaszában. A bizonyítást nagy (350 fps) időfelbontású, infravörös tartományban működő kamerával oldottam meg. A hőkamerás mérés során igyekeztünk több mintát a mérőberendezésbe helyezni. Az optikai vizsgálatok alapján a legnagyobb mértékű felfűvődés és a legnagyobb méretű lokális átmérőnövekedés 800 °C-on, 0,5 bar/s nyomásnövekedés mellett volt tapasztalható. A legtöbb optikai mérés is hasonló paraméterek mellett készült. A hűvösebb mintákról kevés foton érkezik, képük zajos vagy értékelhetetlen, a forróbb minták pedig alig növekednek, mielőtt felhasadnak.

A hőkamerás mérés során, az előzőekhez hasonló elrendezésben, izotermikus minta belső nyomásnövekedésével modelleztük a LOCA körülményeket. A mérés során a kvarclencsét eltávolítottuk a kemence oldalán található kémlelőnyílásból, ezzel lényegesen megnöveltük az infravörös kamerába jutó fény erősségét. A kemence hőmérsékletét a kemence saját elektronikája szabályozta, a nyomásnövekedés egyenletességét és a mérési adatokat (hőmérséklet, nyomás, nyomásnövekedési ráta) a korábban kifejlesztett LabView virtuális műszerrel biztosítottuk és regisztráltuk. Az egyetlen változást a Measurement Computer 2408 digitális átalakító modul cseréje jelentette, ugyanattól a gyártótól rendeltünk egy MC-2408-2AO modult. A hőkamerás mérés szempontjából ez a változtatás technikailag semmilyen átalakítást nem igényelt. A 71. ábra mutatja a méréshez összeállított berendezés sémáját.



71. ábra. A hőkamerás felhasadás mérés sematikus ábrája.

A méréshez E110G ötvözetből készített 85 mm hosszú mintákat használtunk, amelyet 10 mm külső átmérőjű hegesztett acél tömítógallér közbeiktatásával, roppantógyűrűs hidraulika csatlakozóval erősítettünk a nyomásrendszer csőhálózatára. Kettő darab K típusú hőelemet rögzítettünk a minták felszínére. A mintát nagy nyomású, tiszta argonnal terheltük. A mérés menete megegyezett az optikai megfigyelés során végrehajtott méréssel, azonban most a kamera a közeli infravörös tartományban működött. A kemence másik oldalán elhelyezkedő optikai kicsatoló táveső kimeneti oldalán hagyományos (DSLR HighRES, 60 fps) kamerát használtunk.

Az infravörös kamera egy InfraTec Image IR-5300 HP típusú, számítógép vezérelt hőkamera volt. A kamera germánium lencsége antireflexiós bevonattal volt ellátva. Az objektív effektív 570 ± 10 mm volt, f/3-as fényerővel. Ahhoz, hogy minél nagyobb látómezőt töltsön ki a kemence belsejének képe, 300 mm tárgytávolságra helyeztük el a kamera lencséjét. Az optikai paraméterekből adódott, hogy a mélységélesség 10 mm-nél lényegesen nagyobb volt, így a teljes mintát ez az optika is képes volt egészében élesen leképezni. A kamera spektrális érzékenységét jellemzi, hogy kvantumhatásfoka 97% feletti volt a 2,0-5,7 mikron (közepes – MWIR) infravörös tartományban. A kamera detektora Peltier-hűtésű, QWIP (InSn infravörös detektor) volt. Használatát tekintve hasonlít a hagyományos CMOS detektoros kamerákhoz. A detektor felbontása 640×512 pixel volt.

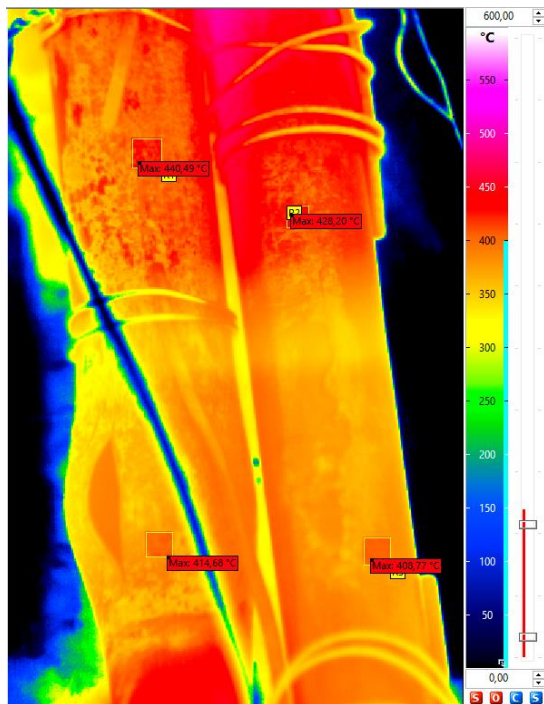
A kamera on-chip sötétáram korrekciót hajtott végre a mérés során, így a képeket utólag nem kellett sötétáram korrekcióval módosítani. A sötétáram nagysága a detektor felszíni hőmérsékletétől függ, amely hőmérséklet a detektorra eső infravörös fotonoktól változik. A beépített korrekciós mérés megkönnyítette a mérés végrehajtását. A detektor 16 bites A/D konverterrel volt felszerelve, ezzel másodpercenként 350 képkockát volt képes feldolgozni és a számítógépre átküldeni egy optikai szálon keresztül. Ezzel együtt is csak 3 perc hosszúságú videófelvételt készíthettünk a kamerával. A kamera 800 °C-on 100 mK pontosságú hőmérsékletmérésre alkalmas.

A kamera felvételeket az InfraTec által fejlesztett IRBIS-3 [86] képfeldolgozó programmal szűrtük, zajmentesítettük, elemeztük, és ennek segítségével archiváltuk is.

Miután az első mérés során azt tapasztaltuk, hogy a kemencéből apró törmelékek repülnek ki és csapódnak a kamera lencséjébe, egy polietilén fóliával védtük meg a kamerát. Ennek a polietilénnek megmértük az infravörös áteresztőképességét. A kalibrációhoz K típusú hőelemmel megmértük a burkolatső minta felszíni hőmérsékletét. A lefényképezett minta felszínének hőképét pedig az emissziós koefficiens beállításával kalibráltuk úgy, hogy a hőmérő mérési pontján megegyezzen az infravörös kamera által mutatott érték a hőelem által mutatott értékkel. Ez a fajta beállítás a differenciális hőméréshez elegendő is volt. A forró folt relatív hőmérséklet-emelkedésének kiméréséhez ezt használtuk. A kalibráció további részében a 800 °C-os mintát kivettük a kemencéből és a hűlő burkolatsövet videóztuk a hőkamerával. A hőkamera látómezejét félig kitakartuk a lencsevédő fóliával (72. ábra). A felhasadt minta balra (5. számú minta), az alapállapotú minta jobbra látható. A kitakart és a nem kitakart mintarész határán egy vékony fém dróttal megjelöltük a

határvonalat. A fém drót képe nem látható a felvételen, de az a változás, amit okoz a fólia, nyilvánvalóvá és a drót okozta eltérés mentén hangsúlyossá válik a felvételen.

