



REMIGIJUS JANULIONIS

**HIDRIDŲ IR TERMINIO
POVEIKIO ĮTAKOS
BRANDUOLINĖS
ENERGETIKOS OBJEKTŲ
KONSTRUKCINIŲ
ELEMENTŲ IRIMUI
SKAITINIS TYRIMAS**

DAKTARO DISERTACIJA

Kaunas
2020

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

REMIGIJUS JANULIONIS

HIDRIDŲ IR TERMINIO POVEIKIO ĮTAKOS
BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS OBJEKTŲ
KONSTRUKCINIŲ ELEMENTŲ IRIMUI
SKAITINIS TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

2020, Kaunas

Disertacija rengta 2015–2019 metais Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Dr. Gintautas DUNDULIS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Interneto svetainė, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Irma Urbonavičienė

TURINYS

ŽYMĖJIMAI.....	5
SANTRUMPOS	7
ĮVADAS	8
1. TYRIMŲ APŽVALGA.....	11
1.1. Cirkonio lydiniai branduolinėje energetikoje	11
1.2. RBMK reaktorių kuro kanalai	14
1.3. CANDU reaktorių slėgio vamzdžiai.....	18
1.4. Hidridai cirkonio lydiniuose.....	20
1.5. Vandenilio prisotintų cirkonio lydinių savybės	22
1.6. Vandenilio degradacinis poveikis ir lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmas cirkonio lydiniuose	27
1.7. Cirkonio lydinių mechaninių ir irimo tūsumo savybių skaitinis modeliavimas	32
1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas ir mokslinės problemos formulavimas.....	34
2. IRIMO TĄSUMO SKAITINIO ĮVERTINIMO METODIKA	36
2.1. Tyrimų objektas ir eksperimentinių tyrimų bandinių paruošimas	36
2.2. Hidridų dydžio matavimas cirkonio lydinyje	38
2.3. Hidrido tūrinės dalies nustatymas.....	39
2.4. Skaitinis cirkonio lydinio su hidridais savybių įvertinimas.....	40
2.4.1. Baigtinių elementų programa ABAQUS	40
2.4.2. Skaitinis modelis cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių įvertinimui.....	41
2.4.3. Cirkonio lydinio ir hidrido mechaninės savybės	43
2.4.4. Medžiagų mechaninių savybių nustatymas	44
2.5. Irimo parametrų įvertinimo metodika.....	45
2.6. BE programos ABAQUS validavimas irimo mechanikos uždaviniui spręsti	47
2.6.1. Analitinis įtempių intensyvumo koeficiento įvertinimas.....	48
2.6.2. Es-Salam reaktoriaus korpuso skaitinis modelis parengtas programa ABAQUS	50

2.7.	Kritinio K_{IC} nustatymas	51
2.7.1.	Eksperimentiniai plieno P91 mechaninių savybių ir įtempių intensyvumo koeficiento tyrimai.....	54
2.7.2.	Dvimatis skaitinis modelis K_{IC} tyrimui.....	55
2.7.3.	Trimatis skaitinis modelis skirtas K_{IC} tyrimui	57
2.8.	Kritinio J_{IC} nustatymas	60
2.8.1.	Eksperimentiniai plieno P91 savybių ir J_{IC} tyrimai	62
2.8.2.	Trimatis skaitinis modelis J_{IC} tyrimui.....	63
3.	TYRIMŲ REZULTATAI IR DISKUSIJA	66
3.1.	Hidridų dydžio matavimo rezultatai	66
3.2.	Cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių skaitinio įvertinimo rezultatai.....	67
3.3.	BE programos ABAQUS irimo mechanikos uždaviniams spręsti validavimo rezultatai	69
3.4.	Dvimačio skaitinio modelio K_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai	74
3.5.	Trimačio skaitinio modelio K_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai	76
3.6.	Trimačio skaitinio modelio J_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai	80
4.	CIRKONIO LYDINIUI SU HIDRIDAIS IRIMO TĄSUMUI ĮVERTINTI SKIRTOS SKAITINĖS METODIKOS TINKAMUMO DEMONSTRAVIMAS ..	85
4.1.	Vandeniliu įsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio skaitinis kritinio įtempių intensyvumo koeficiento įvertinimas	85
4.2.	Vandeniliu įsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio skaitinis kritinio J-integralo įvertinimas.....	89
	IŠVADOS.....	93
	LITERATŪRA	94
	MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	103

ŽYMĖJIMAI

- $[H]_{Zr}$ – vandenilio koncentracija, ppm;
 A_i – koeficientai, aprašantys įtempius plyšio plokštumoje;
 A_p – slėgio indo vidinis slėgis, Pa;
 Δa – plyšio pailgėjimas, m;
 a – plyšio gylis, m;
 a_0 – pradinis plyšio ilgis, m;
 a_1 – nuovarginio plyšio ilgis, m;
 B – bandinio storis, m;
 B_N – nominalus bandinio storis, m;
 b_0 – neįtrūkusi bandinio dalis, randama pagal $W-a_0$, m;
 C_H – vandenilio tirpumas cirkonio matricioje;
 c – 1/2 plyšio ilgio, m;
 D_H – hidrido difuzijos koeficiento funkcija nuo temperatūros;
 D – difuzijos koeficientas, m^2/s ;
 E – tamprumo modulis, Pa;
 F – jėga, N;
 f – apkrovos, konstrukcijos ir plyšio tipo funkcija;
 G – funkcija, kurioje įtrauktas geometrijos koeficientas, cirkonio ir hidrido molinis tūris, hidrido sudėtis;
 G_i – laisvo paviršiaus pataisos koeficientas;
 J_I – J-integralas, N/m;
 h_h – homogenizacijos laikas, s;
 J_{IC} – kritinis J-integralas, N/m;
 J_Q – sąlyginis J-integralas, N/m;
 $K_{\text{begalinė pl}}$ – įtempių intensyvumo koeficientas begalinio dydžio plokštelėje, $Pa\sqrt{m}$;
 K_I – įtempių intensyvumo koeficientas, $Pa\sqrt{m}$;
 K_{IC} – kritinis įtempių intensyvumo koeficientas, $Pa\sqrt{m}$;
 K_{IH} – slenkstinis įtempių intensyvumo koeficientas, $Pa\sqrt{m}$;
 K_Q – sąlyginis įtempių intensyvumo koeficientas, $Pa\sqrt{m}$;
 Δl – ilgio pokytis veikiant apkrovai, m;
 l – ilgis, m;
 l_0 – pradinis ilgis, m;
 n_j – vienetinio vektoriaus, statmeno kontūrai Γ , komponentė;
 Δp – hidrostatiinių įtempties įtempių tarp plyšio viršūnės ir hidridų skirtumas, Pa;
 p – slėgis, Pa;
 P_Q – jėga, kuriai esant įtempių intensyvumo koeficientas pasiekia K_Q reikšmę, N;
 Q – proceso aktyvacijos energija, J/mol;
 R – universalioji dujų konstanta, J/(mol·K);
 r – cilindro spindulys, m;

S – kieto kūno skerspjūvio plotas statmenai veikiamos jėgos įvertinant bandinio susitraukimą ir kakliuko susidarymą, m^2 ;
 T – temperatūra, K;
 t – slėgio indo sienelės storis, m;
 $t_{hidrido}$ – hidrido sluoksnio storis, m;
 T_i – jėgos vektorius, nukreiptas į išorę nuo integravimo kontūro, N;
 t_{Zr} – cirkonio bandinio storis, m;
 u – poslinkių vektorius, m;
 v – plyšio atsivėrimo poslinkiai, m;
 hV_H – vandenilio molio tūrinė dalis cirkonio hidride;
 V_{LHP} – lėtinio hidridinio pleišėjimo greitis, m/s;
 W – bandinio plotis, m;
 W_E – kūno deformacijos energijos tankis, J/m^2 ;
 x – atstumas nuo sienelės, kurioje susiformavo plyšys, paviršiaus iki analizuojamo taško plyšio viršūnėje, m;
 Z – bandinio skerspjūvio ploto sumažėjimas, %.

Graikiški simboliai

α, β, γ – medžiagos konstantos;
 Γ – integravimo kontūras apie plyšio viršūnę;
 ε – deformacija;
 ε_f – suirimo deformacija;
 ε_{fp} – plastiško irimo deformacijos;
 σ – įtempiai, Pa;
 $\sigma_{0,2}$ – sąlyginė takumo riba esant 0,2 % plastinėms deformacijoms, Pa;
 σ_e – von Mizeso (ekvivalentiniai) įtempiai, Pa;
 σ_{hs} – hidrostatiniai įtempiai, Pa;
 σ_{ij} – įtempių tenzorius, Pa;
 σ_m – membraniniai įtempiai, Pa;
 σ_U – stiprumo riba, Pa;
 σ_y – takumo riba, Pa;
 σ_y – efektyvioji takumo riba (σ_y ir σ_U aritmetinis vidurkis), Pa;
 ν – Puasono koeficientas;
 Φ – kampas, nusakantis nagrinėjamą vietą plyšio viršūnėje, °.

SANTRUMPOS

- AE – atominė elektrinė;
A-R – ašinė-radialinė;
A-T – ašinė-tangentinė;
ASME – Amerikos mechanikos inžinierių draugija (*angl. American Society of Mechanical Engineers*);
ASTM – Amerikos bandymų ir medžiagų draugija (*angl. American Society for Testing and Materials*);
BE – baigtiniai elementai;
BEM – baigtinių elementų metodas;
C(T) – kompaktinis tempimo bandinys (*angl. compact tension specimen*);
CANDU – Kanados sunkiojo vandens branduolinis reaktorius (*angl. Canada Deuterium Uranium*);
FUGEN – Japonijos branduolinis reaktorius;
IAE – Ignalinos atominė elektrinė;
KANUPP – Karačio branduolinė elektrinė (*angl. Karachi Nuclear Power Plant*);
KK – kuro kanalas;
LEI – Lietuvos energetikos institutas;
LHP – lėtinis hidridinis pleišėjimas;
PBK – panaudotas branduolinis kuras;
RBMK – didelės galios, kanalinis branduolinis reaktorius (*rus. Реактор Большой Мощности Канальный*);
RP – nuorodos taškas (*angl. Reference Point*);
R-T – radialinė-tangentinė;
SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas;
TMO – termomechaninis apdirbimas;
VVER – vandens-vandens energetinis reaktorius (*rus. Водо-Водяной Энергетический Реактор*).

IVADAS

Pasaulinės branduolinės asociacijos duomenimis, 2019 metais pasaulyje veikė apie 450 branduolinių reaktorių, kurie pagamino apie 11 % visos pasaulyje pagaminamos elektros energijos. Šiuo metu yra statoma apie 60 branduolinių reaktorių, kurių pagaminta elektros energija sudarys dar apie 15 % dabar pagaminamos elektros energijos branduoliniuose reaktoriuose. Tačiau daugumos šiuo metu eksploatuojamų branduolinių reaktorių amžius yra nuo 30 iki 45 metų. Antrosios kartos reaktorių projektinis eksploatacijos laikas siekia 30–40 metų. Siekiant neprarasti ženklios dalies elektros gamintojų uždarius branduolinius reaktorius, kurių eksploatacinis laikas baigiasi, vykdomi įvairūs tarptautiniai projektai, tokie kaip, pvz. „NULIFE“ (2006–2011) ir pan., ir taip siekiama pratęsti jų eksploataciją iki 50–60 metų. Visa tai sukelia papildomų problemų, susijusių su saugumo ir patikimumo užtikrinimu.

Branduolinių įrenginių komponentų saugumo ir patikimumo aktualumas išlieka net tik reaktoriaus eksploatacijos metu, tačiau ir panaudoto branduolinio kuro saugojimo metu, kai sukaupti vandenilio koncentracijos kiekiai yra pakankami ir gali pasireikšti lėtinio hidridinio pleišėjimo senėjimo mechanizmas.

Įprastai vandenilio įtaka cirkonio lydinių savybėms yra vertinama eksperimentiškai, tačiau eksperimentiniai tyrimai trunka ilgai, yra brangūs, o jiems atlikti reikalingas tiriamosios medžiagos pavyzdys. Todėl reikalingi alternatyvūs tyrimų metodai. Šiame darbe pristatoma cirkonio lydinių, kuriuose dėl vandenilio absorbcijos susiformuoja cirkonio hidridai, irimo tūsumo skaitinio įvertinimo metodika. Sukurta metodika, naudojant baigtinių elementų modelius, leidžia įvertinti vandenilio įtaką cirkonio lydinių savybėms.

Skaitinei metodikai sukurti buvo tirti dvimačiai ir trimačiai baigtinių elementų modeliai. Skaitinis standartinių kompaktinių tempimo bandinių tyrimas parodė, kad dvimačiai baigtinių elementų modeliai tiek taikant plokščią deformacijų būvį, tiek ir plokščią įtempių būvį, nėra tinkami irimo tūsumui įvertinti. Tyrimuose pademonstruota, jog šiam tikslui geriau tinka trimatis baigtinių elementų kompaktinio tempimo bandinio modelis.

Nagrinėjant irimo tūsumo parametrus, tyrimai atskleidė, kad net ir esant santykinai didelei vandenilio koncentracijai – 140 ppm, TMO-2 Zr-2,5Nb lydinys išlieka gana plastiškas, todėl nustatomas tik sąlyginis įtempių intensyvumo koeficientas K_Q . Todėl, norint įvertinti šio lydinio irimo tūsumą, reikia rasti kritinę J-integralo J_{IC} vertę.

Atliekant minėtus tyrimus, parengta skaitinio modeliavimo metodika, leidžianti įvertinti cirkonio lydinio mechanines savybes ir irimo tūsumą priklausomai nuo vandenilio koncentracijos.

Disertacija rengta 2015–2019 m. Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje, vykdam Lietuvos valstybės biudžeto subsidijomis finansuojamus darbus: mokslininkų darbo grupės projektą „Naujos kartos plieno ilgaamžiškumo įvertinimo modelis“ (2014–2016) ir institucinę ilgalaikę mokslinių tyrimų programą „Branduoliniuose ir termobranduoliniuose įrenginiuose vykstančių saugai svarbių procesų moksliniai tyrimai“ (2012–2016). Taip pat dirbant Europos

Sąjungos programos „Horizontas 2020“ finansuojamame projekte „Incefa+“ (2015–2020).

Darbo aktualumas

Branduolinių elektrinių kuro apvalkalai yra gaminami iš cirkonio lydinio, jie be kitiems metalams būdingų senėjimo mechanizmų taip pat yra veikiami vandenilio absorbcijos ir jį lydinčio lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmų. Apvalkaluose esantis branduolinis kuras po eksploatacijos yra saugomas panaudoto kuro baseinuose, trumpalaikio saugojimo konteineriuose, vėliau laidojamas giluminiuose atliekynuose. Visais atvejais yra svarbus kuro apvalkalo patikimumas, turi būti užtikrinamas jo struktūrinis vientisumas bei sandarumas.

Medžiagų senėjimo poveikis įprastai vertinamas eksperimentiniais bandymais laboratorijoje. Kuro apvalkalai yra apsaugos priemonė, neleidžianti radioaktyviems skilimo produktams pasklisti į aplinką, jų eksperimentiniai tyrimai yra sudėtingi ir brangūs, todėl reikalingi alternatyvūs medžiagos senėjimo įvertinimo metodai.

Kanalinio tipo reaktorių kuro kanalai, kaip ir kuro apvalkalai, pagaminti iš cirkonio lydinio, todėl ir juos veikia tokie patys senėjimo mechanizmai. Senėjimo mechanizmai turi ženklų įtaką kuro kanalų ir viso reaktoriaus patikimumui.

Darbo tikslas

Naudojant sukurta metodiką nustatyti branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų, pagamintų iš cirkonio lydinių, irimo tąsumą įvertinant vandenilio absorbcijos mechanizmą ir terminį poveikį.

Darbo uždaviniai

1. Eksperimentiškai išmatuoti cirkonio hidridų matmenis priklausomai nuo vandenilio koncentracijos.
2. Sukurti skaitinio modeliavimo metodą ir jį naudojant iširti cirkonio lydinio su hidridais mechanines charakteristikas.
3. Sukurti skaitinio modeliavimo metodą ir jį naudojant nustatyti cirkonio lydinio su hidridais kritinę įtempių intensyvumo koeficiento vertę.
4. Sukurti skaitinio modeliavimo metodą, leidžiantį nustatyti plyšio pailgėjimą kompaktiniame bandinyje.
5. Sukurti skaitinio modeliavimo metodą ir jį naudojant nustatyti cirkonio lydinio su hidridais kritinę J-integralo vertę.

Darbo mokslinis naujumas

Sukurta nauja skaitinio modeliavimo metodika, leidžianti skaitiniais metodais nustatyti cirkonio lydinių irimo tąsumą esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms.

Plyšio pailgėjimo nustatymo metodai papildyti pasiūlyta ir validuota daugianare lygtimi.

Darbo praktinė vertė

Sukurta metodika tinkama naudoti įvairių metalo lydinių įtempimų intensyvumo koeficientams bei J-integralo vertėms nustatyti. Taikant šią metodiką branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų pagamintų iš cirkonio lydinių, t. y. kuro kanalų bei kuro apvalkų, vertinimui, galima prognozuoti jų savybių pokytį dėl vandenilio absorbcijos mechanizmo eksploatacijos ar branduolinio kuro saugojimo metu. Tai didina visos branduolinės elektrinės patikimumą. Tai labai aktualu panaudoto branduolinio kuro saugojimo metu, kadangi eksploatuojant sukaupti vandenilio koncentracijos kiekiai kuro apvalkale yra dideli, temperatūros pakankamos, kad pasireikštų lėtinio hidridinio pleišėjimo senėjimo mechanizmas. Todėl naudojant šią metodiką galima patobulinti kuro apvalkų konstrukciją bei panaudoto branduolinio kuro saugojimo procedūras.

Įvertinus radiacijos įtaką cirkonio lydinio savybėms sukurta metodika tinkama ir iradijuotų medžiagų branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų irimo tūsumui, esant hidridams ir terminiam poveikiui, vertinti.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Didėjant vandenilio koncentracijai cirkonio lydinyje didėja ir cirkonio hidridų storis, ilgis bei užimama tūrinė dalis.

2. Naudojant dvimatį vieno vidutinio dydžio hidrido ir jį supančios cirkonio matricos baigtinių elementų modelį galima nustatyti cirkonio lydinio su hidridais mechanines savybes.

3. Trimatis baigtinių elementų modelis naudojant standartinius kompaktinius bandinius labiau tinkamas nei dvimatis modelis kritinei irimo tūsumo vertei nustatyti.

4. Naudojant nustatytą antro laipsnio daugianarę lygtį galima įvertinti plyšio padidėjimą kompaktiniame bandinyje.

5. Naudojant pasiūlytą skaitinį modelį galima nustatyti cirkonio lydinio su hidridais kritinę J-integralo vertę.

Darbo aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtas 1 mokslinis straipsnis duomenų bazėje „Clarivate Analytics“ „Web of Science Core Collection“ referuojamame leidinyje bei 1 mokslinis straipsnis publikuotas mokslo leidinyje, registruotame tarptautinėje mokslinės informacijos duomenų bazėje. Rezultatai pristatyti 1 užsienio konferencijoje bei 5 tarptautinėse konferencijose Lietuvoje, iš kurių 5 publikacijos atspausdintos konferencijų medžiagoje.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, literatūros apžvalga, matavimų metodika, skaitinio tyrimo metodika ir modelio aprašymas, skaitinių tyrimų rezultatai ir jų aptarimas, skaitinės metodikos tinkamumo demonstravimas cirkonio lydiniai su hidridais, išvados, literatūros sąrašas ir disertacijos tema paskelbtų mokslinių publikacijų sąrašas. Darbo apimtis 104 puslapiai, iš jų 79 paveikslai, 9 lentelės, 103 nuorodos į literatūros šaltinius.

1. TYRIMŲ APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgti viešai prieinami mokslinėje literatūroje skelbiami tyrimai bei informacija, susijusi su vandenilio absorbcijos sukeliamu senėjimo mechanizmu ir jo įtaka cirkonio lydinių, naudojamų branduolinėse elektrinėse, savybėms. Atlikta apžvalga pagrindžia disertacinio darbo aktualumą, tikslą ir disertacinio darbo tikslui pasiekti reikalingus darbo uždavinius.

Skyriaus medžiaga suskirstyta į cirkonio lydinių branduolinėje energetikoje apžvalgą, RBMK ir CANDU reaktorių kuro kanalų medžiagų ir konstrukcijos aprašymą, hidridų formavimąsi ir orientaciją, vandenilio įtaką medžiagų savybėms, lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmą ir cirkonio lydinių savybių skaitinį modeliavimą.

1.1. Cirkonio lydiniai branduolinėje energetikoje

Cirkonio lydiniai plačiai taikomi branduolinėje energetikoje. Jie naudojami slėgio vamzdžių, branduolinio kuro apvalkalų, branduolinio kuro rinklių bei tvirtinimo detalių gamybai. Cirkonio lydinys Zr-2,5Nb naudojamas RBMK, CANDU, KANUPP, FUGEN ir kitų tipų reaktorių kuro kanalų (KK) slėgio vamzdžių gamyboje [1–4]. Branduolinio kuro apvalkalų gamyboje dažniausiai naudojami cirkonio lydiniai Zry-2, Zry-4 ar Zr-1Nb [5]. Kuro apvalkalai yra svarbūs aktyvios reaktoriaus zonos konstrukciniai elementai, kuriems, kaip ir kuro kanalams, keliami aukšti eksploatacinio patikimumo reikalavimai. Jie eksploatuojami sunkiomis sąlygomis, pasižymi mažu šiluminių neutronų absorbcijos skerspjūviu, atsparumu korozijai ir geromis fizinėmis ir mechaninėmis savybėmis.

Kaip ir kitos konstrukcinės medžiagos, cirkonio lydiniai eksploatacijos metu sensta, t. y. ilgainiui pakinta jų savybės. Zr lydinius veikiantys senėjimo mechanizmai ir juos lydintys pažeidimai pateikti 1.1 lent. [6].

1.1 lentelė. Zr lydinių senėjimo mechanizmai

Senėjimo mechanizmai	Pažeidimas
Radiacinis sukietėjimas ir sutrapėjimas	Mechaninių savybių pasikeitimas
Statinis ir ciklinis metalo pažeidimas	Metale esančio defekto padidėjimas
Vandenilio absorbcija	Bendras sutrapėjimas
Lėtinis hidridinis pleišėjimas	Lokalinis sutrapėjimas
Korozija	Sienelės storio sumažėjimas
Radiacinis valkšnumas	Matmenų pasikeitimas

Kuro apvalkaluose tarpelis tarp branduolinio kuro ir apvalkalo sienelės yra užpildomas helio dujomis. Helio dujos padidina šiluminį laidumą tarp branduolinio kuro tabletės ir kuro apvalkalo, o dujų slėgis sumažina kuro apvalkalo ir kuro tabletės kontakto tikimybę [7]. Normalios eksploatacijos metu kuro apvalkalai yra veikiami 290–400 °C temperatūros ir 40–80 MPa gniuždymo žiedinių įtempčių, susidarančių dėl šilumnešio slėgio išorėje. Esant ilgalaikiam sausajam panaudoto branduolinio kuro (PBK) saugojimui, pirminis kuro apvalkale esančių helio dujų slėgis padidėja dėl papildomų branduolinio kuro skilimo proceso metu susidarančių dujų. Tai gali

padidinti valkšnumą ir sukelti kuro apvalkalo plastinį suirimą [8]. Nors branduolinio kuro apvalkalai suprojektuoti taip, kad normalios eksploatacijos metu apvalkale susidarantys įtempiai nesiektų takumo ribos, tačiau esant pastoviai apkrovai, aukštai temperatūrai bei veikiant radiacijai Zr lydinių valkšnumas padidėja. Todėl galima teigti, kad padidėjęs valkšnumas yra viena iš svarbiausių problemų tiek eksploatacijos metu, tiek ir saugant panaudotą branduolinį kurą [9–11]. Svarbu teisingai įvertinti kuro apvalkalo valkšnumą tam, kad būtų galima teisingai parinkti tarpelį tarp kuro tabletės ir vidinės apvalkalo sienelės ir būtų galima teisingai nustatyti šilumos nuvedimą iš kuro į šilumnešį [12].