A hűlő minta ezen a felvételen 400 °C hőmérsékletű, azonban a bal oldali, felhasadt minta felszínén apró hőmérséklet-eltérések mutatkoznak az elméletileg egyenletes felszínen. Ennek okozója az oxid és a fém eltérő emissziós koefficiense. A jobb oldali, még el nem oxidált mintán ez a foltos egyenetlenség nem jelent meg.



72. ábra. A kalibráláshoz használt mintapár infravörös képe.

A mérőprogram lehetőséget adott arra, hogy definiáljunk felületeket a felvételen, ahol beállítástól függően vagy a pixelenkénti hőmérsékletek átlagát vagy a maximális értéket jelzi ki egy szövegmezőbe. A 72. ábrán négy kijelölt területet láthatunk. Az oxidált mintán kettőt: egyet a fóliával kitakart területen, egyet pedig a fóliával el nem takart mintaszakaszon, és hasonlóan kettőt jelöltünk ki a nem oxidált fém felszínén. A négy hőmérsékletértéket összevetve egyértelműen látható egy 30 °C nagyságú különbség, függetlenül a fém állapotától. A különbség a fóliázott és nem fóliázott szakaszok között mutatkozik, amely a fólia hatása, és ezzel kiszámítottuk, hogy a fólia áteresztőképessége 80% körüli ezen hullámhosszon.

A fém és az oxidréteg a felszínen különböző mennyiségű infravörös fotont bocsát ki azonos hőmérsékleten, amelyet az emissziós koefficiensük különbségével magyarázhatunk. Az emissziós koefficiens meghatározására felkértük a kameragyártó cég laboratóriumát, határozza meg a különbséget saját laboreszközeivel, mert a laboratóriumunk nem rendelkezett megfelelő eszközökkel a két anyagtulajdonság meghatározására. Az általunk elvégzett kalibrációs mérésben látható egyenetlen felszínfotó alapján nyilvánvalóvá vált, hogy az emissziós koefficiensük különbsége nagy nem lehet, és az is világossá vált, hogy a különbség nem elhanyagolható.



73. ábra. Az InfraTec laboratóriumában végzett kalibrációs berendezés.

A kalibrációhoz egy elektromosan fűtött fém lapot használtak, a felhasadt mintákból pedig egy kevésbé oxidált (73. ábra, bal oldali minta) és egy erősen oxidált (73. ábra, jobb oldali minta) felszínét videózták az infravörös kamerával és a saját, kalibrált hőmérő kamerájukkal. A két kamera adatait matematikailag összevetve a 14. táblázatban található eredményeket megkaptuk a kamera gyártójától.

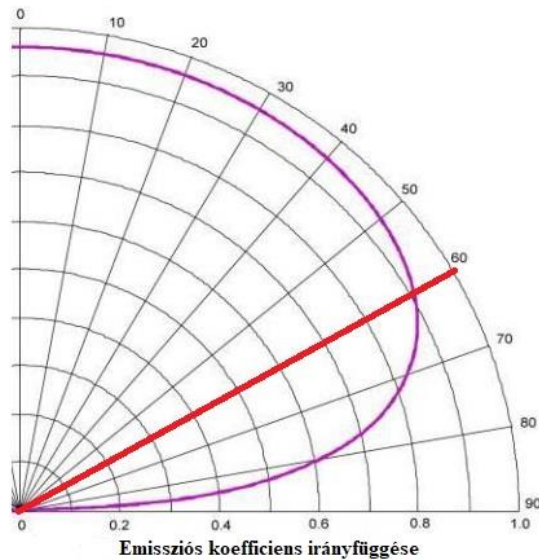
A táblázat adatait elemezve az oxidált és a fémes felületű minta emissziós koeficiensei igen közel állnak egymáshoz, kicsit alacsonyabb értéket mutat az oxidált minta. Ez az enyhe emissziós koeficiens-különbség okozza, hogy a 73. ábra jobb oldalán, a hőkamera felvételen, a jobb oldali, oxidált minta „zöldebb”, azaz melegebbnek mutatkozik. A mérés beállításakor azonban a hőmérsékletek egyformák voltak. A minták fémes csillogását és a csillogás okozta hibát megpróbálták szénporos bevonattal kiküszöbölni. Ezen a bevonatos felületen mérték az úgynevezett közvetett adatokat, a minta kezeletlen részén határozták meg a közvetlen értékeket.

14. táblázat. Az emissziós koeficiens értéke az InfraTec mérése alapján.

Beállítás	Fém felszín		Oxidált felszín	
	mért ϵ (közvetlen)	mért ϵ (közvetett)	mért ϵ (közvetlen)	mért ϵ (közvetett)
Emisszió	0,91-0,98	0,89-0,94	0,74-0,93	0,8-0,93

A kalibrálással kapott emissziós koeficiens értéket beállítva a képfeldolgozó programban, meg tudtuk mérni a kemencébe behelyezett minták hőmérsékletét. A megadott emissziós koeficiens tartományok vizsgálatával meg tudtuk adni, hogy a 0,7-hez tartozó hőmérés 25% pontatlanságot eredményez, így a másik végletet fogadtuk el. A legjobb egyezés a hőelemek méréseivel a $\epsilon = 0,89$ érték esetén értük el. Ezt használtuk a forró folt hőmérsékletnek meghatározásánál.

A 74. ábra mutatja, hogy a hengeres test felszínéről egy irányban sugárzó fotonmennyiség milyen eloszlásban érkezik a detektorba. Ha definiálunk egy azimutális szöget, amely a mérendő felület normálisvektora és a detektor iránya közé esik, akkor a legkisebb hibával a detektor iránytól mért maximálisan 60 fokos szögig mérhetünk (74. ábra: piros vonal). Ezt a közelítést alkalmaztuk a mérésünk során, tehát a hőmérést mindig a henger középvonala közelében végeztük.