Branduolinio kuro apvalkalo išorinis paviršius kontaktuoja su branduolinio reaktoriaus šilumnešiu (vandeniu), todėl jis koroduoja. Korozijos proceso metu susidariusį vandenilį absorbuoja kuro apvalkalas. Vandenilis turi labai žemą tirpumo ribą cirkonio α fazėje – mažiau nei 1 ppm kambario temperatūroje, apie 80 ppm esant 300 °C ir apie 200 ppm esant 400 °C. Vandenilio koncentracijai viršijus tirpumo ribą, cirkonio lydinyje vandenilis ir cirkonis sudaro trapius hidridus [13]. Susidariusi trapioji hidridinė fazė lemia fizikines mechanines lydinio savybes tiek esant žemoms temperatūroms, didindama trapumą, tiek ir reaktoriaus eksploataavimo temperatūrose, kai, esant hidridams bei veikiant įtempiams, KK ar kuro apvalkalas gali pradėti irti pagal lėto hidridinio pleišėjimo (LHP) mechanizmą. LHP – tai toks plyšio didėjimo mechanizmas, kada medžiagose, kuriose gali formotis hidridai, plyšio viršūnėje susiformuoja trapioji hidrido fazė, o jai suirus – gaunamas plyšio padidėjimas [14]. LHP atvejai buvo nustatyti daugelio reaktorių slėgio vamzdžiuose ir buvo pagrindinė plyšių juose susidarymo ar suirimo priežastimi [4, 15]. Yra žinomi CANDU slėgio vamzdžių suirimo atvejai Kanadoje [16], buvo užregistruoti pažeidimai ir RBMK reaktorių slėgio vamzdžiuose [17, 18].

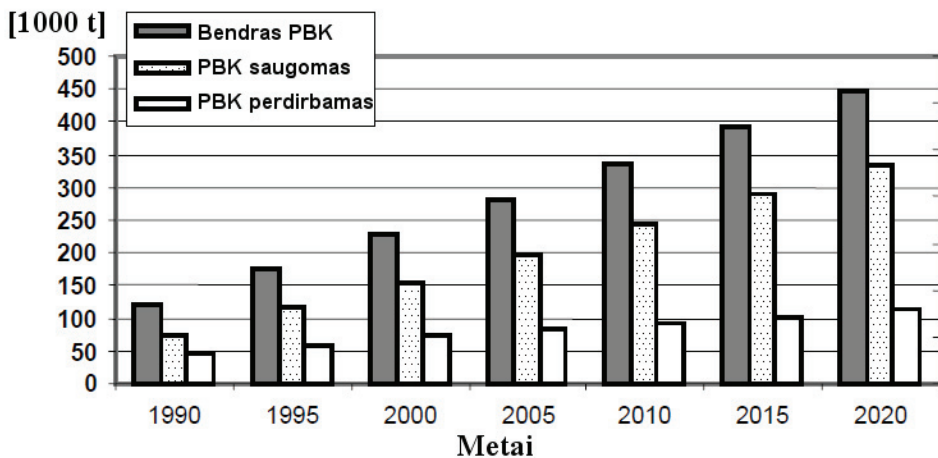
LHP pirmą kartą buvo pastebėtas kanadiečių CANDU reaktorių slėgio vamzdžiuose. Lengvojo vandens reaktoriuose LHP mechanizmas buvo aptiktas tik XX a. 10-ojo dešimtmečio pabaigoje verdančio vandens reaktorių didelio išdegimo kuro apvalkaluose. Pastaruoju metu LHP mechanizmo kuro apvalkaluose, kurie yra tarpinio panaudoto branduolinio kuro saugojimo saugyklose, aktualumas yra padidėjęs, kadangi panaudotas branduolinis kuras, saugomas baseinuose, yra absorbuojantis pakankamus vandenilio kiekius, kad pasireikštų LHP mechanizmas [19].

Eksploatacijos metu branduolinio kuro tabletės plečiasi, užima didesnę tūrį, dėl to padidėja kuro apvalkalo dujų slėgis. Dėl didesnio slėgio padidėja ir įtempiai kuro apvalkale, o tai sudaro palankias sąlygas plyšiams susidaryti [20]. Susidarę plyšiai kuro apvalkalo sienelėje gali didėti panaudoto branduolinio kuro saugojimo metu [21] arba dar eksploatacijos metu peraugti skersai apvalkalo sienelę ir suformuoti kiaurą plyšį. Toks plyšys susidaro dėl LHP proceso [5]. VVER ir RBMK reaktorių kuro apvalkalų ir KK suirimo priežastimi taip pat įvardijamas LHP procesas [14, 15]. Tačiau dažnai plyšių KK ir kuro apvalkaluose priežastys dėl sudėtingų tyrimų lieka nepaaiškintos arba priskiriamos kitiems veiksniams [22, 23].

Kuro apvalkalų vientisumo išsaugojimo svarba išlieka ne tik eksploatacijos, bet ir panaudoto branduolinio kurio saugojimo metu, o laikui bėgant ji vis labiau didėja. Prognozuojama, kad 2020 metais, kai dauguma vis dar eksploatuojamų branduolinių reaktorių pasieks numatytą eksploatacijos laiko pabaigą, pasaulyje panaudoto

branduolinio kuro kiekis pasieks 445 000 t [24]. 1.1 pav. pavaizduotas PBK kiekio didėjimas 1990–2020 metais ir jo tvarkymo tendencijos. Akivaizdu, kad PBK perdirbimo mastai ženkliai mažesni negu saugomi kiekiai. Šiuo metu pasaulyje PBK yra saugomas baseinuose (šlapijojo tipo saugyklose) bei konteineriuose (sausosio tipo saugyklose). Įvairiose šalyse taikomi ar planuojami taikyti PBK saugojimo būdai aprašyti darbuose [25–27]. PBK saugojimas yra ypatingai ilgą laiką trunkantis procesas. Jeigu branduolinių atliekų tvarkymui būtų pasirinkta technologija, kai PBK yra laidojamas giluminiuose atliekynuose, tokio atliekyno saugumas turėtų būti užtikrintas mažiausiai 100 tūkst. metų [28]. Dėl šios priežasties net ir mažos tikimybės įvykiai turi didelę reikšmę ir turi būti įvertinti. Reiškiniai, kurie eksploatacijos metu ar esant trumpalaikiam saugojimui yra mažiau aktualūs, gali tapti ypač reikšmingi ilgalaikio saugojimo metu.

PBK kiekiai 1990-2020 metais



1.1 pav. PBK tvarkymo pastarųjų dviejų dešimtmečių tendencija [24]

Sausosio tipo saugyklos – tai įvairūs konteineriai, pagaminti iš metalų (plieno, ketaus) ar metalo ir betono. Sausosio tipo saugyklose numatomas kuro saugojimo laikotarpis yra 40–50 ar daugiau metų, tačiau jos projektuojamos taip, jog kurą būtų galima saugoti ir ilgesnį laikotarpį. Lietuvoje iškrautas iš reaktoriaus PBK laikomas saugojimo baseinuose. Patačius laikiną panaudoto branduolinio kuro saugyklą ir 2017 m. gegužės 4 d. gavus leidimą ją eksploatuoti, kuras, esantis baseinuose, pradėtas krauti į sausosio saugojimo CONSTOR RBMK-1500/M2 tipo konteinerius ir vežamas trumpalaikiam saugojimui.

Trumpalaikis PBK saugojimas patogu tuo, kad per 40–50 m. galima tinkamai pasiruošti PBK ilgalaikiam saugojimui (laidojimui). Be to, per šį laikotarpį PBK radioaktyvumas ir šilumos išsiskyrimas labai sumažėja ir lieka tik apie 10% tik kūrą iš reaktoriaus išimto PBK radioaktyvumo ir likutinės šilumos išsiskyrimo, todėl sumažėja ir reikalavimai, keliami ilgalaikiam saugojimui [29].

Pirminis barjeras, neleidžiantis radioaktyvaus skilimo produktams patekti į aplinką, yra pati kuro tabletė, jos cheminė sudėtis ir forma. Antras barjeras yra kuro apvalkalas, kuris sulaiko skilimo produktus ne tik eksploatacijos, bet ir kuro perkrovimo bei saugojimo metu. PBK transportavimo bei sausojo saugojimo metu kuro apvalkalų struktūriniam vientisumui yra keliami griežti reikalavimai [27, 30], todėl yra svarbu įvertinti ilgalaikius veiksnius. Sausojo saugojimo metu numatomi keli veiksniai, kurie gali pasyviai nulemti kuro apvalkalų suirimą [31, 32]: suirimas dėl plastinių deformacijų (valkšnumas); plyšių susidarymas dėl vidinio dujų slėgio ir eksploatacijos metu susidariusių defektų; įtempties korozinis pleišėjimas; hidridų reorientacija ir hidridinis pleišėjimas. Sąlygos, kurios lemia šiuos veiksnius, priklauso nuo šių pradinių termomechaninio ir fizinio kuro apvalkalo būvių, kada jis patalpinamas projektiniam saugojimo laikotarpiui: temperatūros; įtempių; lydinio cheminės sudėties, įskaitant ir vandenilio koncentracijos, hidridų pasiskirstymo; kuro išdegimo lygio ir kt. Visi šie veiksniai turi mažesnę ar didesnę įtaką kuro apvalkalo suirimui.

Kuro apvalkalų gamybai naudojami bei kuriami įvairių sudėčių cirkonio lydiniai, tačiau šiuo metu dažniausiai sutinkami komercinių kuro apvalkalų lydinų tipai yra šie [13]: Zircaloy-2 (Zry-2); Zircaloy-4 (Zry-4) ir Zr-1Nb. KK daugiausia gaminami naudojant Zr-2.5Nb lydinį [14]. Siekiant pagerinti cirkonio lydinų savybes, cirkonis yra legiruojamas nedideliais kitų elementų kiekiais, keičiama gamybos technologija: keičiami temperatūriniai režimai, pridedamos ar atsisakoma papildomų gamybos operacijų. Visa tai turi įtakos Zr lydinų mechaninėms, irimo tūsumo savybėms ir kt.

1.2. RBMK reaktorių kuro kanalai

RBMK kuro kanalų korpusas – tai suvirinta metalinė konstrukcija, susidedanti iš apatinės, vidurinės ir viršutinės dalių (1.2 pav.) [3]. Vidurinė vamzdžio dalis (11 pozicija) yra pagaminta iš cirkonio 2,5% Nb lydinio. Apatinė ir viršutinė vamzdžio dalys (9, 15 pozicijos) yra pagamintos iš austenitinio plieno 08X18H10T. Vidurinė vamzdžio dalis, kuri yra aktyvioje zonoje, gaminama iš cirkonio lydinio Zr+2,5Nb pagal TMO-2 termomechaninį režimą.

KK vidurinė dalis sujungta su viršutine ir apatine dalimis „plieno-cirkonio“ perėjimų pagalba. Šie perėjimai gauti difuzinio suvirinimo būdu.

Šilumos nuvedimui pagerinti nuo reaktoriaus grafitinio klojinio KK centrinė dalis yra apgaubta 200 mm aukščio grafitiniais žiedais. Žiedai išdėstyti 5360 mm ilgyje grafitinio klojinio blokų skylėse (iš viso yra sudėti 272 žiedai) ir sudėti šalia vienas kito taip, kad vienas iš jų liečia kanalą, o jam gretimas – grafito klojinio bloką (1.3 pav.). Mažiausias tarpas tarp KK ir grafitinio žiedo yra 1,3 mm, o tarp žiedo ir grafitinio klojinio – 1,5 mm. Šie tarpai neleidžia, kad kuro kanalai būtų „užspausti“ dėl radiacinio-terminio grafitinio bloko išsiplėtimo.

KK vamzdis yra patalpinamas viršutiniame ir apatiniame traktuose. KK tvirtinamas prie viršutinio trakto suvirinimo būdu (1.2 pav., 4 pozicija). KK apatinė dalis yra sujungiama su apatiniu traktu per kompensatoriaus mazgą, kuris kompensuoja skirtingą KK ir metalinių konstrukcijų temperatūrinį plėtimąsi, taip pat

ir išilginę (ašinę) deformaciją, susidarantią dėl valkšnumo ir radiacinio poveikio medžiagoms.

Šilumą išskirianti rinklė kanalo viduje pakabinama ant pakabos (5 pozicija). Pakaba turi sandarinantį kamštį (8 pozicija), kuris hermetiškai uždaro KK traktą įdėjus jį į kuro rinklę.

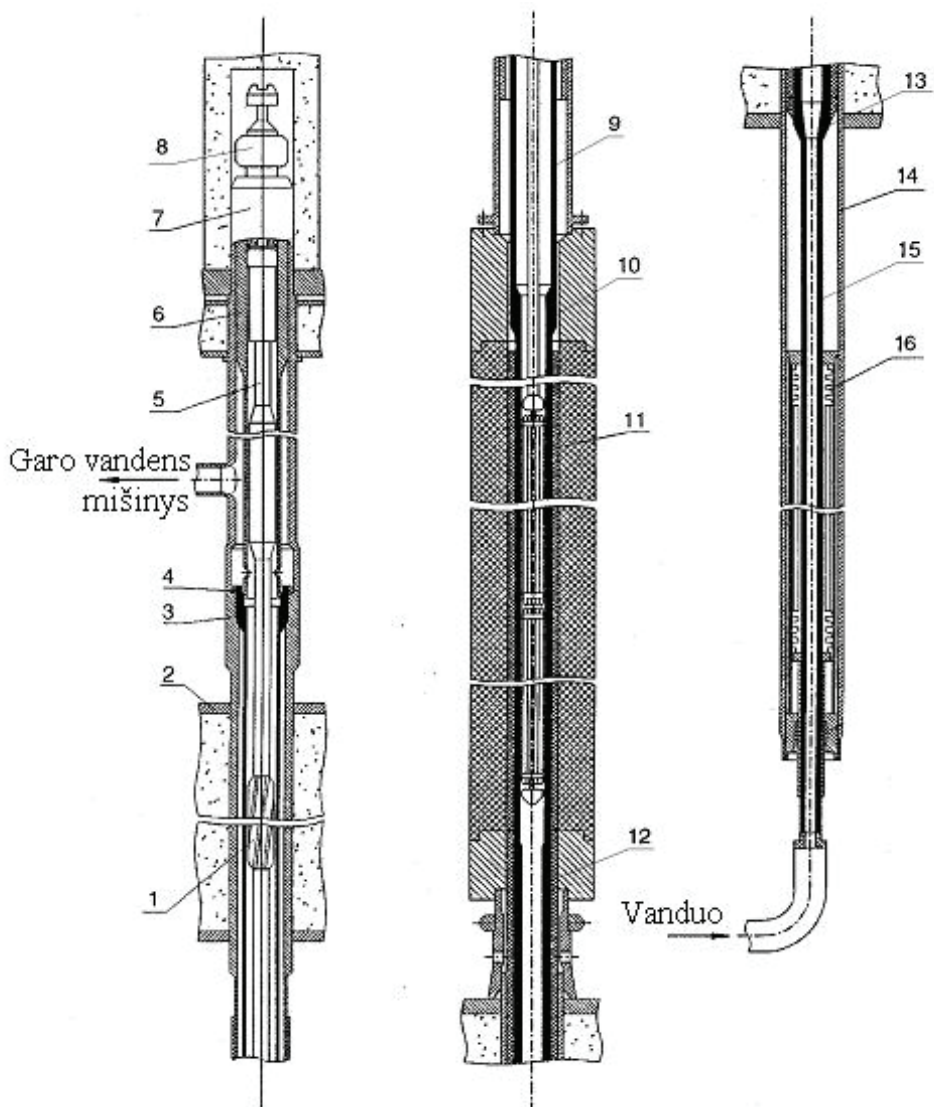
Pagrindiniai KK matmenys pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. IAE kuro kanalų matmenys

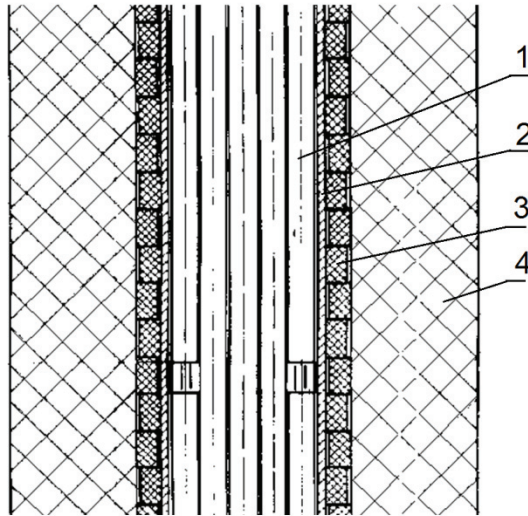
KK pagrindiniai matmenys	Matmuo, mm
KK viršutinės dalies ilgis	4460
KK vidurinės dalies ilgis	8330
KK vidurinės dalies cirkonio vamzdžio ilgis	7950
Vidurinės dalies vidinis skersmuo	79,5
Cirkonio vamzdžio sienelės storis	3,8–4,6
Viršutinio perėjimo „plienas-cirkonis“ ilgis	200
Apatinio perėjimo „plienas-cirkonis“ ilgis	200
Apatinio perėjimo minimalus vidinis skersmuo	72
KK apatinės dalies ilgis	5435
KK apatinės dalies minimalus vidinis skersmuo	49

KK eksploatacijos pagrindiniai parametrai [3]:

- Darbinė temperatūra, ne daugiau – 290 °C;
- Darbinis slėgis – iki 7,8 MPa vamzdžio išorėje;
- Darbinė aplinka KK viduje – vanduo, garo ir vandens mišinys;
- Darbinė aplinka KK išorėje – azoto ir helio mišinys, grafitas;
- Didžiausias KK galingumas – 4250 kW.



1.2 pav. Kuro kanalo konstrukcijos schema: 1 – apsauginis sraigtinis kamštis, 2 – viršutinė plokštė „E“, 3 – KK traktas plokštėje „E“, 4 – atraminė siūlė, 5 – šilumą išskiriančios rinklės pakaba, 6 – viršutinis KK traktas, 7 – KK apkaba, 8 – sandarinimo kamštis, 9 – viršutinė KK dalis, 10 – viršutinis „plienas-cirkonis“ perėjimas, 11 – vidurinė KK dalis, 12 – apatinis „plienas-cirkonis“ perėjimas, 13 – atrama su sraigtu, 14 – apatinis KK traktas, 15 – apatinė KK dalis, 16 – banginiai kompensatoriai [3]



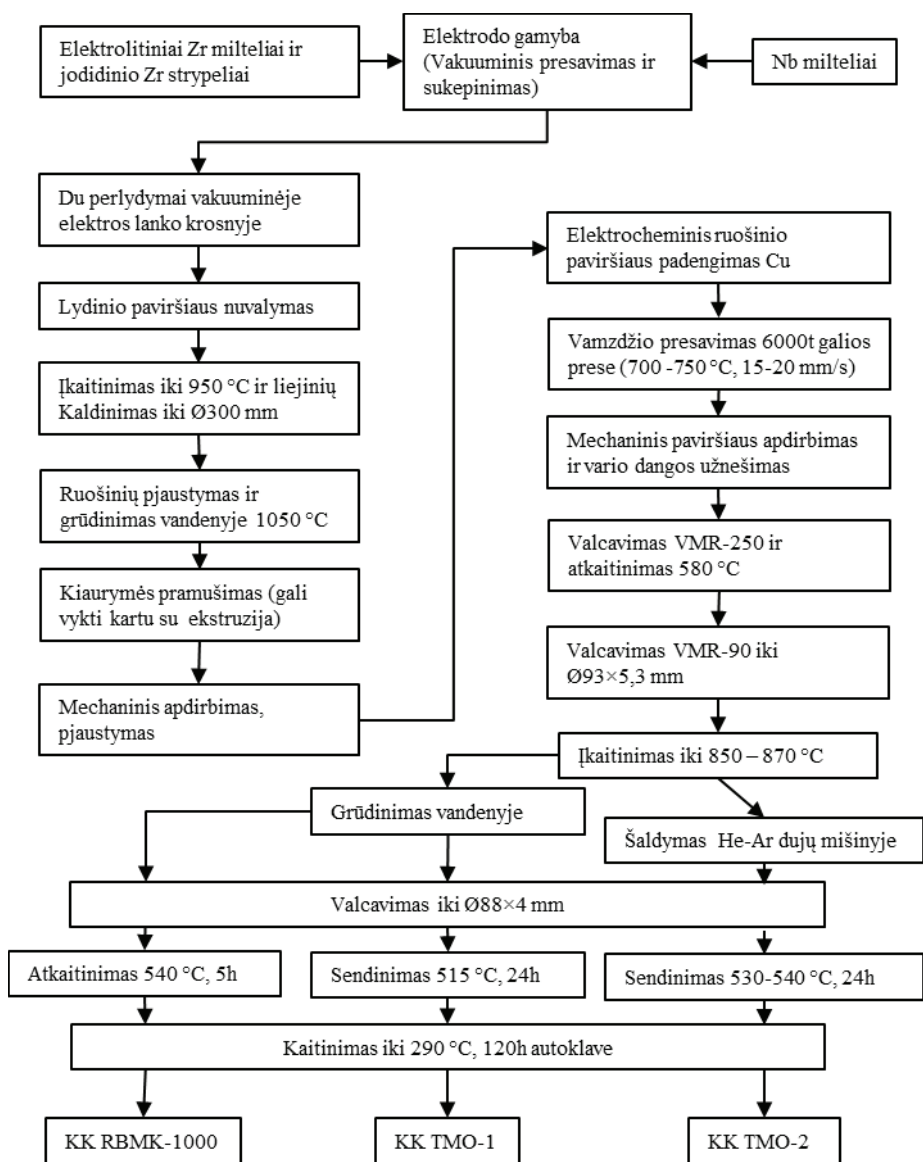
1.3 pav. Kuro kanalo patalpinimo grafitiniame bloke schemas dalis: 1 – branduolinio kuro rinklė, 2 – KK, 3 – grafitiniai žiedai, 4 – grafitinis klojinys [3]

Šilumnešio debitas per KK su šilumą išskiriančiomis rinklėmis neturi viršyti $40 \text{ m}^3/\text{val.}$, kuro perkrovos atveju – ne daugiau $45 \text{ m}^3/\text{val.}$ Šilumnešio debitas per KK su papildomais sugėrikliais – $10\text{--}12 \text{ m}^3/\text{val}$ [3].

Šilumnešio KK kokybė turi atitikti tokius reikalavimus:

- pH esant $25 \text{ }^\circ\text{C}$ – $6,5\text{--}8,0$;
- sąlyginis elektrinis laidumas esant $25 \text{ }^\circ\text{C}$ – ne daugiau $1,0 \text{ mCm/cm}$;
- chlorido-jono koncentracija – ne daugiau 70 mg/dm^3 ;
- kietumas – ne daugiau 5 mg/dm^3 ;
- silicio rūgšties koncentracija – ne daugiau 700 mg/dm^3 ;
- geležies koncentracija – ne daugiau 50 mg/dm^3 ;
- vario koncentracija – ne daugiau 20 mg/dm^3 ;
- naftos produktų koncentracija – ne daugiau 100 mg/dm^3 .

RBMK reaktorių KK Zr-2,5%Nb lydinio slėgio vamzdžių gamybos technologija pateikta 1.4 pav. [14]. Kaip parodyta paveiksle, RBMK reaktorių kuro kanalų RBMK-1000, TMO-1 ir TMO-2 gamybos technologijos yra panašios, skiriasi tik paskutiniai gamybos proceso žingsniai. Įkaitinti KK iki $850\text{--}870 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros grūdinami vandenyje (TMO-1) ar šaldomi He-Ar dujų mišinyje (TMO-2), kai tuo tarpu RBMK-1000 tipo KK ši gamybos proceso operacija neatliekama. Mokslinės literatūros apžvalga (1.5 skyriuje) parodė, kad KK gamybos proceso skirtumai turi ženklia įtaką jų mechaninių savybių skirtumui.