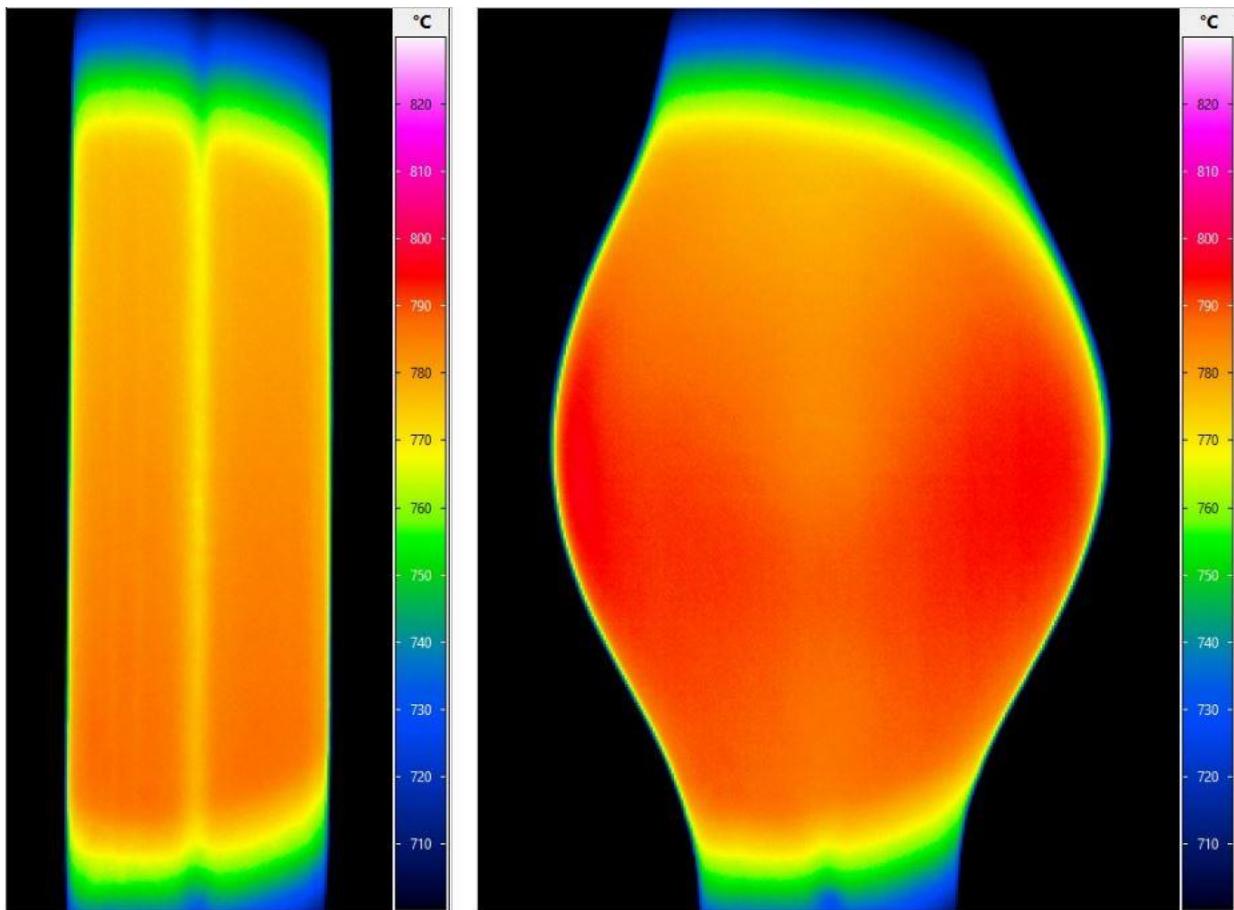
74. ábra. Egy hengeres infravörös sugárzó test emissziós együtthatójának változása az azimutális szög függvényében. Az ϵ tengely a kamera irányába mutat [87].

A forró folt megjelenése a kamera irányában véletlenszerű, ezért nyolc mintát használtunk fel a méréssorozatban.

15. táblázat. Az infravörös mérések adatai.

Minta	Nyomásnövekedési ráta (bar/s)	Hőmérséklet (°C)	Felhasadási nyomás (bar)
Teszt 1	0,42	790	65,10
Teszt 2	0,48	795	54,50
Minta 1	0,49	800	65,70
Minta 2	0,53	800	80,70
Minta 3	0,53	795	72,20
Minta 4	2,18	860	56,50
Minta 5	1,00	827	39,60
Minta 6	0,91	853	46,60

A 75. ábrán az 1. számú minta infravörös kameraképe látható a mérés elején, és a felhasadást megelőző képkockán. A mérés szempontjából azonban ez a kép nem jelentős, de azt mutatja, hogy a kalibráció után is marad magasabb hőmérsékletű régió, épp ott, ahol a legnagyobb az átmérő megváltozása. Ezen a felvételen a képmező közepén egy halvány csík látható. Ez a laboratórium 20 °C-os hőmérsékleti zajháttér sugárzásának a mintáról visszavert képe. A felvétel alsó és felső szélén a kémlelőnyílás fémrészein szóródó infravörös kép hibája látható, amiből feltételezhető volt, hogy a használható tartomány a kép sugarának kétharmadán belül található.



75. ábra. Az első infravörös mérés (Teszt 1): balra a minta alapállapotban, jobbra a felhasadás pillanata előtt.