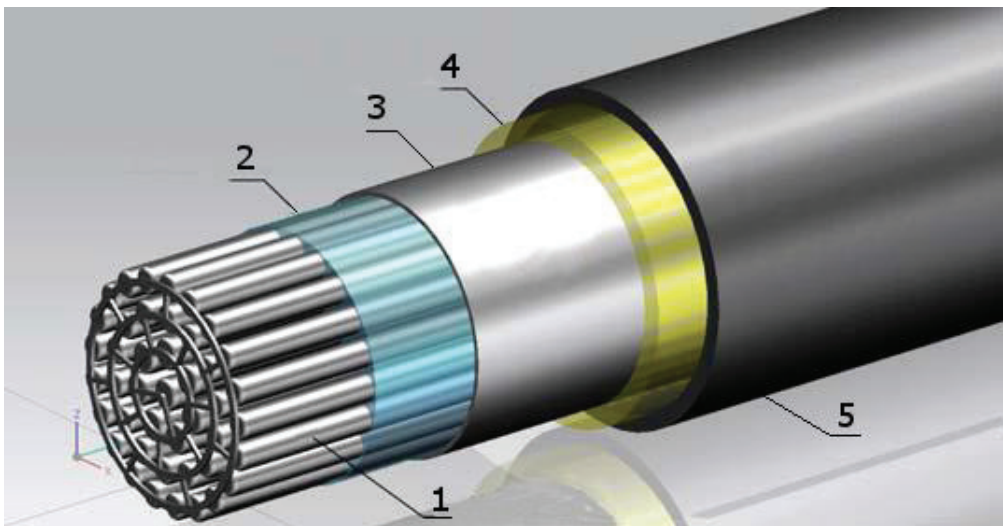


1.4 pav. RBMK reaktoriaus Zr-2,5Nb lydinio KK gamybos technologija [14]

1.3. CANDU reaktorių slėgio vamzdžiai

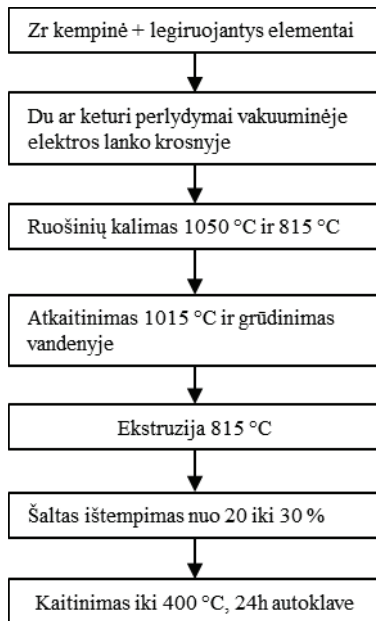
CANDU tipo reaktoriai – tai suslėgto vandens kanalinio tipo reaktoriai. Šio tipo reaktoriai pasižymi tuo, kad kaip kuras yra naudojamas iškastinis uranas [33, 34] be papildomo įsodrinimo. Tam, kad būtų galima naudoti žemo įsodrinimo kurą, greitieji neutronai yra lėtinami sunkiuoju vandeniu. CANDU reaktorių sudaro horizontalus cilindrinės formos indas, vadinamas *calandria*, užpildytas sunkiuoju vandeniu. Indo viduje yra horizontalūs kuro kanalai, kurie tęsiasi per visą indo ilgį ir sudaro

stačiakampės formos tinklelį, kurio žingsnis lygus 0,286 m. Kuro kanalai sudaryti iš Zr-2,5Nb lydinio slėgio vamzdžių, kurie patalpinti Zircaloy-2 lydinio *calandria* vamzdyje. Tarpas tarp vamzdžių yra užpildytas azoto (N₂) arba anglies dvideginio (CO₂) dujomis [35]. Kuro rinklės slėgio vamzdyje yra aušinamos sunkiojo vandens (D₂O) šilumnešiu. Normaliomis darbo sąlygomis slėgio vamzdis, iš išorės yra veikiamas ~300 °C temperatūros ir ~10 MPa slėgio, tačiau *calandria* vamzdis yra veikiamas tik ~60 °C temperatūros ir ~0,2 MPa slėgio [36]. Kuro kanalo paskirtis – izoliuoti suslėgtą, karštą šilumnešį, esantį vamzdžio viduje, nuo vėsaus, nesuslėgto sunkiojo vandens lėtiklio, esančio vamzdžio išorėje. CANDU reaktoriaus konstrukcija yra modulinė, todėl KK skaičius reaktoriuose yra skirtingas, priklausomai nuo pageidaujamos generuojamos galios. CANDU 6 reaktoriai turi 380 kuro kanalų [37]. Kuro kanalo konstrukcija schematiškai pavaizduota 1.5 pav. CANDU kuro kanaluose esantys slėgio vamzdžiai savo paskirtimi atitinka RBMK reaktorių KK. Slėgio vamzdžio vidinis skersmuo – 104 mm, sienelės storis – 4,3 mm [14].



1.5 pav. CANDU reaktoriaus kuro kanalo konstrukcija: 1 – kuro rinklė, 2 – šilumnešis, 3 – slėgio vamzdis, 4 – dujos, 5 – *calandria* vamzdis [38]

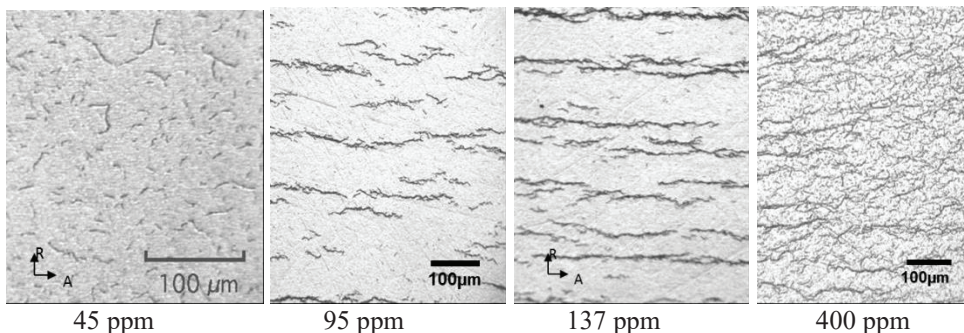
Kaip ir RBMK kuro kanalai, CANDU reaktorių slėgio vamzdžiai gaminami iš Zr-2,5Nb lydinio, tačiau CANDU slėgio vamzdžių gamybos technologija ir terminis apdirbimas skiriasi nuo RBMK KK. Palyginus RBMK KK ir CANDU slėgio vamzdžių gamybos technologijas (1.4 ir 1.6 pav.) matyti, kad mechaninis apdirbimas skirtingas, nors gamybos metu išlaikomi panašūs temperatūriniai režimai. Tačiau svarbiausias terminis apdirbimas gamybos pabaigoje yra skirtingas: RBMK KK yra sendinami arba atkaitinami temperatūroje, aukštesnėje nei 500 °C, kai tuo tarpu CANDU slėgio vamzdžiai kaitinami tik iki 400 °C. Medžiagų terminis apdirbimas esant skirtingoms temperatūroms gali turėti įtakos gamybos proceso metu susidariusių liekamųjų įtempių atleidimui bei skirtingų kristalinių gardelių susidarymui [39].



1.6 pav. CANDU reaktoriaus Zr-2,5Nb lydinio KK gamybos technologija [14]

1.4. Hidridai cirkonio lydiniuose

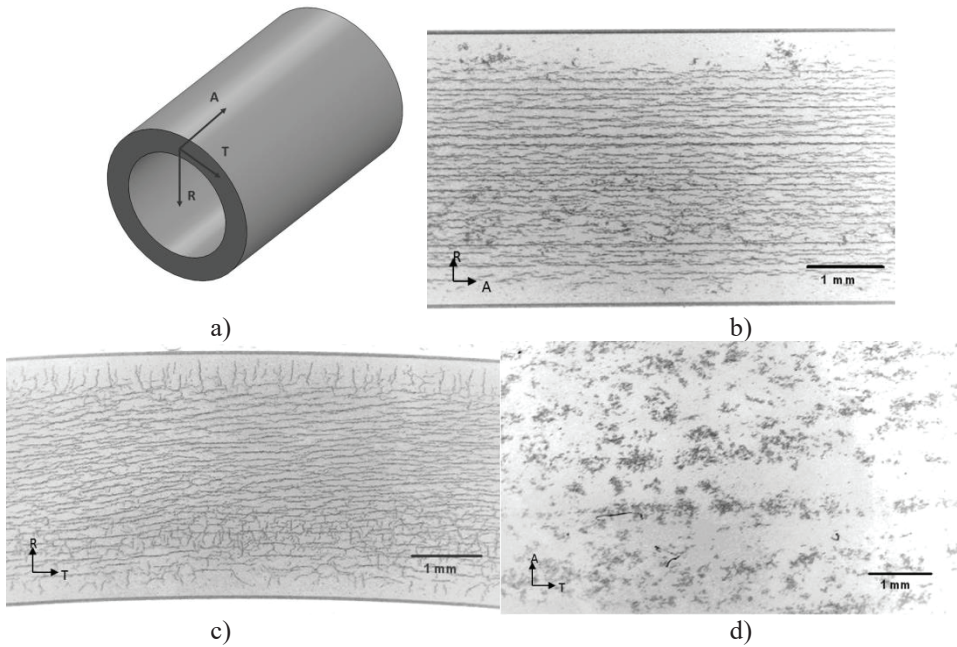
Lietuvos energetikos instituto mokslininkai, tyrinėdami Zr-2,5Nb kuro kanalus [40], nustatė, kad esant mažoms, iki 45 ppm, vandenilio koncentracijoms cirkonio hidridai lydinyje išsidėsto chaotiškai. Didėjant vandenilio koncentracijai atsiranda dėšningumas, o koncentracijai pasiekus dideles reikšmes (400 ppm) susidaro tankus, visomis kryptimis orientuotas hidridų tinklas aplink cirkonio lydinio grūdelius. 1.7 pav. pateikti Zr-2,5Nb lydinio su TMO-2 termomechaniniu apdirbimu mikrostruktūros pavyzdžiai esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms.



1.7 pav. Mikrostruktūra ir cirkonio hidridų pavyzdžiai TMO-2 lydinio Zr-2,5Nb kuro kanale esant skirtingai vandenilio koncentracijai

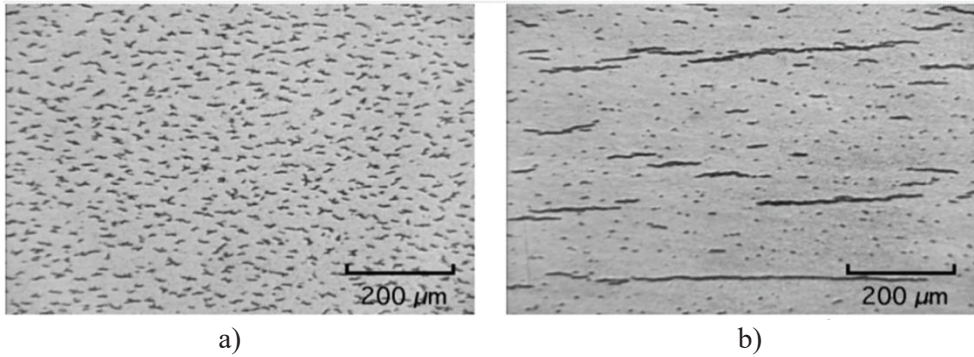
1.8 pav. pavaizduota cirkonio hidridų orientacija KK vamzdyje. Iš paveikslo matyti, kad susidarančių hidridų forma primena netaisyklingos formos plokšteles, kurių plokštuma sutampa su TMO-2 KK vamzdžio ašine-tangentine (A-T) plokštuma.

Tokios formos hidridai ašinėje-tangentinėje ir tangentinėje-radialinėje plokštumose (1.8 pav. b ir c) matomi kaip siauros pailgos juostelės. Iš 1.8 pav. c taip pat matyti, kad KK vamzdžio pasienio ruože hidridai linkę formuotis taip, kad jų plokštuma sutaptų su vamzdžio ašine-radialine (A-R) plokštuma. Tokia hidridų orientacija rodo, kad cirkonio lydinio kristalografinė struktūra yra nevienoda per visą sienelės storį.



1.8 pav. Cirkonio hidridų orientacija Zr-2,5Nb lydinio TMO-2 KK esant 137 ppm vandenilio koncentracijai: a) koordinacių ašių orientacija KK vamzdyje; b) ašinėje-radialinėje plokštumoje; c) tangentinėje-radialinėje plokštumoje; d) ašinėje-tangentinėje plokštumoje

Dar vienas svarbus dalykas, apibrėžiantis cirkonio hidridus, yra jų dydis: ilgis, storis, plotis, tūrinė dalis ir t. t. Hidridų dydis esant tai pačiai vandenilio koncentracijai turi įtakos medžiagų savybėms. Susidarančių hidridų ilgis cirkonio lydiniuose priklauso ne tik nuo lydinio cheminės sudėties, tačiau ir nuo lydinio aušinimo greičio. Moksliniais tyrimais įrodyta, kad staigiai aušinant cirkonio lydinį, prisotintą vandenilio, susidaro trumpesnės (mažesnės), tačiau storesnės hidridų plokštelės [41, 42]. LEI mokslininkų atlikti tyrimai (1.9 pav.) [40] patvirtina kitų mokslininkų tyrimus.

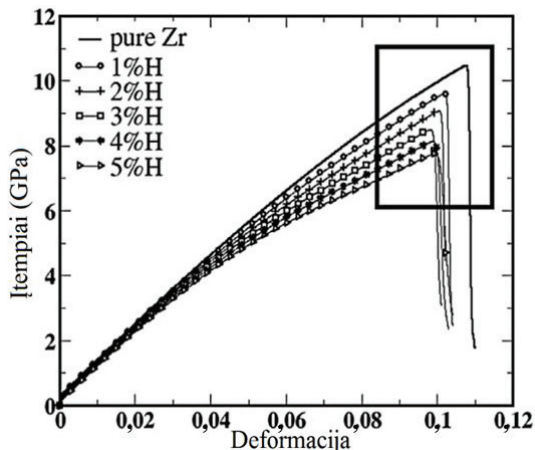


1.9 pav. Zr-2,5Nb lydinio hidridų geometrija esant skirtingam aušinimo greičiui:
a) 9000 °C/val; b) 9 °C/val [40]

1.5. Vandenilio prisotintų cirkonio lydinių savybės

Cirkonio lydiniai branduolinėje energetikoje naudojami tokių svarbių komponentų, kaip kuro apvaskalų bei kuro kanalų gamyboje, todėl jie yra plačiai tyrinėjami. Ypač svarbus aspektas yra jų savybių kitimas veikiant įvairiems išoriniams veiksniams, lemiantiems medžiagų senėjimo mechanizmus, įskaitant ir vandenilio absorbciją. Cirkonio ir jo lydinių savybės tyrinėjamos jau daug metų, o aktualumui išliekant moksliniai tyrimai yra atliekami ir pastarąjį dešimtmetį.

Chakraborty ir kt. [43] atliko tyrimą ir pademonstravo, kaip kinta gryno cirkonio savybės priklausomai nuo vandenilio koncentracijos (1.10 pav.). Cirkonis buvo įsotinamas vandenilio iki 1–5 % koncentracijos. Tyrimų metu nustatyta, kad cirkonio stiprumo riba, kurią pasiekus medžiaga suyra, didėjant vandenilio koncentracijai mažėja: vandenilio koncentracijai pasiekus 5 %, cirkonio stiprumo riba sumažėja apie 30 % lyginant su neįsotinto vandeniliu. Deformacijos, kurioms esant įvyksta cirkonio suirimas, didėjant vandenilio koncentracijai taip pat mažėja, tačiau ne taip ženkliai, kaip stiprumo riba: vandenilio koncentracijai pasiekus 5 % deformacijos sumažėja apie 10 %.



1.10 pav. Gryno cirkonio įtempčių-deformacijų kreivės esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms [43]

Silva ir kt. [44] atliko Zr-2,5Nb lydinio, naudojamo CANDU branduoliniuose reaktoriuose, tyrimus. Tirta medžiaga įsigyta plokštelės formos iš gamintojo ATI Wah Chang (JAV). Lydinys gamykloje buvo termiškai apdirbtas, t. y. atliekamas terminis atleidimas ir staigus ataušinimas lydiniiui esant β fazėje. Vėliau medžiaga laboratorijoje buvo išotinta vandeniliu ir atlikti eksperimentiniai tempimo bandymai. Palyginus gautos medžiagos bei išotintos vandeniliu iki 285 ppm bandymų rezultatus pastebėta, kad lydinio takumo riba bei stiprumo riba tokiam atvejui pakinta nežymiai. Didesnis stiprumo ribos pokytis (22 % sumažėjimas) užfiksuotas, kai vandenilio koncentracija yra 320 ppm. Išotinimas vandeniliu didesnę įtaką turi deformacijoms, kurioms esant medžiaga pasiekia stiprumo ribą ar įvyksta medžiagos suirimas. Esant 285 ppm vandenilio koncentracijai, stiprumo ribos deformacijos sumažėjo 65%, lyginat su vandeniliu neįsotintos medžiagos stiprumo ribos deformacijomis, o 320 ppm atveju – net iki 81%. Indijos mokslininkų Bind ir kt. [45], kurie tyrė Indijos branduolinės energetikos korporacijos pateiktą Zr-2,5Nb lydinio slėgio vamzdį, gauti panašūs rezultatai. Nustatyta, kad vandenilis takumo ir stiprumo riboms turi nedidelę įtaką, tačiau ženklia – deformacijoms (vandenilio koncentracijai padidėjus iki 199 ppm, stiprumo ribos plastinės deformacijos sumažėja iki 40%). Įdomu tai, kad Bind ir kt. tyrimai atlikti ir esant aukštesnėms temperatūroms (iki 300 °C). Nustatyta, kad panašaus dydžio plastinių deformacijų sumažėjimas vyksta visame temperatūros intervale $25\text{ °C} \leq T \leq 300\text{ °C}$. Šie tyrimai patvirtina, kad cirkonis ir jo lydiniai absorbuodami vandenilį praranda plastiškumą, tampa trapesni. Net ir esant aukštesnėms temperatūroms, kai dalis cirkonio hidridų ištirpsta, plastiškumas praktiškai nekinta. Trapios medžiagos yra mažiau atsparios irimui, o sumažėjęs medžiagos plastiškumas turi didelę įtaką cirkonio lydinio irimo tūsumui.

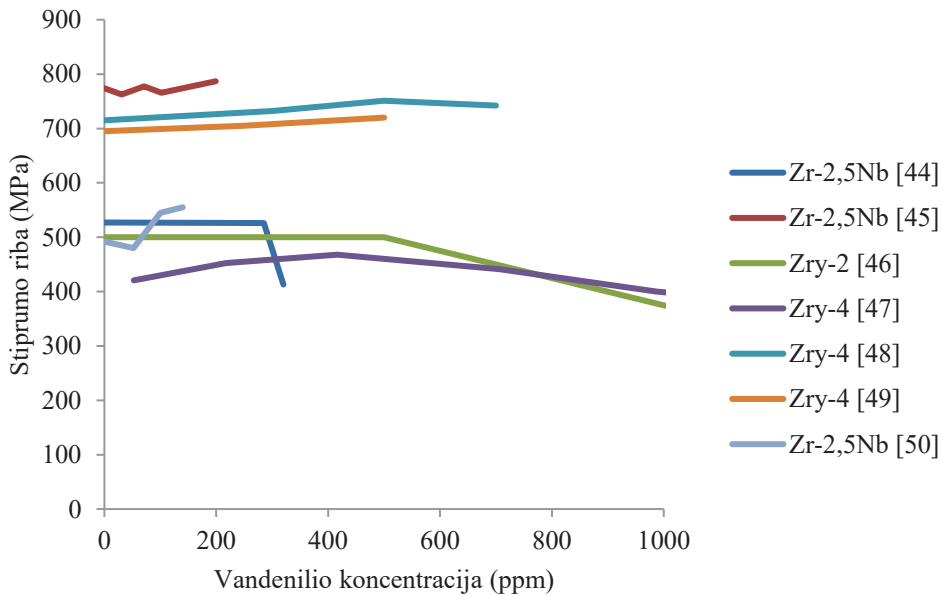
Vieni iš pirmųjų Zry-2 lydinio tyrimų [46] parodė, kad kuro apvalkų medžiagos stiprumo riba iki 500 ppm vandenilio koncentracijos išlieka pastovi eksperimentinių duomenų sklaidos ribose. Tačiau koncentracijai viršijus 500 ppm Zry-2 stiprumo riba pradeda ženkliai mažėti. Bandinių pailgėjimo priklausomybės nuo vandenilio koncentracijos rezultatai išsibarstė gana plačiose ribose, tačiau vis tiek stebima pailgėjimo sumažėjimo tendencija vandenilio koncentracijai viršijus 100 ppm.

Zry-4 savybių priklausomybės nuo vandenilio koncentracijos tyrimu metu [47] buvo užfiksuotas įdomus stiprumo ribos pokytis. Didėjant vandenilio koncentracijai iki 400 ppm Zry-4 stiprumo riba padidėjo apie 10 %, o vandenilio koncentracijai viršijus 400 ppm stiprumo riba ėmė mažėti. Koncentracijai pasiekus 1500 ppm stiprumo riba nukrito 10 % žemiau pradinės reikšmės. Įdomu ir tai, jog visame vandenilio koncentracijos diapazone stebimas nuoseklus Zry-4 takumo ribos didėjimas. Nepaisant stiprumo ir takumo ribų didėjimo, bandinio pailgėjimas, didėjant vandenilio koncentracijai, mažėjo. Vėlesni Zry-4 mechaninių savybių tyrimai atlikti kuro apvalko žiedine kryptimi [48, 49]. Abu minėti tyrimai atlikti ne tik kambario, tačiau ir esant aukštesnėms temperatūroms. Kim ir kt. [48] mokslininkų atliktų tyrimų metu, kaip ir vienu iš pirmųjų kuro apvalko tyrimų [47], nustatyta, kad didėjant vandenilio koncentracijai Zry-4 stiprumo riba didėja. Vandenilio koncentracijai viršijus 500 ppm ribą, stiprumo riba pradeda mažėti. Tačiau toks stiprumo ribos pokytis stebimas tik kambario temperatūroje. Tyrimus atliekant aukštesnėje

temperatūroje (350 °C ir 500 °C) tokio reiškinio nenustatyta, buvo stebimas nuoseklus stiprumo ribos mažėjimas. Jang ir Kim [49] tyrimai taip pat parodė stiprumo ribos didėjimą didėjant vandenilio koncentracijai. Aukštesnėse temperatūrose Zry-4 stiprumo riba priklausomai nuo vandenilio koncentracijos didėjo netgi labiau, nei kambario temperatūroje. Jang ir Kim taip pat tyrė ir iradijuoto Zry-4 lydinio savybių priklausomybę nuo vandenilio koncentracijos. Gauta priešinga iradijuoto lydinio stiprumo ribos priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos lyginant su neiradijuotu, t. y. stiprumo riba didėjant vandenilio koncentracijai sumažėjo, o didžiausias pokytis, kuris siekė net 40 %, nustatytas kambario temperatūroje.

2008 metais buvo atlikti Zr-2,5Nb lydinio TMO-2 KK eksperimentiniai tyrimai [50]. Jų metu buvo stebimas takumo ir stiprumo ribos padidėjimas didėjant vandenilio koncentracijai lydinyje. Kaip ir anksčiau aprašytuose tyrimuose gauta, kad medžiagos deformacijos sumažėja. Vandenilio koncentracijai pakitus nuo 0 iki 140 ppm, santykinis bandinio pailgėjimas jo trūkimo metu sumažėjo apie 13 %.

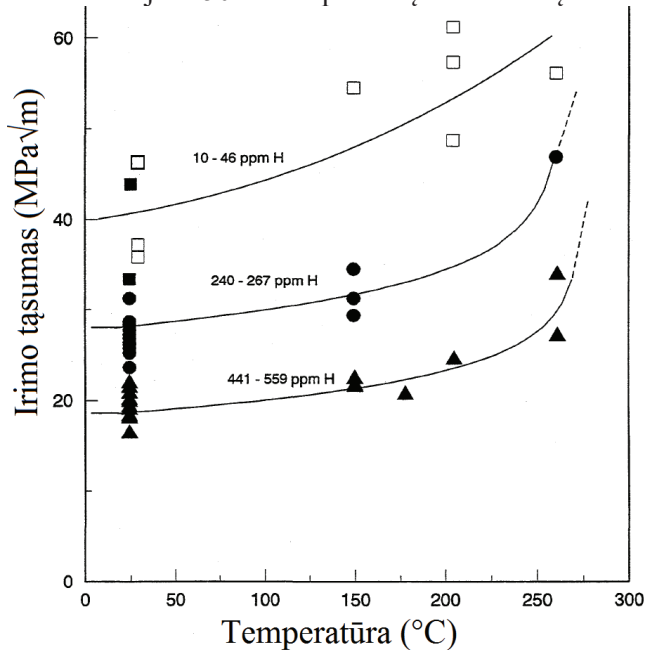
Minėtų cirkonio lydinų eksperimentinių tyrimų rezultatų apibendrinimas pateiktas 1.11 pav. Palyginus skirtingų cirkonio lydinų stiprumo ribos priklausomybę nuo vandenilio koncentracijos, matyti, kad daugumos tyrimų atveju medžiagos stiprumo riba didėja iki 400–500 ppm vandenilio koncentracijos. Vandenilio koncentracijai viršijus 500 ppm ribą stiprumo riba pradeda mažėti.



1.11 pav. Įvairių cirkonio lydinų stiprumo ribos priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos

Kaip parodė mokslinėse publikacijose aprašyti tyrimai, cirkonio lydiniams absorbavus vandenilį ne tik pakinta jų takumo ir stiprumo ribos, tačiau ir sumažėja plastiškumas. Sumažėjęs medžiagos plastiškumas turi didelę įtaką medžiagos irimui, t. y. irimo tūsumui. Todėl mokslinėje literatūroje galima rasti tyrimų, kuriuose

nagrinėjama vandenilio įtaka cirkonio lydinių kritiniam įtempių intensyvumo koeficientui bei kritiniam J-integralui. Kreyns ir kt. [51] pademonstravo, kaip Zry-4 lydinio kritinis įtempių intensyvumo koeficientas keičiasi priklausomai nuo vandenilio koncentracijos ir temperatūros (1.12 pav.). Iš paveikslo aiškiai matyti, kad vandenilis turi įtaką Zry-4 įtempio intensyvumo koeficientui net ir aukštesnėje temperatūroje. Tačiau viršijus 250 °C temperatūrą vandenilio įtaka ženkliai mažėja.



1.12 pav. Zry-4 irimo tūšumo priklausomybė nuo temperatūros esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms [51]

Simpson ir Cann [52] atliko gryno cirkonio ir Zr-2,5Nb lydinio įtempių intensyvumo koeficiento tyrimus priklausomai nuo didelių vandenilio koncentracijų. Nustatyta tiesinė gryno cirkonio įtempių intensyvumo koeficiento priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos, kai tuo tarpu Zr-2,5Nb lydinio įtempių intensyvumo koeficiento pokytis labiausiai atitiko logaritminę funkciją. Visais atvejais įtempių intensyvumo koeficientų skaitinė reikšmė didėja mažėjant vandenilio koncentracijai. Tačiau Zr-2,5Nb įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės gautos mažesnės, nei gryno cirkonio. Tai buvo stebima eksperimentus atliekant tiek kambario tiek ir 300 °C temperatūroje. Kambario temperatūroje nustatytos Zr-2,5Nb lydinio įtempių intensyvumo reikšmės (K_{IC}) kito nuo 18 iki 2 MPa√m, o 300 °C temperatūroje nuo 39 iki 2 MPa√m. Tačiau reikia pabrėžti, kad Simpson ir Cann tyrimai atlikti esant ypač didelėms vandenilio koncentracijoms, kai vandenilio ir cirkonio atomų santykis (H/Zr) kito nuo 0,1 iki 1,6.

Daunio ir kt. [50] atlikti Zr-2,5Nb lydinio, naudojamo KK gamybai, tyrimai parodė, kad vandenilio koncentracijai padidėjus iki 140 ppm medžiaga išlieka gana plastiška. Todėl nustatytos tik sąlyginės įtempių intensyvumo koeficiento K_Q ir K_C^* reikšmės. K_Q reikšmė sumažėjo 9 %, t. y. nuo 33 iki 30 MPa√m, o K_C^* sumažėjo 25 %

nuo 60 iki 45 MPa \sqrt{m} . Nepavykus nustatyti kritinių įtempio intensyvumo koeficiento reikšmių, tirtas plastišką suirimą nusakantis J-integralas ir nustatytos kritinės jo reikšmės. Tyrimų metu vandenilio įtaka stebima tiek kambario, tiek ir aukštesnėje temperatūroje. Vis tik didžiausias pokytis kritiniam J-integralui (J_{IC}) nustatytas kambario temperatūroje, kai J_{IC} reikšmė pakito nuo 95 iki 15 kN/m. 170 °C temperatūroje stebimas 18 % J_{IC} reikšmės sumažėjimas (nuo 66 iki 54 kN/m). 300 °C temperatūroje nustatytas nežymus J_{IC} reikšmės pokytis. Didėjant vandenilio koncentracijai kritinė J-integralo reikšmė kito nuo 84 iki 82 kN/m.

Hsu [53] tyrė Zry-4 lydinio J-integralo priklausomybę nuo vandenilio koncentracijos, tačiau nustatė ne J_{IC} reikšmę, bet J_{max} , kuri randama kompaktinio bandinio tempimo metu užfiksuotos didžiausios tempimo jėgos momentu (nesutampa su J_{max} apibrėžimu pagal ASTM standartą [54]). Hsu kuro apvalkalo medžiagos tyrimus atliko kambario ir 300 °C temperatūrose, o vandenilio koncentracija lydinyje siekė nuo 0 iki 1118 ppm. Nustatytas J_{max} reikšmių kitimas priklausomai nuo vandenilio koncentracijos turėjo logaritminę priklausomybę. Kambario temperatūroje Zry-4 lydinio be vandenilio didžiausia nustatyta J_{max} reikšmė siekė 122 kN/m, o esant 1118 ppm vandenilio koncentracijai J_{max} reikšmė sumažėjo iki 19 kN/m. 300 °C temperatūroje taip pat buvo fiksuojamas pokytis nuo 97 iki 77 kN/m esant vandenilio koncentracijai 657 ppm. Hsu, palyginęs plyšio viršūnes Zry-4 lydinio be vandenilio ir esant 500 ppm vandenilio koncentracijai, pastebėjo, kad dėl vandenilinio sutrapėjimo prieš padidėjant plyšiui plastinių deformacijų zona yra mažesnė, dėl ko sumažėja ir potencinės energijos kiekis. Kadangi J-integralas – tai parametras, nusakantis deformacijos energijos išlaisvinimo greitį, jis priklauso nuo potencinės energijos kiekio pokyčio. Hsu taip pat iškėlė klausimą dėl sumažėjusios vandenilio koncentracijos įtakos aukštesnėje temperatūroje. Autorius linkęs pritarti Simpson ir Cann [52] nuomonei, kad vandenilio įtaka, esant didesnei nei 150 °C temperatūrai, pirmiausia sumažėja dėl padidėjusio cirkonio matricos plastiškumo, bet ne dėl pagerėjusių cirkonio hidridų savybių.

Bind ir kt. [55] taip pat atliko Zr-2,5Nb lydinio, naudojamo suslėgto sunkiojo vandens reaktoriuje slėgio vamzdžio Indijos branduolinėje elektrinėje gamybai, J-integralo tyrimus, esant kambario ir aukštesnėms temperatūroms, taip pat esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms. Atlikę tyrimus šio darbo autoriai priėjo prie panašių išvadų, kaip ir anksčiau aprašytų tyrimų autoriai, ištyrę kitus cirkonio lydinius: kambario temperatūroje vandenilio koncentracijos įtaka labiausiai juntama nuo 0 iki 30 ppm, vandenilio koncentracijai dar labiau didėjant, nustatytos $J_{0,15}$, J_Q , J_{max} ir $J_{1,5}$ reikšmės mažėja, tačiau neženkliai; J-integralo priklausomybės nuo temperatūros grafikas visiems bandiniams, įsotintiems vandeniliu, yra S formos pobūdžio, kur viršutinės aikštelės riba yra apie 200 °C, o kinta tik apatinės aikštelės riba; plyšiai Zr-2,5Nb lydinio slėgio vamzdyje dėl vandenilinio sutrapėjimo linkę formotis vamzdžio ašine kryptimi.

1.6. Vandenilio degradacinis poveikis ir lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmas cirkonio lydinuose

Šiuo metu mokslinėje literatūroje yra aptariami keli vandenilio susidarymo branduoliniuose reaktoriuose bei jo absorbcijos cirkonio lydinuose mechanizmai [13, 56, 57]:

- Vandenilis arba deuteris susidaro cirkonio lydinio korozijos vandenyje metu kuro apvalkalui, KK ar slėgio vamzdžiui kontaktuojant su lengvuju ar sunkiuoju vandeniu ir yra absorbuojamas Zr lydinio: $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ arba $Zr + 2D_2O \rightarrow ZrO_2 + 2D_2$;

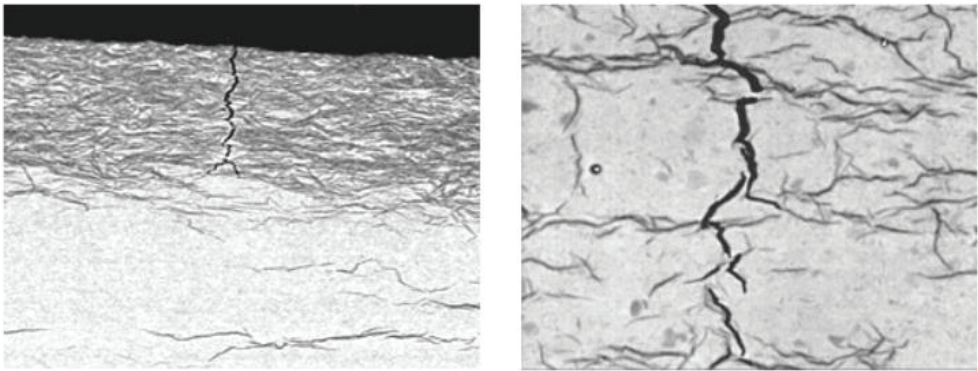
- Šilumnešio skilimas dėl radiolizės bei Zr lydinio absorbcija: $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ arba $2D_2O \rightarrow 2D_2 + O_2$;

- Vandenilio difuzija per metalinį ryšį su kitu metalu, kuriame vandenilis yra aktyvesnėje būsenoje;

- Katodiškai poliarizuojant cirkonį elektrolite;

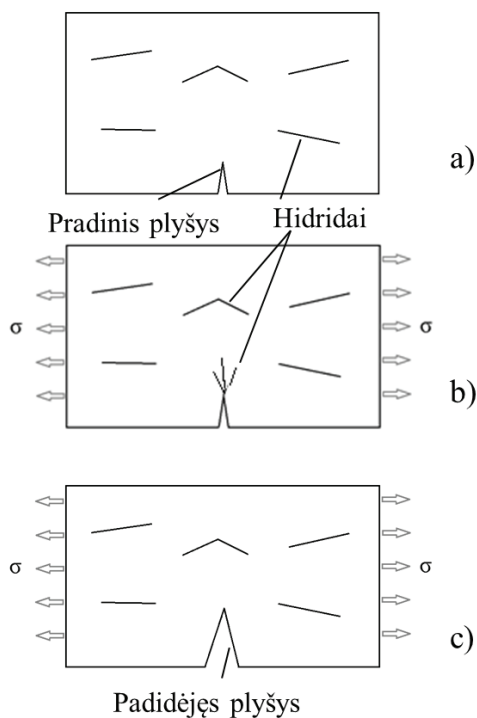
- Kuro apvalkalų, KK ar slėgio vamzdžių gamybos procese.

Visi išvardyti mechanizmai vyksta branduoliniuose reaktoriuose. Patekęs į cirkonio lydinį vandenilis daro neigiamą įtaką jo savybėms: vandenilis sukelia bendrą medžiagos trapumą [43, 58, 59]. Bendras (visos medžiagos) trapumas padidėja dėl tolygiai pasiskirsčiusių hidridų lydinyje. 1.13 pav. pavaizduotas trapios irimo pavyzdys cirkonio lydinyje dėl vandenilio absorbcijos. Pakanka ganėtinai mažos hidridų koncentracijos, kad pablogėtų cirkonio lydinio plastinės savybės. Vandenilis turi ženkliai įtaką cirkonio lydinio irimo tūsumui (1.12 pav.), kuris nusako trapųjį medžiagos irimą, tačiau temperatūrai viršijus 250 °C ši įtaka ženkliai sumažėja.



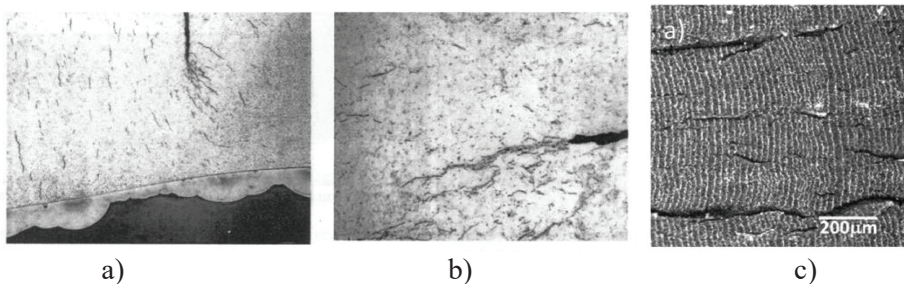
1.13 pav. Hidridų sukeltas trapus irimas [59]

Cirkonio lydinio lokalinis trapumas sukeltas lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmo (1.1 lent.). Lokalinių trapumą sukelia vandenilio migracija tempimo įtempių gradientu kryptimi ir priešinga temperatūros gradientui kryptimi. Lokaliai susidarius pakankamai vandenilio koncentracijai, susiformavę cirkonio hidridai, lokaliai sumažina lydinio atsparumą irimui ir suformuoja plyšį, arba, esant pradiniam defektui, plyšį padidina. Tuomet, pasikeitus įtempių koncentracijos vietai medžiagoje, procesas kartojasi. LHP mechanizmas schematiškai pavaizduotas 1.14 pav.



1.14 pav. Lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmas: a) cirkonio lydiny su hidridais ir pradiniu plyšiu; b) vandenilio migracija ir hidridų formavimasis plyšio viršūnėje; c) pradinio plyšio padidėjimas

1.15 a ir b pav. pateikti LHP pavyzdžiai CANDU ir RBMK reaktorių Zr-2,5Nb lydiniuose. Paveikluose matyti kaip formuojasi cirkonio hidridai prie plyšio viršūnės. 1.15 c pav. pateiktas Sunil ir kt. [60] autorių užfiksuotas žingsninis plyšio augimas LHP proceso metu Zr-2.5Nb slėgio vamzdyje.

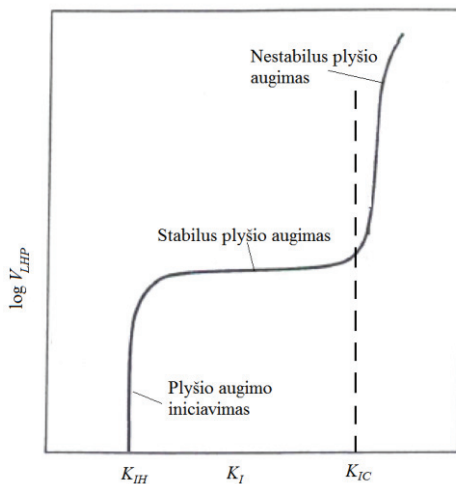


1.15 pav. Hidridų klasterio formavimasis prie plyšio viršūnės: a) CANDU slėgio vamzdyje; b) RBMK TMO-2 KK vamzdyje; c) žingsninio plyšio augimo pavyzdys [60]

Remiantis Lietuvos energetikos instituto mokslininkų atliktais tyrimais bei sukaupta medžiaga, susijusia su cirkonio lydinių pleišėjimu [61–63], lėtinį hidridinį pleišėjimą apibūdina šios savybės:

- Vandenilis iš cirkonio matricos mažų įtempių zonos difunduoja prie defekto / plyšio viršūnės, t. y. link didesnių įtempių zonos;
- Hidridai prie plyšio orientuojasi statmenai įtempių plokštumai;
- Ilgainiui prie plyšio viršūnės susiformuoja hidridų klasteris;
- Esant kritinei hidridų koncentracijai įvyksta staigus hidridų ir cirkonio lydinio tarp hidridų irimas;
- Staigus padidėjimo metu plyšio viršūnė perauga hidridų klasterį, patenka į plastišką cirkonio matricą ir sustoja;
- Procesas kartojasi, todėl LHP mechanizmas vyksta žingsniais;
- Kiekvienam žingsniui reikalingas laikas kritinei hidridų koncentracijai plyšio viršūnėje susidaryti;
- Didėjant temperatūrai trumpėja ir hidridų klasterio susidarymo laikas, tokiu būdu LHP greitis didėja;
- Įtempių intensyvumo koeficientas, kuriam esant vyksta LHP, gali būti daugiau nei 6 kartus mažesnis už cirkonio lydinio kritinį įtempių intensyvumą K_{IC} , kurį pasiekus įvyksta nekontroliuojamas bendrasis medžiagos suirimas.

LHP mechanizmas gali vykti tik tam tikrose įtempių intensyvumo koeficiento K_I ribose. 1.16 pav. pavaizduota, kad LHP gali vykti, kai $K_{IH} < K_I < K_{IC}$ [14]. Kai plyšio viršūnėje $K_I < K_{IH}$ hidridų klasteris nesiformuoja ir LHP nevyksta, įtempių intensyvumo koeficientui plyšio viršūnėje viršijus kritinę reikšmę K_{IC} įvyksta bendras cirkonio lydinio suirimas.



1.16 pav. LHP greičio (V_{LHP}) priklausomybė nuo įtempių intensyvumo koeficiento K_I [14]

Slenkstinė įtempių intensyvumo reikšmė (K_{IH}), kurią viršijus vyksta lėtinis hidridinis pleišėjimas, Zr-2.5Nb ir Zry cirkonio lydiniams kinta nuo 4 iki 16 MPa \sqrt{m} [64–66]. Tokios cirkonio lydinių K_{IH} reikšmės yra ženkliai mažesnės už jų kritinį įtempių intensyvumo koeficientą K_{IC} (1.12 pav.), kurią viršijus vyksta staigus bendras lydinio suirimas.

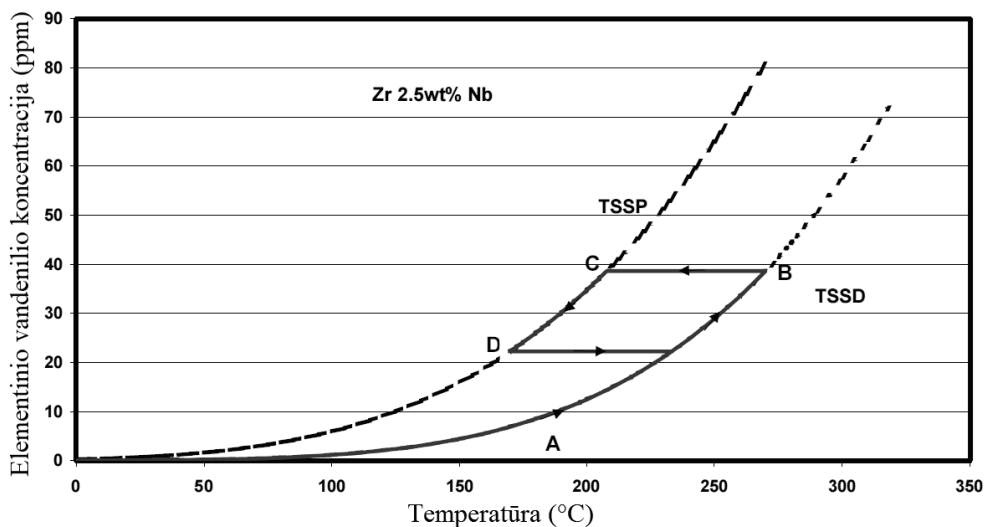
Moksliniais tyrimais nustatyta, kad LHP greitis priklauso nuo geometrijos, vandenilio difuzijos ir tirpumo cirkonio lydinyje, vandenilio tūrinės dalies hidride,

hidrostatinių įtempių tarp plyšio viršūnės ir hidridų skirtumo, tačiau didžiaja dalimi priklauso nuo temperatūros [14] ir gali būti išreikštas lygtimi:

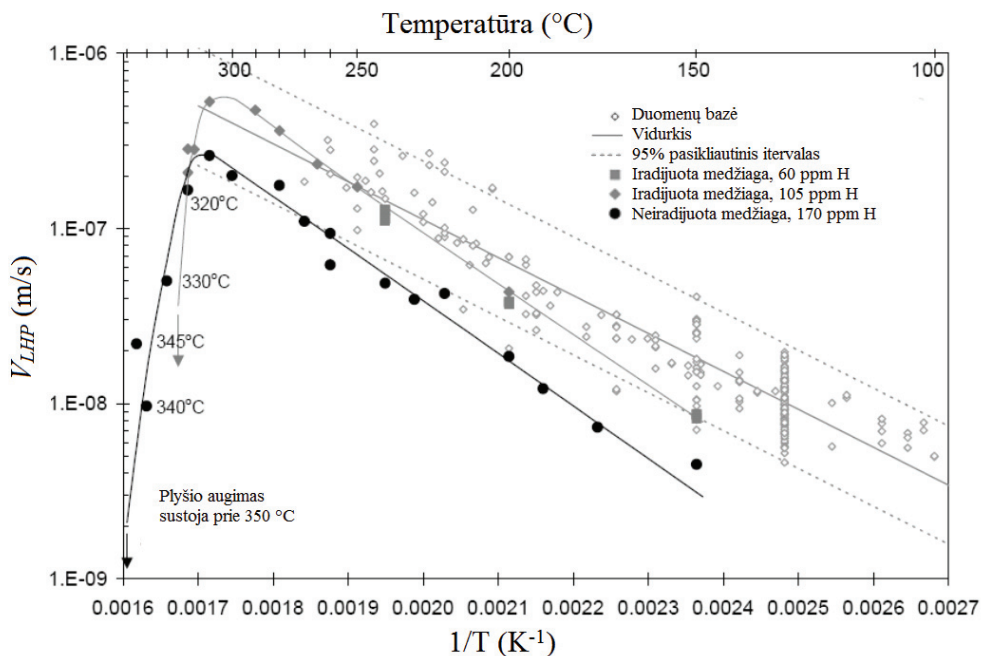
$$V_{LHP} = GD_H C_H \cdot \exp\left(\frac{hV_H \Delta p}{RT}\right) \quad (1)$$

čia G – funkcija, apjungianti geometrijos koeficientą, cirkonio ir hidrido molinį tūrį, hidrido sudėtį; D_H – hidrido difuzijos koeficiento funkcija nuo temperatūros; C_H – vandenilio tirpumas cirkonio matricoje; hV_H – vandenilio molio tūrinė dalis cirkonio hidride; Δp – hidrostatinių įtempties įtempių tarp plyšio viršūnės ir hidridų skirtumas; R – universalioji dujų konstanta; T – temperatūra.

Kita LHP skatinanti ypatybė yra ta, kad vandenilio ištirpimui ir hidridų iš kietojo tirpalo susidarymui cirkonio matricoje būdinga histerezė [41, 67]. Kaitinant cirkonio lydinį, kuriame yra pastovi vandenilio koncentracija, hidridai ištirpsta aukštesnėje temperatūroje negu jų susidarymo (1.17 pav.) (kylant temperatūrai elementinio vandenilio koncentracija didėja pagal kreivę AB). Tačiau, pradėjus aušinti lydinį, tam tikrame temperatūros intervale elementinio vandenilio koncentracija išlieka pastovi (linija BC), kol pasiekia C tašką. Pasiekus C tašką gaunamas persotintas kietasis tirpalas, kuriame nebegalimos didesnės elementinio vandenilio koncentracijos ir dėl to susidaro nuosėdos – cirkonio hidridai. Dar labiau mažinant temperatūrą vandenilio koncentracija mažėja pagal kreivę CD, tačiau atitinkamai didėja cirkonio hidridų koncentracija. Vėl pradėjus kaitinti lydinį vandenilio koncentracija kinta pagal kreivę DC ir procesas kartojasi. Dėl šios ypatybės temperatūra yra dar vienas veiksnys, skatinantis LHP mechanizmą, kadangi cikliškai kintant lydinio temperatūrai vandenilis keičia savo būseną iš elementinio į cirkonio hidridą ir atvirkščiai, taip lengviau migruodamas link plyšio viršūnės. LHP vyksta ir tuo atveju, kai temperatūra išlaikoma pastovi. Tačiau LHP procesas sustoja pasiekus tam tikrą temperatūrą, kuri priklauso nuo cirkonio lydinio sudėties. Moksliniais tyrimais pademonstruota, kad CANDU slėgio vamzdžio Zr-2,5Nb medžiagoje LHP greitis didžiausią reikšmę pasiekia esant 300–310 °C temperatūrai, tačiau viršijus šią temperatūrą LHP greitis staiga pradeda mažėti ir pasiekus 350 °C hidridinis pleišėjimas nebevyksta (1.18 pav.). Kaip viena iš LHP sulėtėjimo aukštoje temperatūroje priežasčių nurodoma įtempių relaksacija bei cirkonio lydinio plastiškumo padidėjimas. Tai leidžia įtempiams pasiskirstyti didesnėje plyšio viršūnės zonoje ir sumažinti jų dydį. Sumažėjus įtempių lygiui nebesiformuoja hidridų klasteris prie plyšio viršūnės ir LHP nebevyksta. Tačiau teoriškai šis efektas nėra įrodytas.



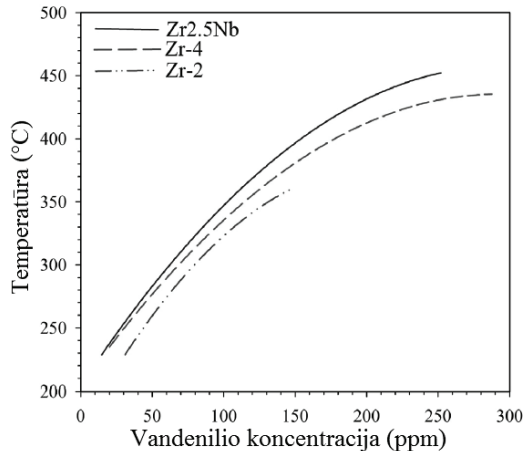
1.17 pav. Elementinio vandenilio kiekio kitimo cirkonio lydinyje priklausomybė nuo temperatūros ciklo [14]



1.18 pav. Plyšio augimo greičio priklausomybė nuo temperatūros [68]

Vandenilio tirpumo riba, vandenilio koncentracija, kurią viršijus susidaro cirkonio hidridai, skirtinguose cirkonio lydiniuose yra skirtinga. Palyginus Zr-2,5Nb, Zry-2 ir Zry-4 lydinis (1.19 pav.) matyti, kad, esant vienodai temperatūrai, mažiausiai vandenilio linkęs absorbuoti Zr-2,5Nb lydinys, daugiausiai – Zry-2

lydinys. Zry-2 ir Zry-4 lydiniai naudojami kuro apvaskalų gamybai. Eksploatacijos metu sukaupti dideli vandenilio kiekiai turi didelę įtaką apvaskalų sandarumui ilgalaikio saugojimo metu. Saugojimo metu PBK sumažėjus likutinės šilumos išsiskyrimui, sumažėja ir kuro apvaskalo temperatūra, o nukritus kuro apvaskalo temperatūrai iki ~ 300 °C ir esant didelėms vandenilio koncentracijoms, kuro apvaskale LHP procesas vyksta intensyviausiai.