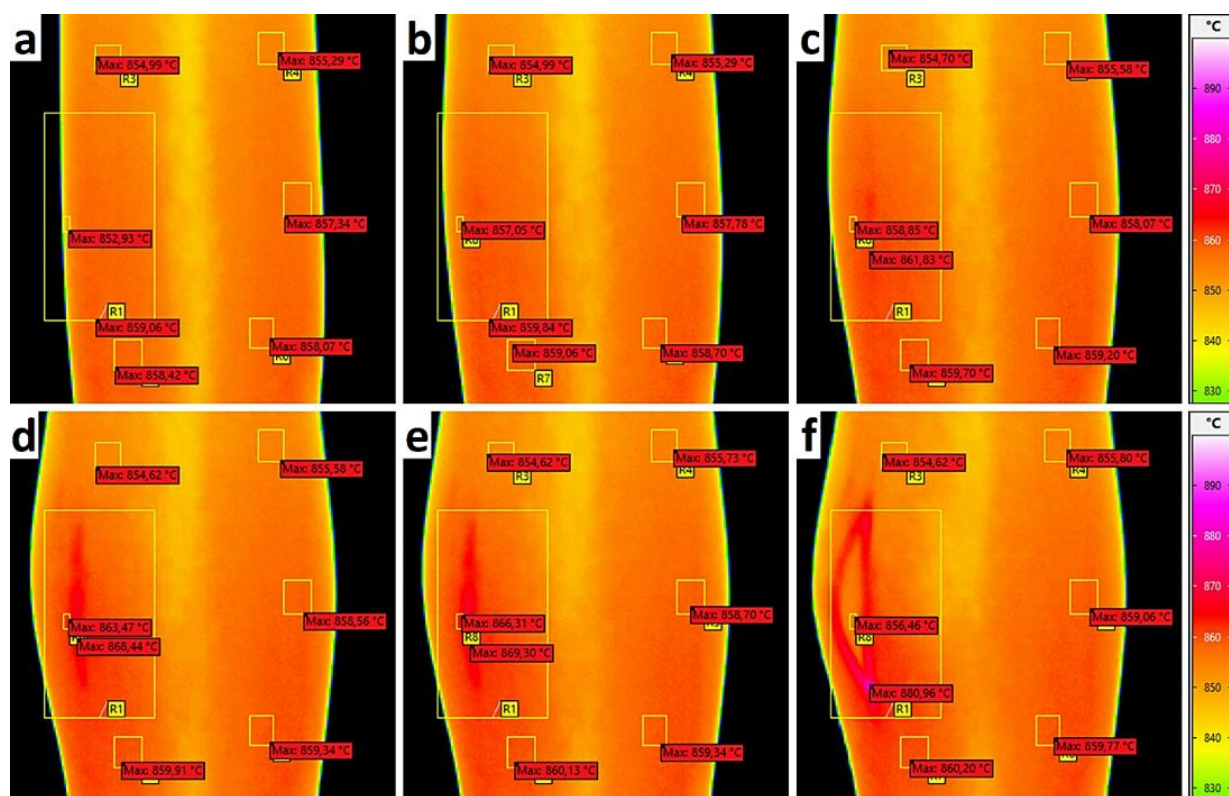
A 76. ábrán egy sikeres infravörös felvételsorozat látható, amelyen a minta felhasadása nyomon követhető volt. A felvételen, amelyen a 6. számú minta felhasadása látható, könnyen azonosítható a megjelenő forró folt, és a forró folt helyén a repedés kialakulása. A felhasadt minta belsejébe láthatunk, amelyről feltételezhető, hogy bizonyosan a hőelem hőmérsékletén van, és még nem volt ideje oxidálódni, tehát bizonyosan tiszta fém felületet látunk. A képsorozaton a felhasadási régiótól távol eső tartományokban referencia hőmérsékletmérést végeztünk, a kijelölt mérési tartományokba eső képpontok hőmérsékletének átlagával, illetve a felhasadás tartományát kijelölve megkerestük a legmelegebb pixelt képkockáról képkockára. A két adatot ábráztuk időben. A 77.

ábrán látható, hogy a felhasadás helyén a hőmérséklet minimum 18 °C-kal emelkedett, de az azimutális szöge miatt feltételezhetjük, hogy ez a hőmérséklet-emelkedés kicsit több.

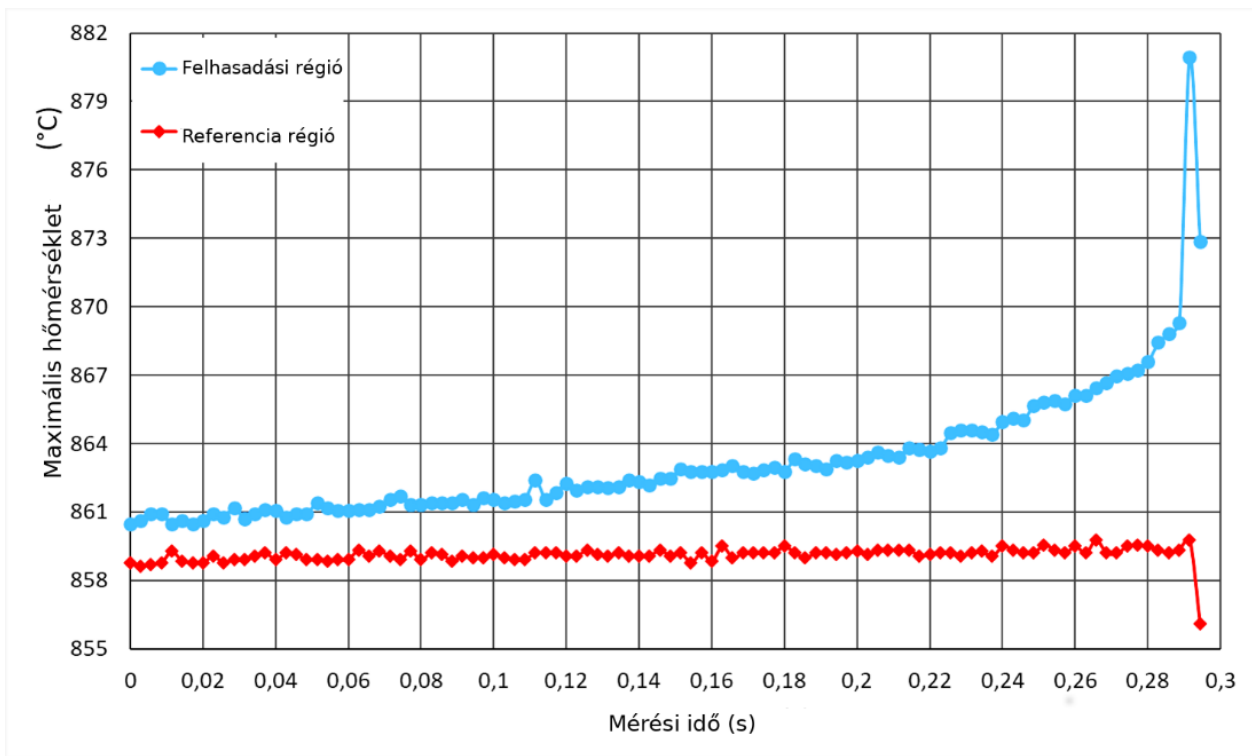
A mérés képsorozatán jól látható, hogy az R1 mérési régió legmagasabb hőmérsékletű pontja a repedés csúcán található, amely alátámasztja, hogy a hőmérséklet-emelkedés összefüggésben van a lezajló mechanikai változásokkal és a tönkremeneteli folyamatokkal.

16. táblázat. Az infravörös kamera mérés eredményeinek összefoglalása.

Minta	1	2	3	4	5	6
Hőelem hőmérséklet (°C)	800	800	795	860	827	853
IR kamera hőmérséklet (°C)	805,2	808,1	801,2	865,0	828,2	855,5
Maximum hőmérséklet (°C)	810,9	836,4	813,6	876,0	832,2	881,0
A felhasadás azimutja (°)	90	80	230	110	180	60



76. ábra. Az infravörös kamera irányához közel, nagyjából 50 fokos azimuton felhasadt minta képe.