1.19 pav. Vandenilio tirpumo cirkonio lydinuose priklausomybė nuo temperatūros [11]

1.7. Cirkonio lydinių mechaninių ir irimo sąsavybių skaitinis modeliavimas

Atliekant mokslinės literatūros apžvalgą daugiausiai galima rasti cirkonio lydinių eksperimentinių tyrimų. Greta eksperimentų aptinkama ir skaitinio modeliavimo tyrimų. Literatūroje galima rasti cirkonio lydinių su hidridais problemų sprendimų bei tyrimų naudojant skaitinį modeliavimą. Mankosa ir Abramova [69] tyrinėjo hidridų susidarymą cirkonio lydinio kuro apvaskaluose. Kadangi branduolinio kuro galia išilgai kuro strypo yra nepastovi, t. y. didžiausia galia yra strypo vidurinėje dalyje ir nuosekliai mažėja link strypo galų, netolygus yra ir temperatūros pasiskirstymas išilgai kuro apvaskalo vamzdžio. Be to, kuro strypai yra sudėti į rinkles, todėl jie taip pat yra veikiami greta esančių kuro strypų išskiriama šiluma, dėl to žiedine kuro apvaskalo kryptimi temperatūra taip pat pasiskirsto netolygiai. Dėl netolygaus temperatūros pasiskirstymo gaunamas netolygus įtempių pasiskirstymas ašine ir žiedine kuro apvaskalo kryptimis. Visa tai lemia nevienodą cirkonio hidridų susidarymą kuro apvaskalo ašine, žiedine ir radialine kryptimis. Mankosa ir Abramova atliko skaitinę cirkonio hidridų koncentracijos išilgai kuro apvaskalo analizę. Šiam tikslui naudojo trimatę BISON programą, kuri pagrįsta baigtinių elementų metodu (BEM) ir buvo sukurta Aidaho nacionalinėje laboratorijoje (*Idaho National Laboratory*). Programa BISON apskaičiuoja temperatūros pasiskirstymą, matmenų pasikeitimą nulemtą skilimo produktų, sutankėjimą, temperatūrinį ir radiacinį valkšnumą, skilimo dujinius produktus ir vandenilio bei hidridų pasiskirstymą apvaskale [70]. Taip pat galima rasti darbų, nagrinėjančių

hidridų susidarymą ir didėjimą [71] bei hidridų formos bei orientacijos nustatymą [72] skaitiniais metodais.

Atliekant literatūros apžvalgą, cirkonio lydinių su hidridais mechaninių savybių skaitinio tyrimo darbų rasti nepavyko. Buvo rasta įtempių pasiskirstymo skaitinio modeliavimo tyrimų cirkonio hidride ir matricoje [73]. Darbe buvo tirtas įtempių pasiskirstymas dėl didėjančio ir mažėjančio hidrido dydžio. Kubo ir kt. [74] eksperimentiškai ir skaitiškai tyrė Zry-2 lydinio hidridų suirimo įtempius esant skirtingoms temperatūroms. Skaitiniams tyrimams sukūrė vieno hidrido ir cirkonio lydinio matricos aplink hidridą baigtinių elementų (BE) modelį. Keisdami hidrido ilgį modelyje nustatė įtempių lygį hidride. Tyrimų metu nustatyta, kad įtempių lygis hidride pasiekia įtempių lygį cirkonio matricoje, kai hidrido ilgis yra didesnis nei 170 μm .

Be cirkonio lydinių su hidridais skaitinių tyrimų galima rasti ir kitų metalų su nemetaliniais intarpais tyrimų. Tokių tyrimų pavyzdys – Arreola-Herrera ir kt. [75] atliktas įtempių pasiskirstymo modeliavimas plieno 32CVD 13 su nemetaliniu intarpu.

Daugiau darbų galima rasti susijusių su cirkonio lydinių irimo ir irimo parametrų skaitiniu modeliavimu. Varias ir Massih [76] sukūrė Zr-2,5Nb lydinio ir dviejų vienas paskui kitą išdėstytų hidridų dvimatį baigtinių elementų modelį mikrolygmenyje. Baigtinių elementų modelis buvo naudojamas slenkstiniam įtempių intensyvumui K_{IH} nustatyti ir analitiniam modeliui išplėtoti. Tačiau nei analitiškai, nei skaitiškai kritinės medžiagos irimo parametrų vertės darbe nebuvo nustatytos. Suman ir kt. [77] atliko skaitinį kompaktinio bandinio, pagaminto iš Zry-4 medžiagos, tempimo modeliavimą. Šiam tikslui baigtinių elementų programa ABAQUS v6.12 sukūrė kompaktinio bandinio modelį su skirtingo ilgio hidridais prie plyšio viršūnės. Plyšio vystymuisi įvertinti panaudojo standartiniame pakete ABAQUS esantį išplėstą baigtinių elementų metodą (*angl. Extended finite element method, XFEM*). Kaip rezultatas straipsnyje pateiktos įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės bei J-integralo reikšmės esant skirtingiems hidridų bei plyšių ilgiams. Tačiau Zry-4 lydinio kritinės K_{IC} ir J_{IC} reikšmės nustatytos nebuvo.

Atliekant literatūros apžvalgą nepavyko aptikti straipsnių, kuriuose būtų aprašyta metodika ar pateikti pavyzdžiai, kaip nustatyti kritines cirkonio lydinių irimo parametrų savybes naudojant skaitinius metodus. Tačiau buvo rasti keli straipsniai, kuriuose nustatytos kitų metalų kritinės J-integralo reikšmės J_{IC} . Skaitiniams tyrimams naudojamos įvairios BE programos, tačiau dažniausiai minimos yra ABAQUS [78] ir ANSYS [79]. Jeon ir kt. [78] darbe pristato SA508 Gr.3, TP316L ir CF8M plienų kritinio J-integralo skaitinį nustatymo metodą, kuriam naudoja sudėtingą plyšio augimo modelį. Pasiūlytu metodu gauti rezultatai gerai sutampa su eksperimento metu gautais rezultatais. Tačiau, norint naudoti šį metodą, reikia papildomai aprašyti medžiagos pažeidimo modelį, kuriam papildomai reikia nustatyti tris medžiagos konstantas (α , β , γ). Šios konstantos naudojamos aprašyti plastiško irimo deformacijoms ε_p pagal lygtį:

$$\varepsilon_{fp} = \alpha \cdot \exp\left(-\beta \frac{\sigma_{hs}}{\sigma_e}\right) + \gamma, \quad (2)$$

čia ε_{fp} – plastiško irimo deformacijos; σ_{hs} – hidrostatiniai įtempiai, Pa; σ_e – von Mizeo (ekvivalentiniai) įtempiai, Pa; α , β , γ – medžiagos konstantos.

Šio metodo sudėtingumas yra tas, kad medžiagos konstantoms nustatyti reikia atlikti lygių bandinių ir bandinių su grioveliu tempimo eksperimentus. Mažiausiai reikia atlikti 3 papildomų bandinių eksperimentinius tyrimus. Weygand, Mahler ir Aktaa [80–82] taip pat pademonstravo skaitinio modeliavimo metodiką, leidžiančią nustatyti kritinį J-integralą. Skaitinį modeliavimą atliko T91 ir EUROFER 97 plienams. Savo metodikoje autoriai siūlo skaitiniame bandinio modelyje papildomai sumodeliuoti sukabinimo (*angl. cohesive*) elementų sluoksnius. Šiems elementams aprašyti taip pat reikalingas medžiagos pažeidimo modelis, kuriam, kaip ir aukščiau aprašytam Jeon ir kt. [78] metode, reikia papildomai atlikti bandinių su grioveliu eksperimentinius tyrimus. Be to, Weygand, Mahler ir Aktaa sukabinimo elementų sluoksniui sumodeliuoti papildomai naudojo pačių parašytą vartotojo paprogramę (kuri nėra aprašyta straipsniuose), įdiegtą į standartinę baigtinių elementų programą ABAQUS.

1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas ir mokslinės problemos formulavimas

Atlikus mokslinių tyrimų apžvalgą buvo pademonstruota, kad įvairūs cirkonio lydiniai eksploatacijos metu sendami absorbuoja vandenili. Kai cirkonio lydiniuose absorbuoto vandenilio koncentracija viršija vandenilio tirpumo ribą, pradeda formotis cirkonio hidridai, t. y. iškrinta cirkonio hidridų nuosėdos kietajame tirpale. Vandenilio absorbcija dažnai yra lydima lėtinio hidridinio pleišėjimo mechanizmo. Abu šie mechanizmai turi įtakos cirkonio ir jo lydinių mechaninėms savybėms (1.10 ir 1.11 pav.) bei plastiškumui, o tai tiesiogiai lemia medžiagos atsparumą suirimui, t. y. medžiagos irimo tūsumo savybes.

Literatūros apžvalga taip pat parodė, kad vandenilio absorbcijos bei LHP mechanizmai išlieka aktualūs ir PBK saugojimo metu, kai kuro tabletėje sumažėja likutinės šilumos išsiskyrimas ir temperatūra kuro apvaskale nukrinta iki tokio lygio, kada vyksta intensyvus LHP. Todėl ilgalaikėje perspektyvoje turi būti atsižvelgta į kuro apvaskalus veikiantį vandenilio absorbcijos senėjimo mechanizmą tiek eksploatacijos, tiek PBK saugojimo metu. Reikia nustatyti ilgainiui besikeičiančias lydinių mechanines ir irimo tūsumo savybes, kad būtų galima užtikrinti PBK saugumą.

Cirkonio lydiniai skiriasi ne tik chemine sudėtimi, bet ir termomechaniniu apdirbimo gamybos metu procesu. Visa tai turi įtakos lydinių savybėms bei dėl vandenilio absorbcijos lydiniuose susidarantių hidridų matmenims. Literatūros apžvalga parodė, kad hidridų dydis taip pat priklauso ir nuo cirkonio lydinio aušinimo greičio. Todėl, norint atlikti cirkonio lydinio su jame esančiais hidridais tyrimus, visų pirma reikia nustatyti hidridų matmenis, t. y. plotį, ilgį bei tūrinę dalį cirkonio matricioje.

Dauguma cirkonio lydinių savybių tyrimų yra atliekami eksperimentiškai. Tačiau ne visuomet galima atlikti medžiagos eksperimentinius tyrimus. Visų pirma reikalingas medžiagos pavyzdys eksperimentinių tyrimų bandiniams pagaminti. Medžiaga turi būti paimta iš eksploatuojamo branduolinio reaktoriaus ar PBK

saugyklos, kas savaime yra sudėtinga operacija. Paimtos medžiagos tūris turi būti santykinai didelis, kadangi eksperimentinių tyrimų bandiniai turi būti standartinių matmenų. Dažnu atveju branduolinėje pramonėje tiriamų medžiagų būna iradijuotos, todėl ištirti šias medžiagas reikalingos specialios laboratorijos, turinčios karštas kameras su eksperimentinių tyrimų mašinomis. Visa tai padaro eksperimentinius tyrimus sudėtingus ir brangius. Dėl to reikalingi alternatyvūs medžiagų tyrimų metodai, leidžiantys nustatyti kintančias medžiagų savybes ir užtikrinantys branduolinių įrenginių saugumą. Mokslinėje literatūroje kaip alternatyva eksperimentiniams tyrimams rasti medžiagų skaitinių tyrimų pavyzdžiai, kuriems dažniausiai naudojamas baigtinių elementų metodas. Nors straipsnių apie kritinių irimo parametrų savybių skaitinį nustatymą aptikti nepavyko, tačiau buvo rasti kitų metalo lydinių kritinių irimo parametrų skaitinių tyrimų aprašymai. Visgi norint naudoti šiuos metodus, reikalingi papildomi eksperimentiniai tyrimai, todėl, siekiant skaitiniais metodais įvertinti branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų irimo tūsumą dėl vandenilio absorbcijos, reikia sukurti tam tinkamą skaitinio modeliavimo metodiką.

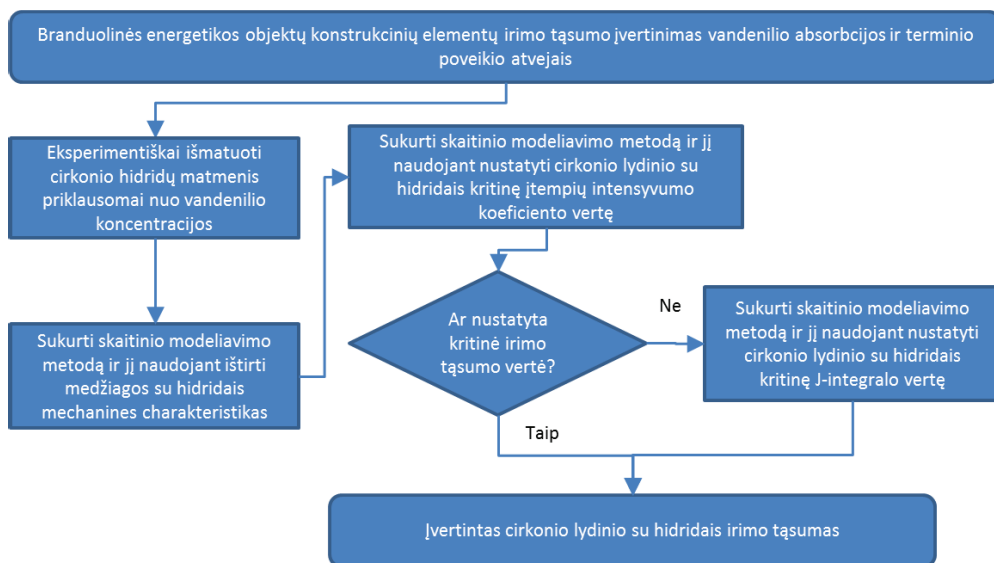
Ištirti visus cirkonio lydinius disertacijoje yra sudėtinga, todėl pasiūlytos skaitinės metodikos pritaikymas atliktas RBMK TMO-2 KK Zr-2,5Nb lydiniai.

Autoriaus indėlis

Remigijus Janulionis, dirbdamas LEI Branduolinių įrenginių laboratorijoje, sukūrė skaitinio modeliavimo metodiką, kuri leidžia skaitiniais metodais nustatyti cirkonio lydinių su hidridais mechanines ir irimo tūsumo savybes. Metodikos sudarymui doktorantas eksperimentiškai išmatavo hidridų matmenis ir hidridų tūrinę dalį, užimamą cirkonio matricoje, taip pat dalyvavo plieno P91 įtempių intensyvumo koeficiento ir J-integralo eksperimentų planavime ir rezultatų aptarime. Sukurta skaitinio modeliavimo metodika taip pat tinkama ir kitų metalų ar jų lydinių kritinio įtempių intensyvumo koeficiento bei kritinio J-integralo nustatymui.

2. IRIMO TĄSUMO SKAITINIO ĮVERTINIMO METODIKA

Pagrindinis disertacijos tikslas – naudojant sukurtą metodiką skaitiniais metodais nustatyti branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų, pagamintų iš cirkonio lydinų, irimo tąsumą vandenilio absorbcijos ir terminio poveikio atvejais. Norint pasiekti šį tikslą, reikia išspręsti disertacijos pradžioje (9 psl.) suformuluotus darbo uždavinius atliekant darbus pagal 2.1 pav. pateiktą algoritmą.



2.1 pav. Tyrimų metodikos algoritmas

Ieškant mokslinės literatūros irimo tąsumo kriterijų skaitinio modeliavimo srityje buvo rasti moksliniai straipsniai, kur kritinio J-integralo J_{IC} vertės nustatytos pritaikant baigtinių elementų metodą. Straipsniuose demonstruojamas geras sutapimas su eksperimentiniais duomenimis, todėl cirkonio lydinų su hidridais skaitinio irimo tąsumo vertinimui taip pat pasirinktas modeliavimas naudojant BEM. Sukurtiems BE modeliams reikia aprašyti jų elgseną veikiant apkrovoms. Todėl pirmiausia reikia skaitiškai įvertinti cirkonio lydinio su hidridais mechanines savybes. Akivaizdu, kad skirtingi cirkonio hidrido matmenys cirkonio lydinyje turės skirtingos įtakos cirkonio lydinio mechaninėms savybėms. Kaip pademonstruota literatūros apžvalgoje (1.4 skyriuje), hidridų forma priklauso ne tik nuo cirkonio lydinio sudėties, bet ir nuo mechaninio bei terminio apdirbimo. Todėl, siekiant įvertinti hidridų dydį ir formą tiriamame TMO-2 lydinyje Zr-2,5Nb, hidridai išmatuoti naudojant tiesioginius matavimus.

2.1. Tyrimų objektas ir eksperimentinių tyrimų bandinių paruošimas

Cirkonio lydinio tyrimams atlikti pasirinktas Ignalinos AE KK, kurio termomechaninis apdirbimas atliktas pagal TMO-2 technologiją. Neiradijuoto KK vamzdžio dalis, pagaminta iš Zr-2,5Nb lydinio, gauta iš Ignalinos AE (2.2 pav.).

Tyrimams gautas KK pavyzdys buvo 1,5 m ilgio, jo išorinis skersmuo \varnothing 88 mm, sienelės storis \sim 4 mm. KK vamzdžio dalis sudalinta į 20 segmentų.



2.2 pav. Ignalinos AE KK vamzdžio dalis, naudota cirkonio lydinio mechaninių savybių, irimo parametrų eksperimentiniams tyrimams bei hidridų matmenų matavimui

Bandinių su hidridais paruošimas buvo atliktas Lietuvos energetikos instituto medžiagų tyrimų ir bandymų laboratorijoje. KK segmentai ruošti elektrolitiškai nusodinant cirkonio hidrido sluoksnį bei jį homogenizuojant nustatytoje temperatūroje. Tokiu būdu vandenilis iš suformuoto cirkonio hidrido sluoksnio difuziškai pasiskirsto bandinio tūryje. Hidrinimui naudotas 70 °C 0,2 M = 0,2 mol/L koncentracijos sieros rūgšties tirpalas esant 1–2 A/m² srovės tankiui. Pagal [83], minimalus hidrido sluoksnis reikiamai vandenilio koncentracijai randamas pagal lygtį:

$$t_{hidrido} = 7,322 \cdot 10^{-5} \cdot t_{Zr} \cdot [H]_{Zr} \quad (3)$$

čia $t_{hidrido}$ – hidrido sluoksnio storis, m; $[H]_{Zr}$ – vandenilio koncentracija, ppm; t_{Zr} – cirkonio bandinio storis, m.

Tam, kad būtų užtikrintas pakankamas vandenilio kiekis, ant KK segmentų paviršiaus užaugintas 50 % storesnis hidrido sluoksnis, nei nustatytas pagal (3) lygtį. Gauto cirkonio hidrido sluoksnio storis ir hidridų pasiskirstymo tolygumas cirkonio lydinio tūryje atlikus homogenizacijos procesą tikrinamas metalografiškai.

Bandinys su suformuotu hidrido sluoksniu homogenizuojamas išlaikant nustatytą laiką aukštesnėje temperatūroje, ir dėl vandenilio tirpumo histerezės kintant temperatūrai (1.17 pav.), hidrido sluoksniui tirpstant elementinis vandenilis difuziškai pasiskirsto visame bandinyje. Vėliau, temperatūra yra sumažinama, o vandenilis ir cirkonis suformuoja naujus hidridus. Homogenizacijos temperatūra apskaičiuojama naudojant lygtį [83]:

$$[H]_{Zr} = 1,2 \cdot 10^5 \exp(-Q/RT), \quad (4)$$

čia Q – proceso aktyvacijos energija, J/mol; R – universalioji dujų konstanta, J/(mol·K).

Kai hidrido sluoksnis yra abiejose bandinio pusėse, homogenizacijos laikas randamas pagal lygtį [83]:

$$h_n = 1,5(t_{Zr}/2)^2/D, \quad (5)$$

kur D – difuzijos koeficientas, m²/s ir randamas pagal lygtį [84]:

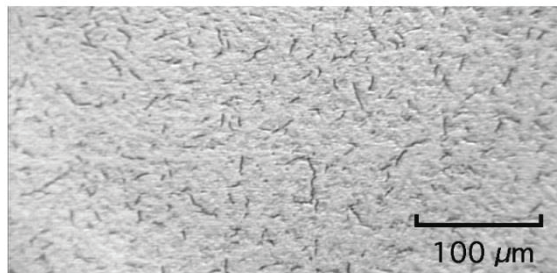
$$D = 7,0 \cdot 10^{-7} \exp(Q/RT)^2. \quad (6)$$

Susidarančių hidridų dydis cirkonio lydinyje priklauso nuo lydinio aušinimo greičio (1.9 pav.), todėl yra svarbu teisingai pasirinkti sąlygas, kurias norima atspindėti formuojant hidridus. Baigus homogenizacijos procesą, buvo pasirinktas 30 °C/val. bandinių aušinimo greitis, kuris sutampa su KK aušimo greičiu RBMK reaktoriaus avarinio stabdymo metu.

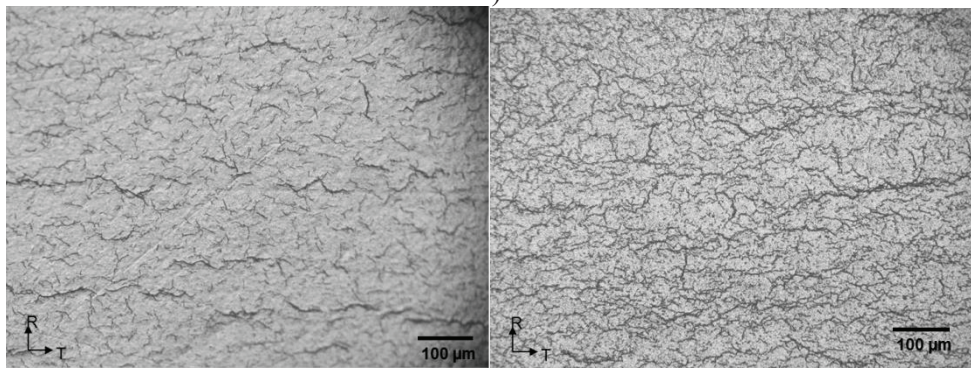
Susidariusių hidridų morfologija, lydinio mikrostruktūra tirtos metalografiškai naudojant optinį mikroskopą su automatine vaizdo analizės sistema bei SEM mikroskopą. Vandenilio analizė atlikta vakuuminės ekstrakcijos būdu prietaisu LECO RH-402.

2.2. Hidridų dydžio matavimas cirkonio lydinyje

Tiriant Zr-2,5Nb lydinio su hidridais mikrošlifų nuotraukas (2.3 pav.) pastebėta, kad esant skirtingai hidridų koncentracijai cirkonio lydinyje ne tik susiformuoja didesnis hidridų skaičius, tačiau skiriasi ir hidridų ilgis bei storis.



a)



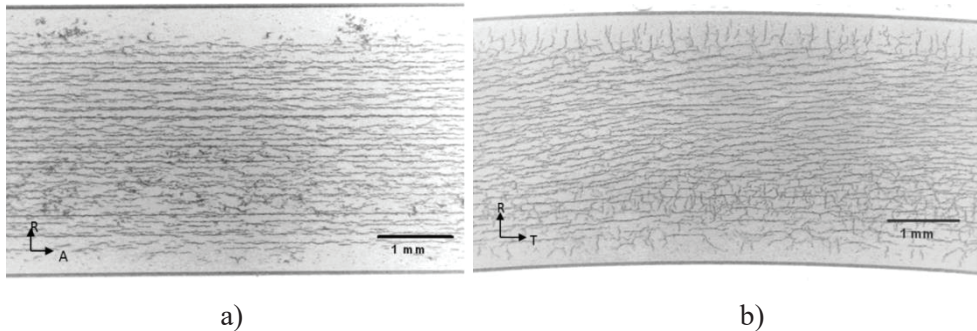
b)

c)

2.3 pav. Zr-2,5Nb lydinio KK mikrostruktūra radialine-tangentine kryptimi esant skirtingai vandenilio koncentracijai: a) 45 ppm; b) 100 ppm; c) 250 ppm

Siekiant sukurti metodiką, leidžiančią nustatyti cirkonio lydinų su hidridais savybių pasikeitimą, būtina nustatyti hidridų matmenis. Iš 2.4 pav. matyti, kad Zr-2,5Nb lydinio KK su TMO-2 terminiu mechaniniu apdirbimu hidridai, prasiskverbę pro vamzdžio paviršių gaubiantį cirkonio oksido sluoksnį, formuojasi statmenai vamzdžio vidiniam ir išoriniam paviršiams, tačiau vidiniuose sluoksniuose linę formoties ašine-tangentine (ašine-žiedine) vamzdžio kryptimi. Tokia hidridų

formavimosi tendencija stebima ir suslėgto sunkiojo vandens reaktorių tipo slėgio vamzdžiuose [45]. Tokia cirkonio hidridų orientacija priklauso nuo KK kristalografinės tekstūros, kuri susiformavo TMO-2 (1.4 pav.) apdirbimo proceso metu.