77. ábra. A piros görbe a referencia régióban mért átlaghőmérsékletet, a kék görbe a felhasadás területén mért legmagasabb hőmérséklet mutatja, az időben.

5. Összegzés

A dolgozatban bemutattam az orosz gyártású, nyomottvizes atomerőművi reaktorokban használatos fűtőelem-burkolatok mechanikai viselkedését két különböző időskálán fellépő erők hatására.

- Bemutattam a fűtőelem burkolatcsőre, a reaktor teljesítményének növelése során ható terhelés következtében – jellemzően néhány perc alatt – létrejövő képlékeny alakváltozás folyamatát. Az EK laboratóriumában a fűtőelem-burkolat csövek mandrel mérésével radiális irányú, felületi terheléssel vizsgáltuk a tablettaburkolat közötti mechanikai kölcsönhatást. Numerikus, végelelemes modellt fejlesztettem ki annak érdekében, hogy vizsgálhassuk a mandrel mérés megvalósíthatóságát, majd a mandrel mérésben kapott eredményeket számítással visszacapjuk. Javasoltam egy képlékeny alakváltozást leíró matematikai formulát, amely egy egyszerű, egy paraméteres transzformáció, lehetővé téve ezzel, hogy a burkolat anyagába oldódott hidrogén képlékenységre gyakorolt hatását is figyelembe vegyük.
- A dolgozatban bemutattam a fűtőelem-burkolat üzemzavari körülmények között várható felfűvódásának és felhasadásának vizsgálatára létrehozott kísérleti berendezés tervezését és üzembe helyezését. Megterveztem és megépítettem egy 1000 °C-on működő képkicsatoló optikát, amellyel megfigyelhető volt a felfűvódás kinetikája és a felhasadás során látható volt repedésterjedés. Illusztráltam a cirkónium ötvözetből készült burkolatcső magas hőmérsékleten, nagy nyomású gáz hatására történő felfűvódását és a felhasadását. A felfűvódás és a milliszekundumos idő alatt létrejövő felhasadás térben és időben történő részletes megfigyeléséhez új eszközöket és eljárásokat dolgoztam ki. Meghatároztam a felhasadás jellemző időtartamát, és hőkamerás mérésekkel rámutattam, hogy forró folt jelenik meg a burkolaton a felhasadás előtt.

6. Új tudományos eredmények

1. tézispont (a dolgozat 3.3, illetve a 3.4 fejezetei alapján)

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 szerszámacél 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 mérésekor kapott erő-elmozdulás görbéket, amelyek megfelelően illeszkednek a mért görbékhez [T1, T2, T3].

2. tézispont (a dolgozat 4.1, 4.2, és 4.3 fejezetei alapján)

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 tűszelepet, 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 tesztelem, amely végül lehetőséget adott a felfúvódás és felhasadás mérésére és annak optikai megfigyelésére.

3. tézispont (a dolgozat 4.5 fejezete alapján)

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 α - β 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 átmérje egymáshoz hasonló kinetikával, ugrásszerűen megnőtt a felhasadást megelőzően. A lokális felfúvódással egy időben a minták tengelye a lokálisan felfúvódott régióban elgörbült [T5, T6].

4. tézispont (a dolgozat 4.6. fejezete alapján)

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. tézispont (a dolgozat 4.8. fejezete alapján)

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 repedésúcson jelenik meg. A kis hőkapacitású csőminta a hozzá képest igen nagy hőtehetetlenséggel rendelkező kemencében állandó hőmérsékleten marad, kivéve azt a pontot, ahol a minta felhasad [T8].

7. Nyilatkozat

A doktori értekezés szerzőjeként nyilatkozom, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

8. Köszönetnyilvánítás

A doktori tanulmányaim során elvégzett munkák során aligha érhettem volna el ilyen szép számmal új eredményeket, ha nem kapok bizalmat az akkori MTA Energiatudományi Kutatóközponttól. Hálával tartozom témavezetőmnek, Hózer Zoltánnak, a munkafeltételek megteremtéséért és a dolgozat elkészítése során tőle kapott támogatásért. Kiemelt köszönet illeti Király Mártont, a kísérleti munkák során és a tudományos közlemények megszerkesztésekor nyújtott segítségéért. Köszönöm Szabó Péternek a dolgozat elkészítése során nyújtott, önzetlen segítségét. A gyorskamerával végzett mérések kapcsán köszönet illeti Szepesi Tamást, a hőkamerát Rahne Ericnek köszönöm. A lencsék Ferencz Kárpát, a kemence Havas László munkái. Szakmai segítségéért és a numerikus elemző feladatokban adott módszertani tanácsaiért köszönetet mondok Antók Dánielnek és Tatár Leventének. Köszönöm Petrik Péter hasznos gondolatait, és segítő munkáját az optikai jelenségek kutatásában. Köszönöm Kulacsy Katalinnak a dolgozat elkészítéséhez nyújtott segítségét. Nagy Imre[†] és Kunstár Mihály[†] megfizethetetlen tanácsokat adtak a kísérletek végrehajtása során.

A doktori iskolában Ruszinkó Endre tanár úrnak és Borsa Judit tanárnőnek szeretnék szívből köszönetet mondani. Nekik köszönhetem, hogy önálló kutatóvá formáltak, szakmailag megalapozták a doktori éveimben végzett tevékenységemet.

A disszertációban elvégzett kutatásokat részlegesen az alábbi pályázatok támogatták: NKFI Alap Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program (NVKP_16-1-2016-0014) és az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (4000172048. EK-G-1175/2015).

9. Hivatkozások

- [1] NAŰ a civil felhasználásról, 4. oldal, 1. fejezet, <http://www.iaea.org/about/statute.html>
- [2] 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)
- [3] C. T. Walker, S. Bremier, S. Portier, R. Hasnaoui, W. Goll: *SIMS Analysis of an UO₂ Fuel Irradiated at Low Temperature to 65 Mwd/kgHM*, **Journal of Nuclear Material** 393, Pages 212-223, (2009)
- [4] A. V. Smirnov, D. V. Markov, V. P. Smirnov, V. S. Polenok, A. A. Ivashchenko, A. V. Strozhuik: *Results of Post-Irradiation Examination of VVER Fuel Assembly Structural Components Made of E110 and E635 Alloys*, **6th Conference on WWER Fuel Performance**, Modelling and Experimental Support, Albena, (2005)
- [5] E. Perez-Feró, C. 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 under accident conditions*, **report**, AEKI-FRL-2007-123-01/01, NEA-1799 IFPE/AEKI-EDB-E110, (2007)
- [6] V. V. Geraszimov, A. Sz. Monahov: *A nukleáris technika anyagai*, **Műszaki könyvkiadó**, Budapest, (1981)
- [7] Király Márton: *Atomerőművi fűtőelemek burkolatának jellemző tulajdonságai normál üzemi és üzemzavari körülmények között*, **PhD értekezés**, Fizikai Tudományok Doktori Iskola, Budapest, (2020)
- [8] 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*, **report**, NUREG/IA-0211 IRSN 2005-194 NSI RRC KI 3188, (2005)
- [9] S. A. Nikulin, A. B. Rozhnov, V. A. Belov, E. V. Li, V. S. Glazkina: *Influence of chemical composition of zirconium alloy E110 on embrittlement under LOCA conditions – Part 1: oxidation kinetics and macrocharacteristics*, **Journal of Nuclear Material**, 418, Pages 1-7, (2011)