2.4 pav. Hidridų pasiskirstymas ir orientacija Zr-2,5Nb lydinio KK, kai vandenilio koncentracija lygi 140 ppm: a) skerspjūvis radialine-ašine kryptimi; b) skerspjūvis radialine-tangentine kryptimi

Hidridų cirkonio lydinyje ilgiai nustatyti atliekant tiesioginius matavimus iš Zr-2,5Nb lydinio KK mikrošlifų nuotraukų (mikrošlifų nuotraukos esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms pavaizduotos 2.3 pav.). Cirkonio hidridų ilgiai matuoti bandiniuose, kuriuose vandenilio koncentracija siekė 45, 100 ir 250 ppm. Matavimams atlikti panaudota kompiuterinio projektavimo programa AutoCAD LT 2011 [85].

Hidridų dydžio matavimo rezultatai pristatyti 3.1 skyriuje.

Išmatuoto vidutinio hidrido ilgio ir storio nepakanka pasakyti, kokią dalį hidridas užima cirkonio matricoje. Todėl papildomai atliktas hidrido tūrinės dalies cirkonio lydinio matavimas, aprašytas 2.3 skyriuje.

2.3. Hidrido tūrinės dalies nustatymas

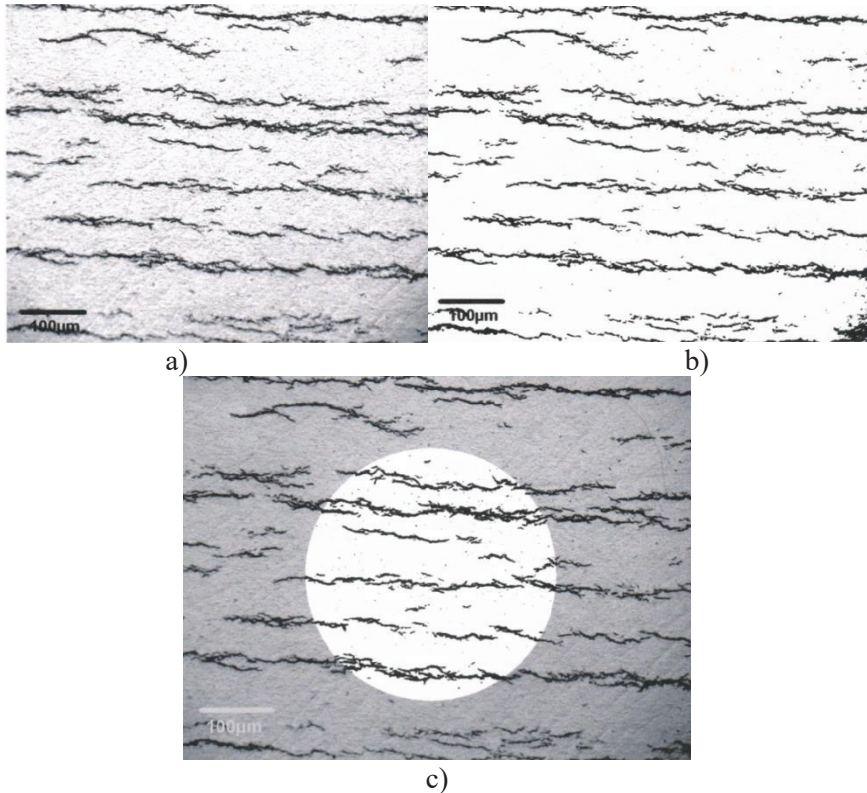
Hidridų tūrinė dalis gautuose cirkonio lydinio bandiniuose buvo nustatoma iš paruoštų mikrošlifų, taikant stereologinį planimetrinį metodą [86]. Naudojant šį metodą daroma prielaida, kad bet kuriame cirkonio lydinio bandinio skerspjūvio sluoksnyje chaotiškai išsidėsčiusių hidridų užimamas plotas yra toks pats. Priėmus tokią sąlygą galima hidridų užimamą santykinę ploto dalį prilyginti santykinę tūrio daliai.

Nustatyta hidridų užimama tūrinė dalis cirkonio lydinio matricoje bei jų matmenys vėliau naudojami cirkonio lydinio su hidridais skaitiniam modeliavimui.

Bandinių paviršių nuotraukos atliktos naudojant optinį mikroskopą OLYMPUS, vaizdą didinant 150 ir 800 kartų. Vaizdai apdoroti ir hidridų tūrio skaičiavimai atlikti programa *Scion Image* v.4.0.2. Mikrošlifų nuotraukos analizės programa *Scion Image* pavyzdys pateiktas 2.5 pav. Paviršių analizė atlikta atsitiktinai pasirinktose vietose skersai vamzdžio sienelės dviejose plokštumose: ašinėje-radialinėje (A-T) ir

radialinėje-tangentinėje (R-T). Atlikta ne mažiau kaip 10 matavimų kiekvienoje plokštumoje ir kiekvienai vandenilio koncentracijai.

Hidridų tūrinės dalies cirkonio matavimo rezultatai pristatyti 3.1 skyriuje.



2.5 pav. Mikrošlifo nuotraukos apdorojimo automatinė vaizdų analizės programa *Scion Image* vaizdas, kai vandenilio koncentracija 137 ppm: a) mikrošlifo paviršiaus vaizdas; b) binarinis vaizdas; c) matavimo paviršiaus plotas (0,17 mm²)

2.4. Skaitinis cirkonio lydinio su hidridais savybių įvertinimas

2.4.1. Baigtinių elementų programa ABAQUS

Visiems skaitiniams tyrimams pasirinkta programa ABAQUS/CAE v6.11 [87]. ABAQUS – tai universali programa, skirta baigtinių elementų metodu spręsti tokius uždavinius:

- Statinė įtempių-deformacijų analizė:
 - tiesinė,
 - netiesinė,
 - stabilumo;
- Ciklinio nuovargio analizė;
- Viskoelastinio / viskoplastinio atsako;
- Irimo mechanikos;

- Dinaminė įtempių-deformacijų analizė:
 - savųjų dažnių nustatymas,
 - sudėtinis savųjų dažnių nustatymas,
 - nusistovėjusių režimų dinamika,
 - pereinamoji modalinė dinamika,
 - atsako spektras,
 - atsitiktinio atsako;
- Šilumos mainų (pereinamiesiems ir nusistovėjusiems režimams);
- Akustikos;
- Daugialypius uždavinius:
 - termomechaninius,
 - termoelektrinius,
 - pjezoelektrinius,
 - dvifazio skysčio tekėjimo mechanikos,
 - smūginius ir struktūrinius-akustinius;
- Ir kitus.

Aprašant medžiagas programoje ABAQUS galima nurodyti tamprias, plastiškas ir papildomas savybes, tokiu būdu sprendžiant tiesinius ir netiesinius uždavinius.

Programa ABAQUS/CAE v6.11 susideda iš trijų dalių: preprocesoriaus, procesoriaus ir postprocesoriaus. Preprocesorius ir postprocesorius – tai dalys su grafine sąsaja, leidžiančia vartotojui patogiai kurti baigtinių elementų modelius, aprašyti uždavinius ir apdoroti bei grafiškai pavaizduoti skaičiavimo rezultatus. Procesorius – pagrindinė programos dalis, atliekanti uždavinio sprendimą.

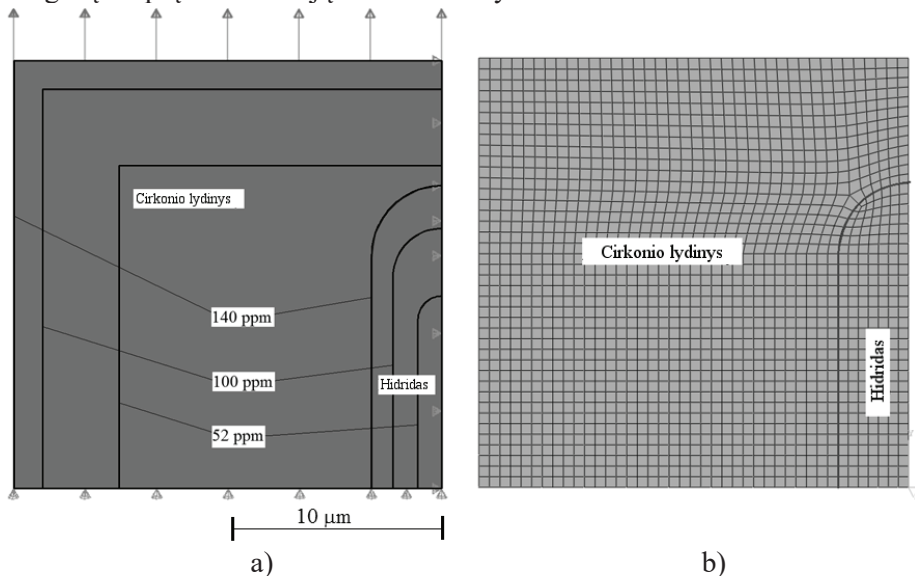
2.4.2. Skaitinis modelis cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių įvertinimui

Kaip parodyta 2.2 skyriuje, hidridai Zr-2,5Nb lydinio KK su TMO-2 apdirbimu linę formuotis ašine-tangentine kryptimi (2.4 pav.). Taip pat KK eksploatacijos metu didžiausi įtempiai susidaro žiedine vamzdžio kryptimi, todėl ir eksperimentiniai tyrimai [50], su kuriais disertacijoje yra lyginami skaitinių tyrimų rezultatai, atlikti žiedine (tangentine) vamzdžio kryptimi.

Cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių skaitinio nustatymo principas – eksperimento modeliavimas mikrolygmenyje. Daroma prielaida, kad vieno vidutinio dydžio hidrido, apsupto cirkonio lydinio matricos, elgsena veikiant vienašei apkrovai atitinka 37,8 mm ilgio eksperimentinio tempimo bandinio, pagaminto iš KK vamzdžio, elgseną. Eksperimentiniame bandinyje hidridai išsidėstę kryptingai, bet ne vienodais atstumais vienas nuo kito, o ir jų matmenys yra skirtingi. Tai skirtingai daro įtaką medžiagos savybėms skirtingose bandinio vietose mikromastelyje, tačiau makromastelyje yra vertinama visos sistemos visuma, t. y. atliekant eksperimentą gaunamas skirtingų medžiagos savybių atskiruose tūriuose vidurkis. Todėl atliekant vidutinio dydžio hidrido, apsupto cirkonio matricos, analizę gaunamos vidutinės medžiagų savybės, kaip ir eksperimentinio tyrimo metu. Mikromodelis parodo, kaip vienas vidutinio dydžio hidridas, nesąveikaudamas su kitais hidridais, lemia cirkonio lydinio įsotinto vandeniliu savybių pasikeitimą. Todėl hidrido ir apkrovimo

orientacija skaitiniame modelyje turi sutapti su eksperimento metu atliktų tyrimų apkrovimo kryptimi ir bandinio orientacija.

Skaitinis cirkonio lydinio matricos su hidrido intarpu modelis, sukurtas programa ABAQUS, pavaizduotas 2.6 a pav. Paveiksle pateikti cirkonio matricos ir hidrido modeliai, kai vandenilio koncentracija yra lygi 52, 100 ir 140 ppm. Sumodeliuoto hidrido matmenys atitinka eksperimentiškai išmatuoto vidutinio hidrido matmenis (3.1 pav.). Atitinkamai vandenilio koncentracijai, sumodeliuoto hidrido ilgis kinta nuo 18,8 iki 27,7 μm , o plotis – nuo 2,3 iki 6,7 μm . Cirkonio matrica sumodeliuota taisyklingo kvadrato formos. Cirkonio matricos kraštinės ilgis parinktas taip, kad hidrido užimamas plotas, kas sutampa su hidrido tūrine dalimis cirkonio lydinyje, atitiktų hidridų tūrinės dalies matavimo rezultatus (3.2 pav. ir 3.1 lent.). Sukurto modelio storis lygus 1 μm . Siekiant išvengti įtempių koncentracijos, sumodeliuoto hidrido galas suapvalintas. Kadangi vieno hidrido, apsupto cirkonio matricos, modelis yra simetriškas dviejų plokštumų atžvilgiu, modeliuota tik 1/4 hidrido ir cirkonio lydinio dalis, t. y. 1/2 hidrido ilgio, 1/2 hidrido pločio ir 1/4 jį supančios cirkonio matricos. Tai atlikta siekiant sumažinti skaitinio modelio dydį, baigtinių elementų skaičių, skaičiavimo apimtį bei siekiant paspartinti skaičiavimus. Simetrijos plokštumų pjūvio vietose modelyje apatinei horizontaliai ir dešinei vertikaliai kraštinėms (2.6 a pav.) pridėtos simetrijos kraštinės sąlygos. Poslinkiai buvo naudoti kaip apkrova ir pridėti viršutinei horizontaliai kraštinei. Pridėtų poslinkių dydis visiems modeliams lygus 3 μm . Toks poslinkių dydis yra pakankamas, kad apskaičiuoti įtempiai ir deformacijos viršytų eksperimentiškai nustatytų cirkonio lydinų su hidridais stiprumo ribos vertes. Kaip skaičiavimo rezultatas buvo matuota reakcijos jėga, kuri vėliau perskaičiuojama į įtempių reikalingus įtempių-deformacijų kreivei sudaryti.



2.6 pav. Cirkonio lydinio su hidridu skaičiuojamasis modelis ir BE tinklelis: a) geometrija ir kraštinės sąlygos kai vandenilio koncentracija lygi 52, 100 ir 140 ppm; b) baigtinių elementų tinklelis, kai vandenilio koncentracija lygi 140 ppm

Skaitinis modelis sudalintas naudojant S8R tipo elementus. Šie elementai yra 8 mazgų kevalinio (*angl. shell*) tipo [87]. Kiekvieno elemento mazgas turi 6 laisvės laipsnius ir 5 integravimo taškus per elemento storį. Siekiant parinkti optimalų BE dydį, buvo atlikti keli skaičiavimai naudojant skirtingo (0,1 μm, 0,2 μm, 0,5 μm, 1 μm, 2μm,) smulkumo BE tinklelius. Kadangi modelis nesudėtingos geometrijos, apkrovimas yra vienašis, todėl elementų dydis, kai modelis sudalinamas palyginus nedideliais elementais, praktiškai nelemia skaičiavimo rezultatų. Todėl visiems skaičiavimo atvejams buvo nuspręsta skaitinį modelį sudalinti 0,5 μm dydžio elementais. BE modelio tinklelis, kai vandenilio koncentracija siekia 140 ppm, pavaizduotas 2.6 b pav.

2.4.3. Cirkonio lydinio ir hidrido mechaninės savybės

Cirkonio lydinio mechaninės savybės, naudotos sudarant skaitinį modelį, pateiktos 2.1 lent. Lentelėje pateikiamas tamprumo modulis E , sąlyginė takumo riba $\sigma_{0,2}$, stiprumo riba σ_U , suirimo deformacija ϵ_f , bandinio skerspjuvio ploto sumažėjimas Z . Šios mechaninės savybės rastos literatūroje [50], kur mokslininkai aprašė Ignalinos AE KK Zr-2,5Nb lydinio savybių tyrimus.

2.1 lentelė. Zr-2,5Nb lydinio mechaninės savybės [50]

E , GPa	$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_U , MPa	ϵ_f , %	Z , %
34,4	411	492	14,78	62,2

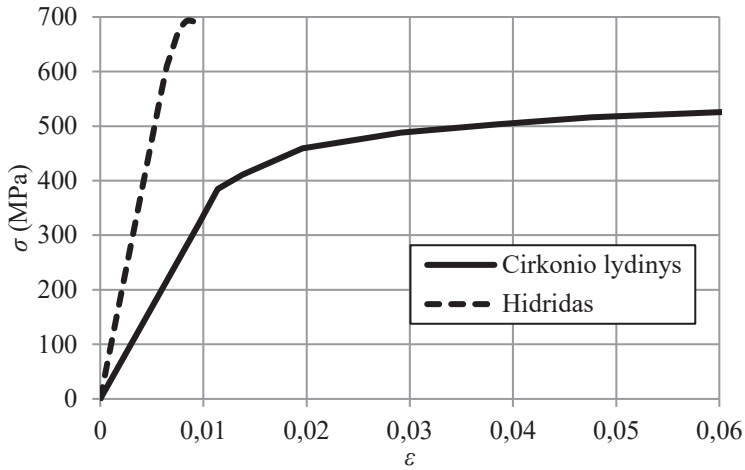
Cirkonio hidrido mechaninės savybės apskaičiuotos pagal metodiką, pateiktą [76]: tamprumo modulis E (Pa) randamas pagal lygtį:

$$E = (95900 - 57,4 \cdot (T - 273)) \cdot 10^6, \quad (7)$$

o stiprumo riba pagal lygtį:

$$\sigma_U = 7,357 \cdot 10^{-3} E. \quad (8)$$

Radus tamprumo modulį bei stiprumo ribą galima rekonstruoti hidrido įtempimų ir deformacijų kreives. Tikrosios cirkonio hidrido ir Zr-2,5Nb lydinio įtempimų-deformacijų kreivės pateiktos 2.7 pav.



2.7 pav. Cirkonio Zr-2,5Nb lydinio ir cirkonio hidrido tikrosios įtempių-deformacijų kreivės

2.4.4. Medžiagų mechaninių savybių nustatymas

Deformacija – tai santykinis dydis, nusakantis kieto kūno formos, matmenų pasikeitimą. Deformacijas nustatyti galima pagal lygtį:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0}; \quad (9)$$

čia l_0 – pradinis ilgis, m; l – galutinis kieto kūno ilgis veikiant apkrovai, m; Δl – ilgio pokytis veikiant apkrovai, m.

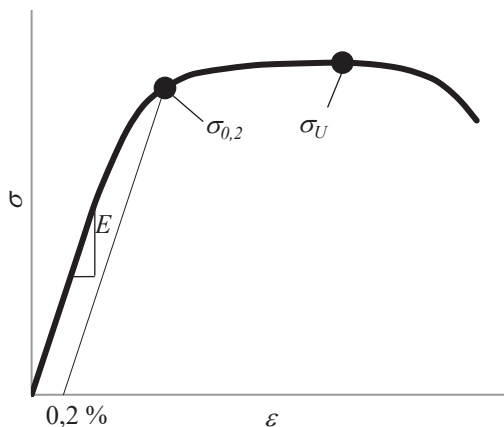
Skaitinio modelio deformacijas galima nustatyti pagal 9 lygtį, kur pradinis ilgis l_0 – tai skaitinio modelio ilgis. Kadangi skaitiniame modelyje poslinkiai naudojami kaip apkrova, jie šiuo atveju atitinka ilgio pokytį Δl .

Įtempiai randami pagal lygtį:

$$\sigma = \frac{F}{S}; \quad (10)$$

čia F – jėga veikianti kietą kūną, N; S – kieto kūno skerspjūvio plotas statmenai veikiamos jėgos įvertinant bandinio susitraukimą ir kakliuko susidarymą, m^2 .

Skaitiniame modelyje įtempiai nustatomi pagal 10 lygtį, kur matuojama reakcijos jėga atitinka jėgą F . Skerspjūvio plotas gaunamas modelio plotį padauginus iš storio. Skaičiavimuose apkrova didinama palaipsniui ir kiekviename apkrovos padidinimo žingsnyje suskaičiuavus ϵ ir σ galima sudaryti įtempių-deformacijų kreivę.



2.8 pav. Tipinė metalo įtempių-deformacijų kreivė

Tokios kreivės tipinis pavyzdys pateiktas 2.8 pav. Iš tempimo kreivės galime nustatyti tokias medžiagos savybes kaip tamprumo modulį, stiprumo ribą, takumo ribą ir kt. Tamprumo modulis E , dar kitaip vadinamas Jungo moduli, nusako tamprią medžiagos elgseną tiesinėje įtempių-deformacijų kreivės dalyje ir randamas pagal lygtį:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (11)$$

Stiprumo riba σ_U randama didžiausių įtempių taške. Jei medžiaga neturi išreikštos takumo aikštelės, tikrosios takumo ribos nustatyti negalima. Tokiu atveju priimta naudoti sąlyginę takumo ribą $\sigma_{0,2}$, kuri randama įtempių-deformacijų kreivės taške, kai medžiagos plastinės deformacijos pasiekia 0,2 %, kaip parodyta 2.8 pav.

2.5. Irimo parametrų įvertinimo metodika

Vienas iš svarbiausių irimo mechanikos uždavinių – įvertinti mechaninį medžiagų pasipriešinimą irimui veikiant statinėms ar ciklinėms apkrovoms. Didžiausią įtaką konstrukcijų suirimui daro medžiagoje esantys plokšti defektai – plyšiai. Yra du suirimo tipai: pirmas, kai susidaro didelės liekamosios deformacijos, ir antras, kai liekamosios deformacijos yra labai mažos arba jų iš viso nėra. Atsižvelgiant į tai, medžiagos irimas vadinamas plastiškuoju arba trapiuoju. Remiantis šiais dviem irimo atvejais, irimo mechanikoje yra išskirtos dvi irimą nagrinėjančios teorijos [88]:

- tiesinė irimo mechanika,
- netiesinė irimo mechanika.

Tiesinė irimo mechanika remiasi tiesine tampria medžiagos elgsena, kai plastinės deformacijos galimos tikrai mažoje medžiagos dalyje ir arti plyšio viršūnės. Tiesinė irimo mechanika taikoma tikrai konstrukcijoms, kuriose nominalūs įtempiai neviršija 40% tamprumo ribos.

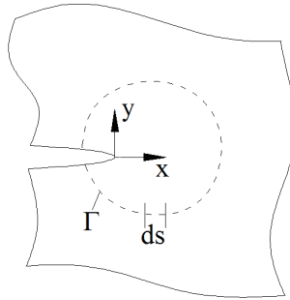
Netiesinė irimo mechanika nėra apribota tik tampriosiomis deformacijomis, kurios gali būti sukeltos visame nagrinėjamos konstrukcijos skerspjūvyje. Šiems dviem irimo mechanikos atvejams yra naudojami skirtingi irimo įvertinimo kriterijai.

Tiesinėje irimo mechanikoje irimo įvertinimui yra naudojamas įtempimų intensyvumo koeficientas. Įtempimų intensyvumo koeficientas yra aprašomas įtempimų dydžiu plyšio viršūnės zonoje. Šis koeficientas priklauso nuo konstrukcijos ir plyšio dydžių. Bendru atveju, įtempimų intensyvumo koeficientas K_I nustatomas pagal lygtį [88]:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}f; \quad (12)$$

čia a – plyšio gylis, m; f – apkrovos, konstrukcijos ir plyšio tipo funkcija.

Netiesinėje irimo mechanikoje plyšių įvertinimui dažniausiai yra naudojamas J-integralas. J-integralas – tai energetinis parametras, apibūdinamas deformacijos energija plyšio zonoje, ir matuojamas J/m^2 (arba N/m).



2.9 pav. Kontūras Γ apie plyšio viršūnę

2.9 pav. pavaizduotas kūnas su plyšiu ir apie plyšio viršūnę apibrėžtu kontūru Γ . Integruojant pagal kontūrą Γ nuo apatinio plyšio paviršiaus iki viršutinio prieš laikrodžio rodyklę J-integralą galime apskaičiuoti pagal lygtį [88]:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W_E dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right); \quad (13)$$

čia W_E – kūno deformacijos energijos tankis, J/m^2 ; u – poslinkių vektorius, m; ds – kontūro mažas elementas; T_i – jėgos vektorius, nukreiptas į išorę nuo integravimo kontūro ir randamas:

$$T_i = \sigma_{ij}n_j; \quad (14)$$

čia n_j – vienetinio vektoriaus, statmeno kontūru Γ , komponentė; σ_{ij} – įtempimų tenzorius, Pa.

W_E randamas pagal lygtį:

$$W_E = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}; \quad (15)$$

čia ε_{ij} – deformacijų tenzorius.