- [10] S. A. Nikulin, V. G. Khanzhin, A. B. Rozhnov, V. A. Belov, E. V. Li: *Crack resistance of zirconium cladding pipes after high-temperature oxidation*, **Metal Science and Heat Treatment**, 55, Pages 1-2, (2013)
- [11] B. Volkov: *Distinctive features and resemblances between VVER and PWR fuels tested in the Halden Reactor*, **10th International Conference on WWER Fuel Performance**, Modelling and Experimental Support, Sandanski, Bulgaria; 7-14 September (2013)
- [12] A. V. Alekseev, A. V. Goraychev, O. I. Dreganov, A. L. Izhutov, L. V. Kireeva, I. V. Kiseleva, V. N. Shulimov: *Experimental Study of the VVER-1000 Fuel Rods Behavior under the Design-basis RIA and LOCA in the MIR reactor*, **18th IGORR Conference** (2017)
- [13] L. Yegorova: *Data Base on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO₂ fuel (VVER type) under Reactivity Accident Conditions*, **report**, NUREG/IA-0156, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA (1999)
- [14] V. L. Bogdanov, I. Vladimir, V. F. Kolesov, M. I. Kuvshinov, V. T. Punin, V. V. Sazhnov, I. G. Smirnov, Y. A. Trutnev, V. A. Ustinenko: *Irradiating Complex on BGR Reactor for Simulation Accidents of RIA Type*, **Seventh international conference on nuclear criticality and safety**, October 20-24, Tokai, Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, Pages 770-772 (2003)
- [15] A. Goryachev, N. Jouravkova, K. Lioutov, O. Nechaeva, A. Salatov, V. Smirnov, V. Ustinenko, L. Yegorova: *Experimental Study of Narrow Pulse Effects on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO₂ Fuel (VVER type) under Reactivity-initiated accident conditions: Program Approach and Analysis Results*, **report**, NUREG/IA-0213, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, USA (2006)
- [16] J. Stuckert, M. Große, C. Rössger, M. Klimenkov, M. Steinbrück, M. Walter: *QUENCH-LOCA program at KIT on secondary hydriding and results of the commissioning bundle test QUENCH-L0*, **Nuclear Engineering and Design**, Volume 225, Pages 185-201, (2013)
- [17] Wolfgang Hering, *Integrale nachuntersuchung von CORA-Bündeln*, **report**, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, September, PRS-No. 1042/89, (1989)

- [18] P. V. Fedotov, O. A. Nechaeva, V. V. Novikov, V. A. Salatov, A. V. Alekseev, A. V. Goryachev, I. V. Kiseleva, I. V. Kuzmin, V. N. Shulimov, V. S. Konstantinov, V. I. Nalivaev, V. M. Gukov, V. E. Donnikov, V. I. Latunin: *Studies of VVER fuel rods behaviour under LOCA condition, current status*, Ad-hoc LOCA meeting, NEA HQ, **Le Seine Saint-Germain, France**, 27th - 28th June, (2006)
- [19] <https://www.ek-cer.hu/futoelem-es-reaktoranyagok-laboratorium/>
- [20] Slonszki E., Hózer Z., Groma I., Gémes G. A., Lajtha G.: *Az atomerőművekben használt cirkóniumötvözetek anyagszerkezeti vizsgálata*, **Nukleon**, XI./212 évf. (2018)
- [21] 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)
- [22] 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 (2006)
- [23] C. Jensen, D. Wachs, N. Woolstenhulme, S. Hayes, N. Oldham, K. Richardson, D. Kamerman: *Post-Halden Reactor Irradiation Testing for ATF: Final Recommendations*, **report**, INL/EXT-18-46101, (2018)
- [24] J. K.-H. Karlsson: *Ramp Testing at the Studsvik R2 Reactor 1969-2005*, **TopFuel-2021**, (Santander, 24-28 October, 2021).
- [25] J. Sercombe, M. Agard, C. Struzik, B. Michel, G. Thouvenin, C. Poussard, K. R. Kallstrom: *1D and 3D analyses of the Zy2 SCIP BWR ramp tests with the fuel codes METEOR and ALCYONE*, **Nuclear Engineering and Technology**, 41(2), 187-198 (2009)
- [26] V. Grigoriev: *Mechanical Testing of High Burnup PWR Cladding to Simulate RIA*, Jahrestagung Kerntechnik, May 23-25, Bonn, Germany, (2000)
- [27] V. Grigoriev, R. Jakobsson, D. Schrire: *Experimental evaluation of critical strain energy density for irradiated cladding under simulated RIA conditions*, **ENS TopFuel**, May 27-30, European Nuclear Society, Stockholm, Sweden (2001)

- [28] J. P. Foster: *Segmented Expanding Mandrel Test Methods*, **Journal of Nuclear Materials**, 150, Pages 342-350, (1987)
- [29] H. Jiang, J.-A. J. Wang: *Methodology for Mechanical Property Testing of Fuel Cladding Using an Expanding Plug Wedge Test*, **Journal of Nuclear Materials**, 446, Pages 27-37, (2014)
- [30] Солонин В. И., Сотников А. С., Сергиенко И. Р.: *Механическое нагружающее устройство для проведения испытаний циркониевых оболочек в условиях имитирующих взаимодействие топлива с оболочкой*, **НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ**, DOI: 10.7463/0614.0715393, Эл № ФС77 - 4 8211, №042 00025 12, (2014)
- [31] B. N. Nobrega, J. S. King, G. S. Was, R. B. Adamson: *Improvements in the design and analysis of the segmented expanding mandrel test*, **Journal of Nuclear Materials**, Volume 131 Issue 2-3 Pages 99-104, (1985)
- [32] 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)
- [33] P. Askeljung, F. Corleoni, D. Jädernäs, J. Karlsson, M. Karlsson, P. Magnusson, A. Puranen, N. Snis, J. Stjärnsäter, P. Tejland, H.-U. Zwicky: *SCIP III – Technical Description*, **Studsvik Report**, STUDSVIK/N-13/172, STUDSVIK-SCIP III-164, 06.05. (2013)
- [34] J. Gadó, Á. Griger, K. Kulacsy: *The Fuel Behaviour Code FUROM and its High Burn-up Simulation Capabilities*, **Nuclear Engineering and Design**, 327, 274-285, (2018)
- [35] K. Lassmann: *TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use*, **Journal of Nuclear Materials** 188, 295-302, (1992)
- [36] G. Rossiter, S. Massara, M. Amaya: *OECD/NEA benchmark on pellet-clad mechanical interaction modelling with fuel performance codes*, **OECD/NEA Workshop on Pellet-Cladding Interaction (PCI) in Water-Cooled Reactors**, 22-24 June, Lucca, Italy, (2016)

- [37] O. Dufourneaud, A. Varias, V. Grigoriev, R. Jakobsson, D. Schrire: *Numerical simulation of the expansion due to compression test*, **Fuel safety research specialists' meeting**, March 4-5, Tokai, Japan, (2002)
- [38] M. Tubul, B. Ostraich, E. Shwageraus: *Mechanical Properties Characterization for a Cylindrical Fuel Clad using the Segmented Expanding Core-Mandrel (FEM) Method*, **poster**, <https://inis.iaea.org>, Israel, (2014)
- [39] M. Dostál, J. Klouzal, A. Krupkin, V. Kuznetsov, S. Linhart: *3D modelling of VVER fuel pellet cracking during power ramp*, **10th International conference on WWER fuel performance**, modelling and experimental support; Sandanski (Bulgaria), 7-14 Sep (2013)
- [40] 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)
- [41] F. Erbacher, H. Neitzel, H. Rosinger, H. Schmidt, 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 (W. Conshohocken, PA: ASTM Int.) Pages 271-283, (1982)
- [42] M. Billone, Y. Yan, T. Burtseva, R. Daum, H. Scott: *Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents*, **report**, NUREG/CR-6967, (2008)
- [43] J.C. Brachet, M. Dumerval, V. Lezaud-Chaillioux, M. Le Saux, E. Rouesne, D. Hamon, S. Urvoy, T. Guilbert, Q. Houmaire, C. Cobac, G. Nony, J. Rousselot, F. Lomello, F. Schuster, H. Palanchar, J. Bischoff, E. Pouillier: *Behavior of Chromium Coated M5 Claddings Under LOCA Conditions*, **Proceedings of Water Reactor Fuel Performance Meeting**, September 10-14, Jeju Island, South Korea (2017)
- [44] 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**, Volume 504, Pages 289-299, (2018)
- [45] R. S. W. Shewfelt: *The Ballooning of Fuel Cladding Tubes: Theory and Experiment*, **Research Mechanics**, Volume 25, Page 261-294, (1988)

- [46] K. Svanholm, M. P. Breggi, F. D'Auria, R. Ianiri: *Halden Reactors IFA-511.2 and IFA-54X: Experimental series under adverse cooling conditions*, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 11, (1995)
- [47] W. Wiesenack: *Accident-related fuel experiments in Halden - HRP LOCA Test Series IFA-650*, **report**, IAEA, 24 April (2014)
- [48] 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)
- [49] Z. Hózer, I. Nagy, N. Vér, R. Farkas, M. Horváth, Z. Kis: *Simulation of Loss-of-Coolant Accidents in the CODEX integral test facility*, **TopFuel-2018**, Prague, Paper A0133 (2018)
- [50] K. Pettersson, H. Chung, M. Billone, T. Fuketa, F. Nagase, C. Grandjean, G. Hache, J. Papin, L. Heins, Z. Hozer, J. In de Betou, S. Kelppe, R. Mayer, H. Scott, J. Voglewede, H. Sonnenburg, S. Sunder, M. Valach, V. Vrtilkova, N. Waeckel, W. Wiesenack, M. Zimmermann: *Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions*, **report**, NEA No. 6846, NEA, (2009)
- [51] F.J. Erbacher, H. J. Neitzel, K. Wiehr: *Cladding deformation and emergency core cooling of a pressurized water reactor in a LOCA*, **report**, Summary description of the REBEKA program, KfK-4781, (1990)
- [52] L. Yegorova: *Data base on the behaviour of high burn-up fuel rods with Zr-1%Nb cladding and UO₂ fuel (VVER type) under reactivity accident conditions - Volume 3, Test and calculation results*, **report**, NUREG/I-0156, IPSN 99/08-2, (1999)
- [53] Z. Hózer, Cs. Györi, M. Horváth, I. Nagy, L. Maróti, L. Matus, P. Windberg, J. Frecska: *Ballooning Experiments with VVER Cladding*, **Nuclear Technology**, Volume 152, Number 3, December, Pages 273-285, (2005)
- [54] I. Nagy, N. Vér, M. Kunstár, R. Farkas, Z. Hózer: *Simulation of 200% LOCA in the CODEX facility*, **report**, MTA EK-FRL-2016-701-1-2-M0, (2016)
- [55] M. Billone, Y. Yan, T. Burtseva, R. Daum, R.: *Cladding Embrittlement During Postulated Loss-of-Coolant Accidents*, **report**, NUREG 6967, U.S.-NRC, (2008)

- [56] Jakub Krejci: *UJP Zr alloy tests*, **Seminar on Cladding Oxidation by Air Under Severe Accident Conditions in a Nuclear Reactor**, 14-15 Jun, Budapest, Hungary, (2016)
- [57] M. N. Gussev, T. S. Byun, Y. Yamamoto, S. A. Maloy, K. A. Terrani: *In-situ tube burst testing and high-temperature deformation behavior of candidate materials for accident tolerant fuel cladding*, **Journal of Nuclear Materials**, Volume 466, Pages 417-425, (2015)
- [58] G. H. Choi, D. H. Kim, C. H. Shin, J. Y. Kim, B. J. Kim: *In-situ deformation measurement of Zircaloy-4 cladding tube under various transient heating conditions using optical image analysis*, **Nuclear Engineering and Design**, 370, 110859, (2020)
- [59] F. J. Erbacher, H. J. Neitzel, H. Rosinger, H. Schmidt, K. Wiehr: *Burst Criterion of Zircaloy Fuel Claddings in a LOCA*, **ASTM Fifth International Conference on Zirconium in the Nuclear Industry**, August 4-7, 1980, Boston, Mass.,USA, ASTM S. 271-83, ASTM Special Technical Publication 754, (1982)
- [60] K. J. Geelhood, W. G. Luscher, J. M. Cuta, I.A. Porter: *FRAPTRAN-2.0: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods*, **PNNL-19400**, Vol. 1, Rev. 2, (2016)
- [61] Kulacsy K.: *Üzemzavari állapotok numerikus modellezése 1. rész*, **kutatási jelentés**, MTA EK FRL-2018-238-2-1-M0, (2018)
- [62] Kulacsy K., Somfai B.: *Fűtőelem-pálcák üzemzavari viselkedésének modellezése*, **kutatási jelentés**, MTA EK FRL-2016-908-01-01-M0, (2016)
- [63] E. Kaplar, L. Yegorova, K. Lioutov, A. Konobeyev, N. Jouravkova: *Mechanical Properties of Unirradiated and Irradiated Zr-1% Nb Cladding*, **report**, NUREG/IA-0199, IPSN 01-16, (2001)
- [64] F. J. Erbacher: *Temperaturtransiente Kriechberstversuche an Zirconium-Niob1- Hüllrohren – Vergleich zu Zircaloy-4 Hüllrohren*, **FZKA 5726** (1997)
- [65] E. Perez-Feró, C. Györi, 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, 48–54, (2010)