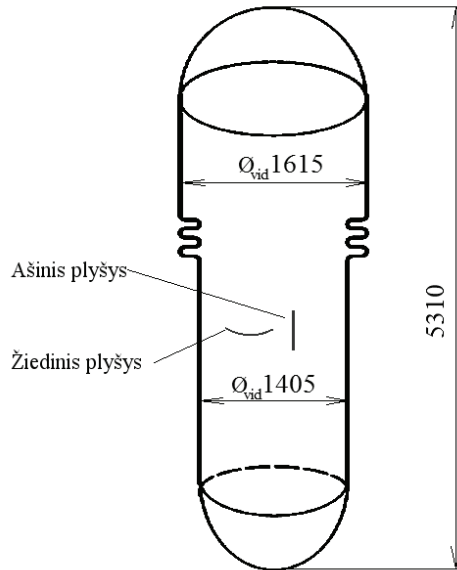
Norint įtempių intensyvumo koeficientą ir J-integralą naudoti kaip kriterijų, reikia nustatyti jų kritines reikšmes K_{IC} ir J_{IC} . Trapiojo irimo atveju apskaičiavus konstrukcijos su plyšiu, veikiamos išorinių apkrovų, pagamintos iš trapios medžiagos įtempių intensyvumo koeficientą K_I ir palyginus su medžiagos kritine K_{IC} reikšme, galima įvertinti defekto pavojingumą ir visos sistemos patikimumą. Jei nustatytas K_I viršija medžiagos kritinę K_{IC} reikšmę, reiškia, kad plyšys didės ir konstrukcija suirs. Atitinkamai plastiškojo irimo atveju nustatytą J_I reikšmę reikia lyginti su medžiagos kritine J_{IC} reikšme.

2.6. BE programos ABAQUS validavimas irimo mechanikos uždaviniui spręsti

Programa ABAQUS galima spręsti irimo mechanikos uždavinius [87], t. y. galima komponento su plyšiu jo viršūnėje įvertinti įtempių intensyvumo koeficiento ar J-integralo reikšmę. Siekiant įsitinkinti programos ABAQUS tinkamumu, atliktas programos irimo parametrų įvertinimo validavimas, naudojant palyginimo metodą [89]. Šiam tikslui atliktas įtempių intensyvumo koeficiento skaičiavimas Es-Salam reaktoriaus korpuse, esant toms pačios sąlygoms, programomis ABAQUS, ANSYS [90] ir analitiškai pagal ASME [91] reikalavimus. Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje.

Es-Salam reaktorius – tai 15 MW galios sunkiojo vandens tiriamasis reaktorius. Reaktorius pastatytas netoli Birino miesto, kuris yra už 200 km į pietus nuo Alžyro sostinės. Reaktorius pradėtas eksploatuoti 1992 metais. Jis yra eksperimentinis ir mokomasis reaktorius, skirtas fizikų ir branduolinės energetikos technikų rengimui, todėl elektros energijos negamina.

Es-Salam reaktoriaus slėgio indą sudaro du plonasieniai, skirtingų matmenų cilindrai, sujungti dumpliniu kompensatoriumi. Cilindrų galai – sferiniai. Slėgio indas schematiškai pavaizduotas 2.10 pav. Apatinėje slėgio indo dalyje yra sumontuotas reaktorius, užpildytas sunkiojo vandens lėtikliu. Viršutinėje dalyje yra sumontuotas aliumininis ekranuojantis dangtis. Paveiksle taip pat pavaizduoti dviejų tipų (ašinis ir žiedinis) paviršiniai plyšiai cilindro sienelėje, kurie buvo vertinami irimo mechanikos uždavinio sprendimo validavimui programa ABAQUS. Buvo priimta, kad dėl agresyvesnės aplinkos (sunkiojo vandens) plyšiai susiformuotų vidinėje slėgio indo sienelės pusėje. Todėl analizės metu buvo vertinami skirtingų matmenų vidiniai plyšiai, kurių gylis a ir indo sienelės storio t santykis kinta nuo 0,25 iki 0,8, o plyšio gylio ir ilgio c santykis kinta nuo 0,2 iki 1,0 (2.11 pav.).

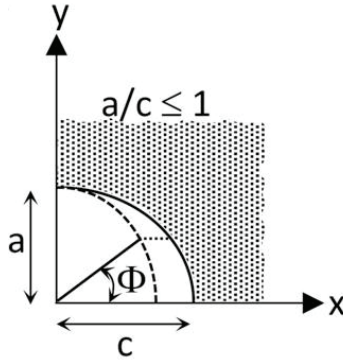


2.10 pav. Es-Salam reaktoriaus slėgio indas

Es-Salam reaktoriaus korpusas pagamintas iš aliuminio 6061 lydinio. Šio aliuminio lydinio tamprumo modulis $E = 75100$ MPa, Puasono koeficientas $\nu = 0,33$. Apatinės slėgio indo dalies vidinis skersmuo lygus 1405 mm, sienelės storis 8 mm. Visuose skaičiavimuose priimta, kad slėgio indas iš vidaus yra veikiamas 0,07 MPa slėgio.

2.6.1. Analitinis įtempių intensyvumo koeficiento įvertinimas

ASME reikalavimų katilams ir slėgio indams XI skyriaus A-3000 [91] priede nurodyta įtempių intensyvumo koeficiento K_I skaičiavimo metodika įvertinant membraninius ir lenkimo įtempius. Metodika taip pat tinkama įvertinti temperatūrinį gradientą bei liekamuosius įtempius. Naudojant šią metodiką galima nustatyti K_I giliausiame plyšio taške ir taške prie laisvo paviršiaus, t. y., kai kampas $\Phi = 0^\circ$ ir $\Phi = 90^\circ$. Koordinačių sistema plyšio kampo Φ nustatymui pavaizduota 2.11 pav.



2.11 pav. Paviršinio elipsinio plyšio schema ir jo parametriniai matmenys

Paviršinio plyšio atveju įtempiai, statmeni plyšio plokštumai plyšio viršūnėje, išreiškiami daugianare funkcija pagal lygtį:

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3; \quad (16)$$

čia A_i – koeficientai, aprašantys įtempių pasiskirstymą per visą plyšio gylį; x – atstumas nuo sienelės, kurioje susiformavo plyšys, paviršiaus iki analizuojamo taško plyšio viršūnėje, m.

Koeficientai $A_0 - A_1$ tiksliai atspindi įtempius plyšio plokštumoje per visą plyšio gylį, t. y., kai $0 \leq x/a \leq 1$.

Įtempių intensyvumo koeficientas paviršinio plyšio atveju randamas naudojant daugianarę įtempių priklausomybę:

$$K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3]\sqrt{\pi a/Q}; \quad (17)$$

čia A_i – koeficientai iš (16) lygties; A_p – slėgio indo vidinis slėgis, kai slėgis veikia plyšio paviršiuje, visais kitais atvejais $A_p = 0$, Pa; G_i – laisvo paviršiaus pataisos koeficientas, parenkamas iš lentelės [91]; Q – plyšio formos parametras, randamas pagal lygtį:

$$Q = 1 + 4,593(a/2c)^{1,65} - q_y; \quad (18)$$

čia c – $1/2$ plyšio ilgio, m; $a/2c$ – plyšio gylio ir ilgio santykis $0 \leq a/2c \leq 0,5$; q_y – plastinės zonos pataisos koeficientas randamas iš lygties:

$$q_y = [(A_0G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3)/\sigma_y]/6; \quad (19)$$

čia σ_y – medžiagos takumo riba, Pa.

Kai yra skaičiuojama K_I priklausomybė nuo plyšio gylio, kiekvienam plyšio gyliui turi būti naujai parenkami koeficientai A_0, A_1, A_2 ir A_3 .

Jei įtempių, statmenų plyšio plokštumai, pasiskirstymą visiems plyšio gylio atvejams galima aprašyti viena lygtimi, tuomet K_I skaičiavimui galima naudoti tokį metodą: įtempių pasiskirstymas aprašomas lygtimi:

$$\sigma = A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3; \quad (20)$$

čia t – slėgio indo sienelės storis, m.

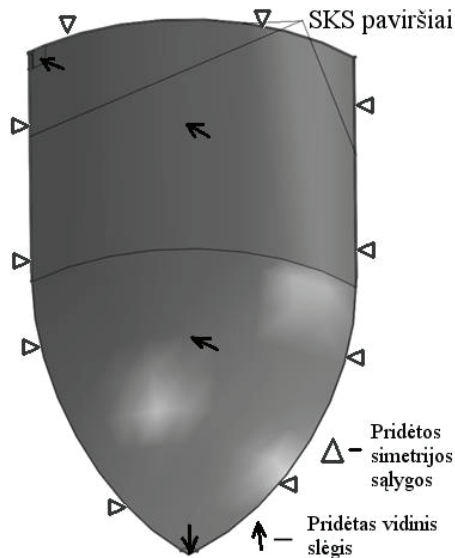
Kiekvienai a/t santykio reikšmei, A'_i konvertuojama į A_i taip:

$$A_i = \begin{cases} A'_0 & , \quad i = 0 \\ A'_i(a/t)^i & , \quad 1 \leq i \leq 3 \end{cases} \quad (21)$$

Tuomet šios A_i reikšmės naudojamos (17) lygtyje ir apskaičiuojamas K_I .

2.6.2. Es-Salam reaktoriaus korpuso skaitinis modelis parengtas programa ABAQUS

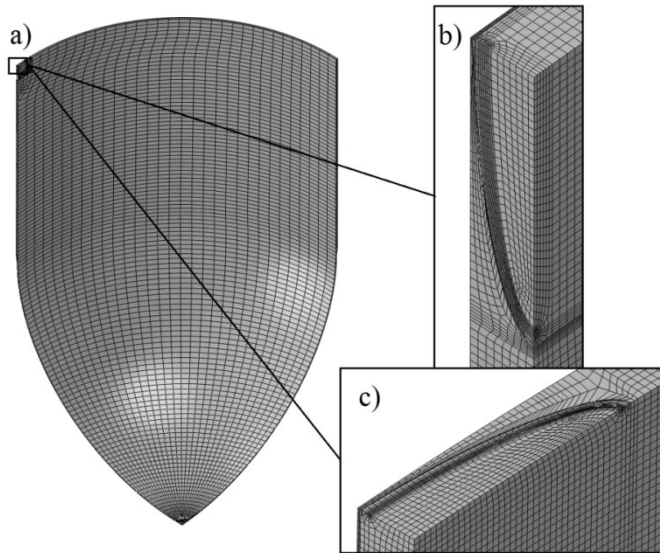
Programa ABAQUS v6.11 [87] buvo parengtas trimatis Es-Salam reaktoriaus slėgio indo apatinės dalies baigtinių elementų modelis įtempių intensyvumo koeficientui K_I nustatyti. Parengtas BE modelis su pridėtomis apkrovomis ir kraštinėmis sąlygomis pavaizduotas 2.12 pav. Kadangi analizuojama slėgio indo tik apatinė dalis, kuri yra simetriška dviejų viena kitai statmenų plokštumų atžvilgiu, o veikianti apkrova (slėgis) simetriška trijų statmenų plokštumų atžvilgiu, sukurta tik 1/8 viso slėgio indo modelio dalis. Tam, kad 1/8 dalies elgsena veikiant apkrovoms atitiktų visiškai sumodeliuoto slėgio indo dalies elgsenai, simetrijos kraštinės sąlygos (SKS) buvo pridėtos prie BE modelio 1/8 dalies pjūvio paviršių briaunų, pažymėtų 2.12 pav. Simetrijos kraštinėmis sąlygomis yra suvaržomi BE mazgų poslinkiai kryptimis, statmenomis simetrijos plokštumoms. Taip pat suvaržomi mazgų posūkiai apie koordinatinių ašis sutampančiomis su simetrijos plokštumomis.



2.12 pav. 1/8 Es-Salam reaktoriaus slėgio indo dalies BE modelis su pridėtomis kraštinėmis sąlygomis, parengtas programa ABAQUS

0,07 MPa slėgis pridėtas visiems slėgio indo vidiniams paviršiams. Didžioji modelio dalis sudalinta C3D8R tipo elementais, kurių dydis apie 25 mm visomis kryptimis (2.13 pav.). C3D8R – tai trimačiai stačiakampio gretasienio formos 8

mazgų elementai. Dėl modelio kūrimo paprastumo plyšys sumodeliuotas modelio kampe, kur pridėtos simetrijos sąlygos (2.13 pav. a ir b). Todėl, pritaikius simetrijos sąlygas, sumodeliuota 1/4 plyšio. Taip pat šiame kampe išskirta 60×60 mm zona, kuri sudalinta C3D20R elementais. Tai trimačiai stačiakampio gretasienio formos 20 mazgų elementai, jų dydis šioje zonoje apie 1 mm. Ypač svarbu yra teisingai suformuoti tinklėlį apie plyšio viršūnę [87]. Patikimi skaičiavimo rezultatai gaunami, jei parenkamas pakankamai smulkus BE tinklėlis. Smulkus tinklėlis taip pat svarbus siekiant išvengti netaisyklingos formos elementų susidarymo. Todėl zona apie plyšio viršūnę sudalinta dar smulkesniais elementais, lyginant su visu likusiu modelio. Šių elementų vidutiniai matmenys: 0,12×0,12×0,8 mm. Viso modelio tinklėlio elementų skaičius priklauso nuo sumodeliuoto plyšio dydžio ir kinta nuo 45000 iki 60000.



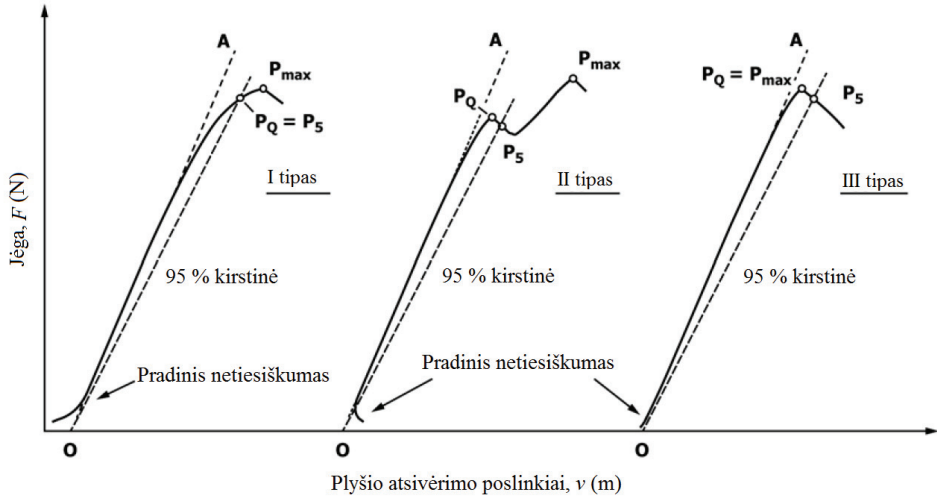
2.13 pav. Modelio su plyšiu ($a = 6,4$ mm, $c = 32$ mm) BE tinklėlis: a) viso modelio tinklėlis; b) padidintas vaizdas su ašinio plyšio BE tinkleliu; c) padidintas vaizdas su žiedinio plyšio BE tinkleliu

BE modelio sukūrimas ir skaičiavimai ANSYS programa atlikti Birino branduolinių tyrimų centro (Alžyras) tyrėjo Djillali Saad. Modelio aprašymas ir gauti rezultatai aprašyti bendroje publikacijoje [92].

BE programos ABAQUS validavimo irimo mechanikos uždaviniams spręsti rezultatai pristatyti 3.3 skyriuje.

2.7. Kritinio K_{IC} nustatymas

Kritinio įtempimų intensyvumo koeficiento K_{IC} skaitinio tyrimo principas – tai skaitinis eksperimento modeliavimas pagal standartinės procedūras ir reikalavimus, skirtus eksperimentiniam K_{IC} nustatymui. Šiam tikslui pasirinkti ASTM E399-12e3 [93] reikalavimai. Skaitinio K_{IC} nustatymo metodikai sudarymui pasirinkti plieno P91 mechaninių ir irimo tūsumo savybių eksperimentiniai tyrimai, atlikti Lietuvos energetikos instituto mokslininkų [94]. Plienas P91 – tai viena iš potencialių medžiagų



2.15 pav. Tempimo jėgos priklausomybės nuo v tipai [93]

Ekspertiškai sudaryta tempimo jėgos priklausomybės nuo v kreivė naudojama P_Q ir P_{max} jėgoms nustatyti. P_{max} – tai jėga aukščiausiam kreivės taške; P_Q – jėga, kuriai esant įtempių intensyvumo koeficientas pasiekia K_Q reikšmę. Norint nustatyti P_Q jėgą, tempimo jėgos priklausomybės nuo v tiesinei daliai brėžiama liestinė OA (2.15 pav.). Vėliau iš taško O brėžiama kirstinė OP₅, kuri yra su 5 % posvyriu tiesei OA ir randama pagal lygtį $(P/v)_5 = 0,95(P/v)_0$, kur $(P/v)_0$ yra OA liestinės posvyris. Tuomet I tipo kreivės atveju jėga P_Q randama kreivės ir 95 % kirstinės sankirtos taške. Kitų kreivės tipų atveju jėga P_Q randama pirmos viršūnės taške.

Nustačius P_Q jėgą K_Q reikšmė standartiniam C(T) bandiniui analitiškai apskaičiuojama pagal lygtį [93]:

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{\sqrt{BW}} \right) \cdot f(a/W); \quad (22)$$

kur:

$$f(a/W) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W} \right)}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}}. \quad (23)$$

$$\cdot \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right];$$

čia P_Q – jėga, kuriai esant įtempių intensyvumo koeficientas pasiekia K_Q reikšmę, N; B – bandinio storis, m; W – bandinio plotis, m.

K_{max} reikšmė apskaičiuojama naudojant tas pačias (22, 23) lygtis, kaip ir K_Q radimui, tačiau šiuo atveju P_Q pakeičiant į P_{max} .

2.7.1. Eksperimentiniai plieno P91 mechaninių savybių ir įtempių intensyvumo koeficiento tyrimai

Eksperimentiniai plieno P91 mechaninių savybių bei irimo parametrų tyrimai, atlikti Lietuvos energetikos instituto mokslininkų, pristatyti [94]. Šių tyrimų metu mokslininkai ištyrė ne tik pačią išeities medžiagą, taip pat papildomai atliko plieno P91 bandinių sendinimą. Sendinimas atliktas bandinius išlaikant ilgą laiką aukštoje temperatūroje, tokiu būdu imituojuojant energetikos pramonės komponentų, pagamintų iš šio plieno, ilgalaikę eksploataciją aukštoje temperatūroje. Kaip ir eksploatuojant, taip ir sendinant plieną pakinta jo mikrostruktūra, mechaninės bei irimo tūsumo savybės. Atliekant minėtus tyrimus plieno P91 sendinimas atliktas skirtingose temperatūrose išlaikant bandinius skirtingą laiką. Kritinio įtempių intensyvumo koeficiento skaitinio modeliavimo metodikai sukurti pasirinkti tyrimo rezultatai plieną P91 sendinant 650 °C temperatūroje 790, 4150 ir 11000 val. IV kartos skystu natriu aušinamo reaktoriaus numatoma projektinė temperatūra lygi 550 °C, todėl, pagal [94] pateiktą sendinimo laiko perskaičiavimo metodiką, plieno P91 sendinimas 650 °C temperatūroje 11000 val. apytikriai atitinka 60 metų eksploatacijai 550 °C temperatūroje.

2.2 lent. pateiktos eksperimentiškai nustatytos išeities ir sendinto plieno P91 mechaninės savybės. 2.3 lent. pateikti vidutiniai irimo tūsumo eksperimentinio tyrimo rezultatai. Iš viso buvo atlikti 8 kritinio įtempių intensyvumo koeficiento nustatymo eksperimentiniai tyrimai. Mechaninių charakteristikų tyrimai atlikti pagal standarto EN ISO 6892-1 2009 [95] reikalavimus, o irimo tūsumo tyrimai pagal ASTM E399-12e3 [93] reikalavimus.

2.2 lentelė. Išeities ir sendinto plieno P91 mechaninės savybės [94]

Sendinimo laikas 650 °C, val.	E , GPa	$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_U , MPa	ε_f , %	ν
0	214	513	666	9,8	0,3
790	212	507	658	9,9	0,3
4150	212	501	651	9,5	0,3
11000	209	487	637	9,2	0,3

2.3 lentelė. Išeities ir sendinto plieno P91 irimo tūsumo tyrimo rezultatai [94]

Sendinimo laikas 650 °C, val.	P_Q , kN	P_{max} , kN	K_Q , MPa \sqrt{m}	K_{max} , MPa \sqrt{m}
0	42,4	82,7	75,1	146,4
790	41,4	81,3	73,4	143,5
4150	41,9	78,0	73,9	137,5
11000	41,1	77,0	70,6	135,8

2.7.2. Dvimatis skaitinis modelis K_{IC} tyrimui

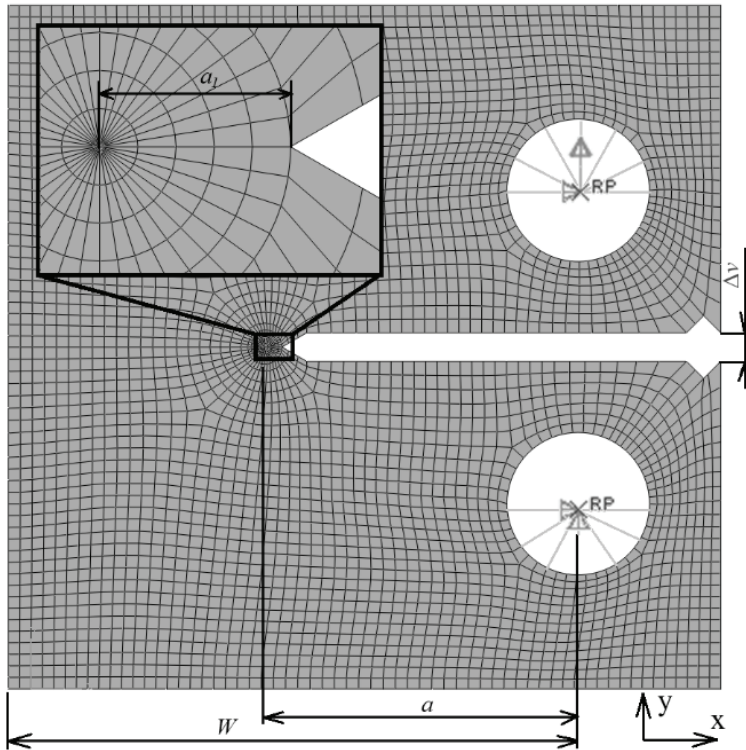
Kritinio įtempių intensyvumo koeficiento K_{IC} skaitinio tyrimo principas – tai skaitinis eksperimentinio tyrimo modeliavimas. Naudojant baigtinių elementų programą ABAQUS sukurtas dvimatis kompaktinio tempimo bandinio C(T) modelis pavaizduotas 2.16 pav. Skaitinio modelio matmenys atitinka standartinio C(T) bandinio, naudoto eksperimentiniams tyrimams, matmenis (2.14 pav.) [94]. Nuovarginio plyšio ilgis $a_I = 1,8$ mm. Dvimačio baigtinių elementų modelio BE tinklo sudarymui naudojami arba CPE8R, arba CPS8R tipo elementai [87]. Abiejų tipų elementai yra plokšti dvimačiai stačiakampės formos turintys 8 mazgus, tačiau vieni elementai įvertina plokščią deformaciją, o kiti plokščią įtempių būvį. Plokščios deformacijos būvio atveju deformacijos yra vertinamos dviem kryptimis, o įtempiai trimis. Plokščio įtempių būvio atveju atvirkščiai – įtempiai vertinami dviem, o deformacijos trimis kryptimis. Kuriant kritinio įtempių intensyvumo koeficiento skaitinio nustatymo metodiką, skaitiniai tyrimai atlikti naudojant abiejų tipų elementus. ABAQUS vartotojo žinyne [87] rekomenduojama, kad skaitinis modelis būtų sudalintas stačiakampio formos baigtiniais elementais, o apie plyšio viršūnę išsidėstytų apskritimine kryptimi. Tam, kad būtų įmanoma sudaryti tokią struktūrą, elementų kraštinės mazgai, esantys arčiausiai plyšio viršūnės, turi būti sutraukti į vieną tašką. Sutraukus stačiakampio formos elemento kraštinę į vieną tašką gaunamas trikampio formos elementas, tačiau turintis 8 mazgus (2.17 a, b pav.). Tokie elementai vadinami singuliariais. Taip pat, skaičiavimo tikslumui padidinti, rekomenduojama elemento kraštinių, einančių iš singuliarus taško, vidurinius mazgus paslinkti 1/4 atstumu link plyšio viršūnės. Naudojant trimatį modelį ir trimačius elementus rekomendacija išlieka tokia pati, tik šiuo atveju gauname ne trikampius, bet prizmės formos elementus.