- [66] Király M., **Nagy R.**, Szepesi T.: *Fűtőelem-burkolatok felhasadásának online vizsgálata magas hőmérsékleten, kutatási jelentés*, MTA EK-FRL-2016-903-1-1-M0 (2016)
- [67] Király M., **Nagy R.**, Nagy A., Almási Á.: *Cirkónium Anyagtudományi Kutatások - Fűtőelem-burkolatok felfűvódásának vizsgálata magas hőmérsékleten, kutatási jelentés*, MTA EK-FRL-2017-234-1-3-M0 (2017)
- [68] Király M., **Nagy R.**, Szabó P., Almási Á.: *Cirkónium Anyagtudományi Kutatások - Fűtőelem-burkolatok magas hőmérsékletű felfűvódása és oxidációja, kutatási jelentés*, MTA EK-FRL-2018-234-1-3-M0 (2018)
- [69] P. V. Uffelen, C. Győri, A. Schubert, J. Van De Laar, Z. Hózer, G. Spykman: *Extending the application range of a fuel performance code from normal operating to design basis accident conditions*, **Journal of Nuclear Materials**, 383(1-2), 137-143, (2008)
- [70] C. Győri, Z. Hózer, E. Perez-Feró, P. Van Uffelen, A. Schubert, L. van de Laar, J.: *Applying the Transuranus Code to VVER Fuel under Accident Conditions*, **18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)**, Beijing, China, August 7-12, SMiRT18-C04-3, (2005)
- [71] G. Pastore, R. L. Williamson, R. J. Gardner, S. R. Novascone, J. B. Tompkins, K. A. Gamble, J. D. Hales: *Analysis of Fuel Rod Behavior during Loss-of-coolant Accidents Using the BISON Code: Cladding Modeling Developments and Simulation of Separate-effects Experiments*, **Journal of Nuclear Materials**, 543, 152537, (2021)
- [72] D.T. Hagrman, C. M. Allison, G. A. Berna: *SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis*, **report**, NUREG/CR6150, EGG-2720 Vol 4, 1995
- [73] Antók D., Fekete T., Tatár L.: *E110 anyagú üzemanyag-burkolat csöveken végzett lapító- és felszakítási kísérletek szimulációja*, **Nukleon**, 2010. május III. évf. 64, (2010)
- [74] K. J. Geelhood: *Comparison of the FRAPCON-3.4 Creep Model to the Creep Data from the IFA-699 Experiment*, **PNNL**, (2013)

[75] Király M., Horváth L., Novotny T., Perezné Feró E., Vér N.: *Mandrel mérések kémiaailag kezelt mintákkal, magas hőmérsékleten, kutatási jelentés*, MTA EK-FRL-2018-234-1-1-M0, (2018)

[76] **Nagy R.**, Antók D. M., Király M., Tatár L.: *Hidrogénezett cirkónium burkolatcsövek mandrel mérésének végeelemes modellezése, kutatási jelentés*, MTA EK-FRL-2018-236-1-1-M0, (2018)

[77] 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 Cladding at High Temperature. Zirconium in the Nuclear Industry*, 17th International Symposium, (2014)

[78] J. Stuckert, M. Steinbrück, U. Stegmaier: *Single rod Quench tests with Zr-1Nb cladding. Comparison with Zircaloy-4 cladding tests and modelling, QUENCH workshop*, (2001)

[79] Z. Hózer, I. Nagy, A. Vimi, M. Kunstár, P. Szabó, T. Novotny, E. Perez-Feró, M. Horváth, A. Pintér-Csordás: *Mechanical Testing of Balloned E110 and E110G Cladding after Hightemperature Oxidation in Steam. TopFuel-2015*, Reactor Fuel Performance Conference Proceedings, (2015)

[80] https://www.heraeus.com/media/media/hca/doc_hca/products_and_solutions_8/optics/Data_and_Properties_Optics_fused_silica_EN.pdf

[81] http://nagykrisztian.com/synthrays/index_hu.html (letöltés: 2018. december)

[82] 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* ^{IF(2022): 2,936}, Volume 508, Pages 423-433, (2018)

[83] Z. Hózer, I. Nagy, A. Vimi, M. Kunstár, P. Szabó, T. Novotny, E. Perez-Feró, Z. Kis, L. Szentmiklósi, M. Horváth, A. Pintér Csordás, E. Barsy, K. Kulacsy, M. Grosse: *High-Temperature Secondary Hydriding experiments with E110 and E110G Claddings*, **18th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry**, ed. R. Comstock and A. Motta (West Conshohocken, PA: ASTM International), pp. 271-283, (2018)

[84] 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>

[85] Nagy I., Vimi A., Windberg P., Hózer Z., Kracz G., Kunstár M., Perezné Feró E., Novotny T.: *Az E110G jelű burkolat felfűvódása és felhasadása magas hőmérsékleten, kutatási jelentés*, AEKI-FL-2011-744-01/01

[86] <https://www.infratec.eu/thermography/thermographic-software/irbis3/>

[87] <https://themacs-engineering.com/wp-content/uploads/2020/05/Emissivity-measurement.pdf>

9.1 A tézispontokhoz kapcsolódó saját 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** ^{IF(2022): 3,383}, 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** ^{IF(2022): 2,341}, 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** ^{IF(2022): 1,523}, 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** ^{IF(2022): 1,869}, 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** ^{IF(2022): 1,869}, 371 Paper: 110942, pages 9, (2020)

9.2 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** ^{IF(2022): 1,776}, 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 ZrO₂*, **Applied Surface Science** ^{IF(2022): 6,707}, 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** ^{IF(2022): 1,869}, 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** ^{IF(2022): 2,936}, 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>