Optimalaus BE dydžio parinkimui atlikti keli skaičiavimai keičiant skaitinio modelio elementų dydį ir lyginant įtempių intensyvumo koeficiento K_I plyšio viršūnėje skaičiavimo rezultatus. Modelį sudaro dvi zonos: apskritiminė apie plyšio viršūnę, kurios spindulys sutampa su nuovarginio plyšio ilgiu a_I , ir likusi modelio dalis. Atliekant palyginimą pastebėta, kad keičiant kampą tarp apskritimine kryptimi išsidėšusių elementų nuo $3,6^\circ$ iki 36° K_I išlieka nepakitęs. Tik kampą padidinus iki 60° K_I reikšmė pakito 0,7 %. ABAQUS vartotojo instrukcijoje rekomenduojama tiksliai analizei neviršyti 10° kampo, vidutinio tikslumo analizei – 20° . Elementų skaičių radialine kryptimi keičiant nuo 5 iki 20 K_I reikšmės kitimas nepastebėtas. Atsižvelgiant į tai, nuspręsta apskritiminę modelio dalį sudalinti BE naudojant 9° kampą tarp elementų bei 5 elementus radialine kryptimi. Keičiant vidutinį elementų dydį likusioje modelio dalyje nuo 0,5 mm iki 3 mm stebėtas neženklaus (0,3 %) K_I kitimas, todėl K_{IC} tyrimui pasirinktas vidutinis 1,5 mm elementų dydis. Visą BE modelį, kuris pavaizduotas 2.16 pav., sudaro 3694 elementai.

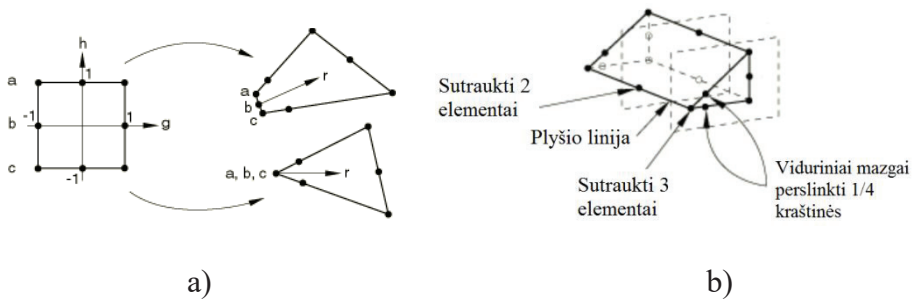
BE modelyje kraštinės sąlygos pridėtos kompaktinio bandinio skylių centruose, pažymėtuose RP. Apatinio RP taško poslinkiai suvaržyti dvejomis kryptimis (X ir Y koordinačių), o viršutinio RP taško poslinkiai suvaržyti tik X koordinatės kryptimi. Kaip apkrova naudotas viršutinio RP taško poslinkis Y koordinatės kryptimi poslinkį didinant palaipsniui (per kelis skaičiavimo žingsnius). RP taškai su BE modeliu

standžiai sujungti ryšio elementais (*angl. coupling*). Didelėms deformacijoms ir poslinkiams įvertinti programoje ABAQUS aktyvuota netiesinio geometrinio poveikio parinktis *Nlgeom* (*angl. nonlinear geometric effects*) [87]. Ši parinktis yra naudojama, kai apkrovos skaitiniame modelyje sukelia didelius mazgų poslinkius.

Atlikus skaičiavimus gauti tokie rezultatai: reakcijos jėga apatiniame RP taške, plyšio atsivėrimo poslinkiai, gauti matuojant ekstenzometro tvirtinimo taškų atstumo pokytį Δv (2.16 pav.), ir įtempių intensyvumo koeficientas plyšio viršūnėje.

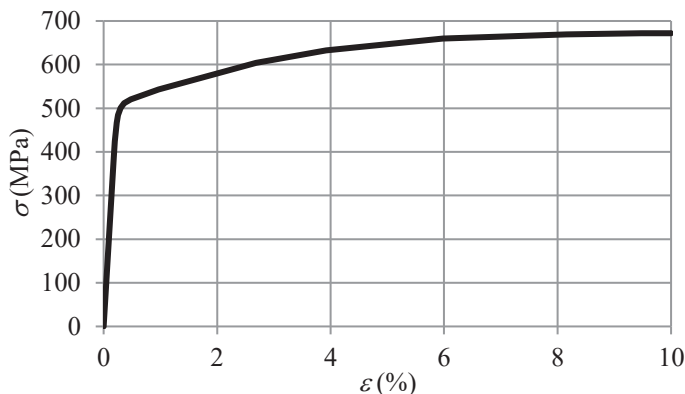


2.16 pav. C(T) bandinio dvimačio baigtinių elementų modelio tinkelis ir kraštinės sąlygos



2.17 pav. Elementų singularumas: a) dvimačio elemento atveju; b) trimačio elemento atveju

Aprašyti plieno P91 elgsenai skaitiniame modelyje naudotos 2.2 lent. pateiktos išėities mechaninės savybės [94] bei 2.18 pav. pavaizduota įtempių-deformacijų kreivė.



2.18 pav. Išėities plieno P91 inžinerinė įtempių-deformacijų kreivė

Skaitiniam kritinio įtempių intensyvumo koeficientui K_{IC} nustatyti naudojant baigtinių elementų metodą, C(T) bandinio tempimo modeliavimą reikia atlikti du kartus:

- pirmas C(T) bandinio tempimo modeliavimas atliekamas tempimo jėgos priklausomybei nuo ν sudaryti ir P_Q jėgai nustatyti;
- antras tempimo modeliavimas atliekamas įtempių intensyvumo koeficiento priklausomybei nuo tempimo jėgos sudaryti ir K_Q rasti.

Atliekant pirmą tempimo skaitinį modeliavimą P_Q jėgai rasti, aprašant medžiagos modelį naudojamos tamptariai platinės medžiagų savybės. Įtempių intensyvumo koeficiento priklausomybei nuo tempimo jėgos sudarymui atliekamas tempimo skaitinis modeliavimas naudojant tik tamptrias medžiagos savybes. Tai susiję su tuo, kad K_{IC} yra tiesinės irimo mechanikos parametras, kaip aprašyta 2.5 skyriuje, ir gali būti apskaičiuojamas tik naudojant tiesinę BE analizę.

3.4 skyriuje pateikti tyrimo rezultatai parodė, kad jėgos F priklausomybės nuo ν kreivės sudarymui naudojant tiek plokščio deformacijos tiek ir plokščio įtempių būvio atvejus dvimatis BE modelis nėra tinkamas, nes skaitiškai nustatyta tempimo jėga F yra 20 % didesnė naudojant plokščios deformacijos būvį ir 13 % mažesnė naudojant plokščią įtempių būvį, kai $\nu = 2,5$ mm. Todėl atliktas K_{IC} tyrimas naudojant trimatį modelį, aprašytą 2.7.3 skyriuje.

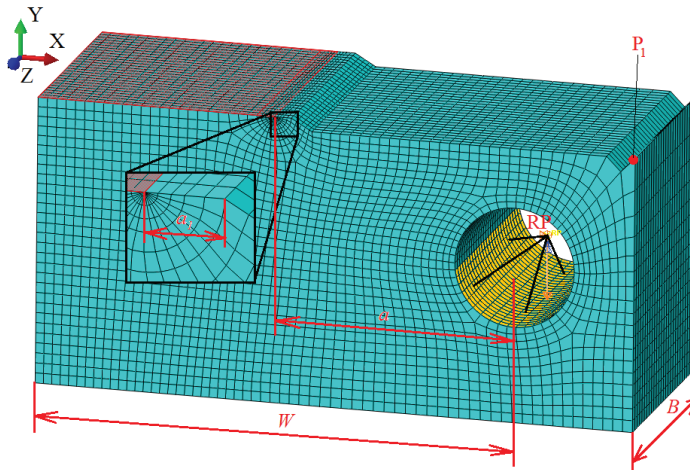
2.7.3. Trimatis skaitinis modelis skirtas K_{IC} tyrimui

Kompaktinio tempimo bandinio C(T) trimatis BE modelis, kaip ir dvimatis modelis, pristatytas 2.7.2 skyriuje, parengtas programa ABAQUS. Trimačio modelio matmenys atitinka standartinio C(T) bandinio, naudoto eksperimentiniams tyrimams, matmenis (2.14 pav.), o modelio BE tinklėlis su pridėtomis kraštinėmis sąlygomis pavaizduotas 2.19 pav. Kadangi C(T) bandinys, kraštinės sąlygos ir apkrovimas yra simetriški, todėl buvo sumodeliuota tik pusė bandinio. Tokiu būdu yra sumažinama

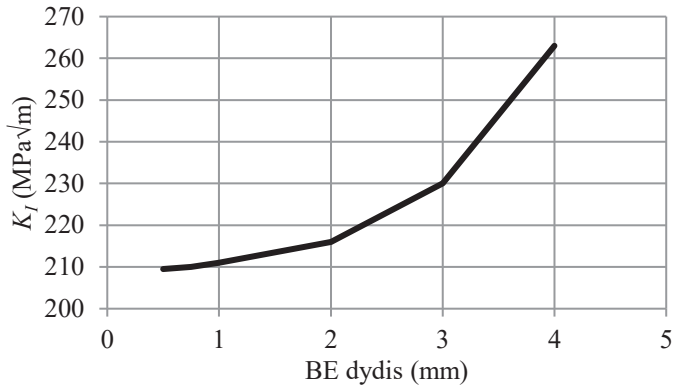
uždavinio apimtis ir pagreitinamas jo sprendimas. Modelis sudalintas C3D20R elementais [87]. Tai trimačiai kubo formos elementai, turintys 20 mazgų. Laikantis ABAQUS vartotojo instrukcijos rekomendacijų, kuriant baigtinių elementų tinklą apie plyšio viršūnę sukurti trimačiai singularūs elementai, kaip aprašyta 2.7.2 skyriuje.

Optimalaus trimačio BE modelio tinklelio dydžio parinkimui, kaip ir dvimačio BE modelio (2.7.2 skyriuje), buvo atliktas K_I rezultatų palyginimas keičiant elementų dydį. Kaip ir dvimačio modelio atveju nustatyta, kad apskritinėje dalyje kampas (nuo 9° iki 30°) tarp elementų bei elementų skaičius radialine kryptimi (nuo 5 iki 15) įtakos K_I reikšmei neturi. Todėl apskritinė dalis sudalinta naudojant $11,25^\circ$ kampą tarp elementų bei 5 elementus radialine kryptimi. Didesnė įtaka K_I reikšmės pokyčiui gauta keičiant likusios dalies elementų dydį. K_I priklausomybė nuo baigtinio elemento dydžio pavaizduota 2.20 pav. Iš paveikslo matyti, kad elemento dydžiui mažėjant nuo 4 mm iki 0,5 mm K_I reikšmės taip pat mažėja. Mažėjant elemento dydžiui mažėja ir K_I reikšmės pokytis. Elementams pasiekus 1 mm dydžio ribą K_I pokytis tampa nežymus. Atsižvelgiant į šiuos tyrimus pasirinktas 1 mm vidutinis BE dydis. Visą trimatį BE modelį sudaro 51435 elementai.

Trimačiame BE modelyje, kaip ir dvimačiame, nuovarginio plyšio ilgis $a_I = 1,8$ mm.

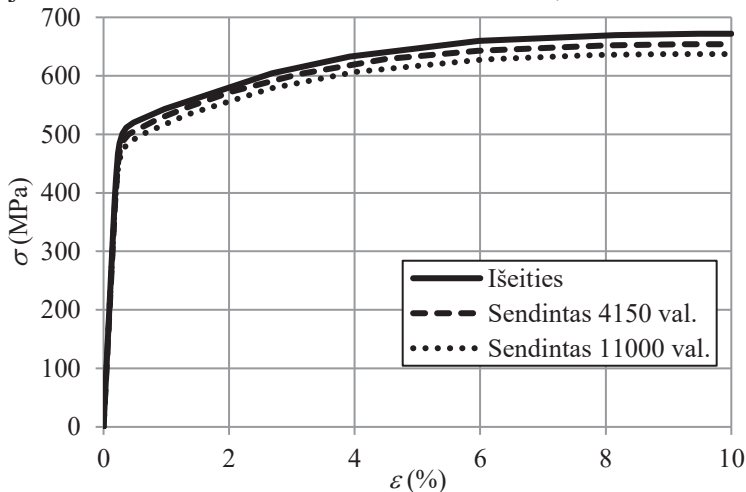


2.19 pav. C(T) bandinio trimatis BE modelis ir kraštinės sąlygos K_{IC} tyrimui



2.20 pav. BE tinklelio dydžio tyrimas

Skaičiavimai atlikti naudojant nesendinto (išeities) ir sendinto iki 4150 val. ir 11000 val. plieno P91 savybes. Medžiagų modeliams aprašyti naudotos eksperimentiškai nustatytos medžiagos savybės pateiktos 2.2 lent., įtempimų-deformacijų kreivės – 2.21 pav. Savybės, suvestos iki ε_f ribos, pateiktos 2.2 lent. Visais atvejais buvo naudotas Puasono koeficientas $\nu = 0,3$.



2.21 pav. Išeities ir sendinto plieno P91 inžinerinės įtempimų-deformacijų kreivės

Kraštinės sąlygos, modelyje pridėtos prie RP taško bei simetrijos pjūvio plokštumos, pažymėtos raudona spalva (2.19 pav.). RP taško poslinkiai suvaržyti X ir Z koordinatės kryptimis, taip pat suvaržyti posūkiai apie Y ašį. Kaip apkrova naudotas RP taško polinkis neigiama Y koordinatės ašies kryptimi. Skaičiavimo metu apkrova didinama palaipsniui, o skaičiavimo rezultatai saugomi kiekviename apkrovos padidinimo žingsnyje. RP taškas su BE modelio cilindrinės skylės apatiniu paviršiumi, pažymėtu geltona spalva (2.19 pav.), standžiai sujungtas ryšio elementais (*angl. coupling*). Didelėms deformacijoms ir poslinkiams įvertinti aktyvuota netiesinio geometrinio poveikio parinktis *Nlgeom* [87].

Atlikus skaičiavimus gauti tokie rezultatai: reakcijos jėga, matuota RP taške, įtempių intensyvumo koeficientas apie plyšio viršūnę, plyšio atsivėrimo poslinkiai v . v buvo nustatyti sekant taško P_1 (2.19 pav.) poslinkius Y koordinatės kryptimi (skaitiniame modelyje taškas P_1 sumodeliuotas briaunoje, kurios poslinkius eksperimento metu montuoja ekstenzometras).

Sudarant skaitinio kritinio irimo tūsumo nustatymo metodiką plienui P91 K_{IC} nustatyti nepavyko, kadangi nebuvo tenkinama reikalavimų ASTM E399-12e3 sąlyga $P_{max}/P_Q \leq 1,1$. Tai rodo, kad net ir sendintas plienas P91 išlieka plastiškas. Todėl, remiantis ASTM E399-12e3 reikalavimais, norint įvertinti plastiškos medžiagos irimo tūsumą reikia nustatyti kritinį J-integralą J_{IC} .

2.8. Kritinio J_{IC} nustatymas

Kritinio J-integralo J_{IC} skaitinio tyrimo principas, kaip ir K_{IC} atveju, – tai skaitinis eksperimentinio J_{IC} nustatymo pagal standartines procedūras ir reikalavimus modeliavimas. Tik J_{IC} nustatymo atveju remiamasi standarto ASTM E1820-15 [54] reikalavimais. Skaitinio J_{IC} nustatymo metodikai sudaryti taip pat pasirinktas plienas P91. Šio plieno J_{IC} nustatymo eksperimentiniai tyrimai atlikti Lietuvos energetikos institute.

Eksperimentiniam J_{IC} nustatymui atliekami panašūs tempimo bandymai, kaip ir K_{IC} atveju. Pagal ASTM E1820-15 standartą J_{IC} nustatyti galima naudoti lenkimo bandinį, kompaktinį tempimo bandinį arba disko formos kompaktinį bandinį. Eksperimentiniams tyrimams ir skaitinio nustatymo metodikai sudaryti pasirinktas kompaktinis tempimo bandinys C(T). J_{IC} nustatymui skirtas C(T) bandinys (2.22 pav.), panašus į C(T) bandinį, skirtą K_{IC} nustatyti. Pagrindinis skirtumas yra ekstenzometro tvirtinimo vieta plyšio atsivėrimo poslinkiams v matuoti. Ekstenzometro kojelės turi remtis taškuose, sutampančiuose su linija, jungiančia jėgos pridėjimo skylių (bandymo mašinos kaiščių) centrus. J_{IC} nustatymui skirtas C(T) bandinio plyšio ilgis a didesnis, turi būti $0,45W < a < 0,7W$ ribose. Taip pat pasirinktinai galima C(T) bandiniui suformuoti šoninius V formos griovelius. Eksperimentinių tyrimų metu šie grioveliai užtikrina tiesų plyšio augimą išlaikant tiesią plyšio viršūnę. Paruoštuose C(T) bandiniuose, skirtuose J_{IC} tyrimams, vidutinis nuovarginio plyšio ilgis $a_I = 2,8$ mm.

J_{IC} nustatymui pirmiausia reikia rasti sąlyginį J-integralą J_Q . Tuomet, jei atlikto eksperimentinio bandymo rezultatai ir bandinio matmenys tenkina standarte ASTM E1820-15 nurodytus reikalavimus, galime teigti, kad nustatytas $J_Q = J_{IC}$. J_Q nustatomas iš J-integralo priklausomybės nuo plyšio pailgėjimo ($J_I - \Delta a$) kreivės (2.23 pav.). Ši kreivė sudaroma C(T) bandinio tempimo metu keliuose taškuose matuojant plyšio pailgėjimą ir šiame taške apskaičiuojant J-integralo vertę. Galingumo regresijos kreivei sudaryti naudojami tik tie taškai, kurie patenka į plotą, apribotą kreivių J_{limit} , Δa_{min} ir Δa_{limit} . Šiame plote turi būti mažiausiai 5 matavimo taškai.

0,15 mm ribinė linija, 1,5 mm ribinė linija ir 0,2 mm lygiagretė – tai linijos, lygiagrečios konstrukcinei linijai, atitinkamai perslinktos absčių ašies kryptimi.

J_{limit} randamas pagal lygtį [54]:

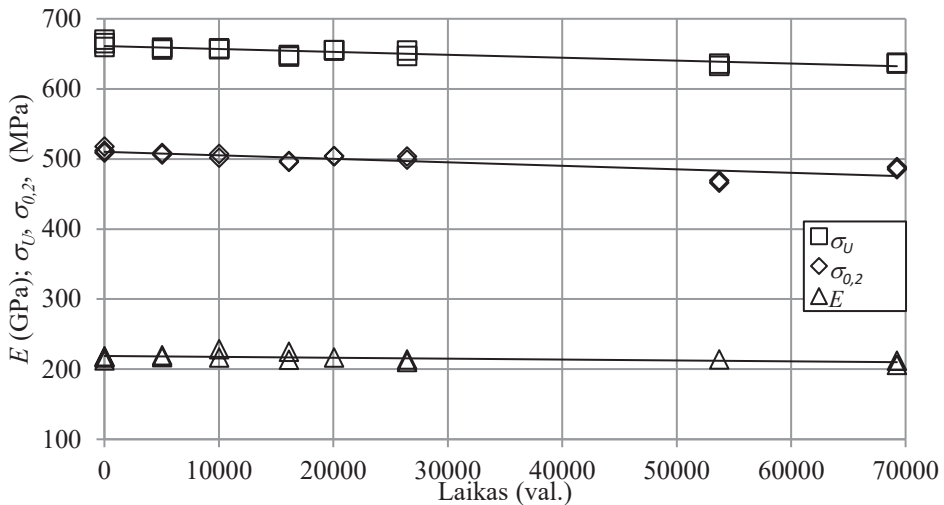
$$J_{limit} = b_0 \sigma_Y / 7,5; \quad (25)$$

čia b_0 – neįtrūkusi bandinio dalis, randama pagal $W-a_0$, m; a_0 – pradinis plyšio ilgis, m.

Nustačius $J-\Delta a$ kreivę, galingumo regresijos kreivės ir 0,2 mm lygiagretės sankirtos taške randama J_Q reikšmė.

2.8.1. Eksperimentiniai plieno P91 savybių ir J_{IC} tyrimai

Skaitinio J_{IC} nustatymo metodikos sudarymui atlikti išeities plieno P91 ir sendinto 10008 val. (~10000 val.) 600 °C temperatūroje ir 10872 val. (~11000 val.) 650 °C temperatūroje eksperimentiniai tyrimai. Iš viso buvo atlikta 16 eksperimentinių bandymų. Kad būtų lengviau palyginti tyrimo rezultatus, pagal [94] metodiką plieno P91 sendinimo laikas perskaičiuotas į ekvivalentinį sendinimo laiką, atitinkantį 600 °C. Tokiu būdu ~11000 val. 650 °C sendinimas atitinka ~70000 val. 600 °C sendinimą. Eksperimentiškai nustatytos [94] plieno P91 savybės, perskaičiuotos esant ekvivalentiniam sendinimo laikui, atitinkančiam 600 °C sendinimo temperatūrą, pateiktos 2.24 pav.



2.24 pav. Plieno P91 tamprumo modulio E , takumo ribos $\sigma_{0,2}$ ir stiprumo ribos σ_U priklausomybės nuo ekvivalentinio sendinimo laiko

Išeities ir sendinto plieno P91 J_{IC} tyrimo rezultatai pateikti 2.4 lent. Iš viso buvo atlikti 5 plieno P91 J_{IC} eksperimentinių tyrimų bandymai. Iš gautų rezultatų matyti, kad didėjant ekvivalentiniam sendinimo laikui plieno P91 J_{IC} reikšmė mažėja. Lyginant išeities plieno ir plieno, kurio sendinimo laikas siekia ~70000 val., vidutinė J_{IC} reikšmė sumažėjo 20 %.

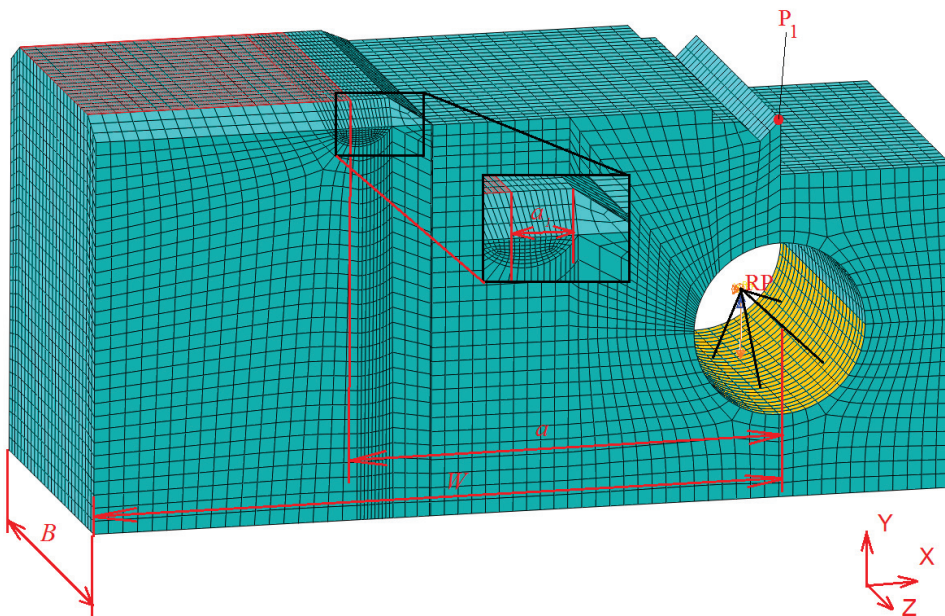
2.4 lentelė. Išėities ir sendinto plieno P91 eksperimentiškai nustatytos J_{IC} reikšmės

Ekvivalentinis sendinimo laikas, val.	J_{IC} , kN/m
0	509
~10000	475
	394
~70000	432
	379

Eksperimentiškai nustatytos išėities ir sendinto plieno P91 J - Δa ir J - v kreivės pristatytos 3.6 skyriuje kartu su skaitinio tyrimo rezultatais.

2.8.2. Trimatis skaitinis modelis J_{IC} tyrimui

Kritinio J-integralo J_{IC} skaitinio tyrimo principas – skaitinis eksperimentinio tyrimo modeliavimas. Atsižvelgiant į K_{IC} skaitinio tyrimo rezultatus, J_{IC} skaitiniam tyrimui sudarytas trimatis C(T) BE skaitinis modelis naudojant programą ABAQUS [87]. Skaitinio BE modelio tinklelis su kraštinėmis sąlygomis pavaizduotas 2.25 pav. Skaitinio C(T) bandinio modelio matmenys atitinka bandinio, skirto eksperimentiniams tyrimams, matmenis (2.22 pav.). Nuovarginio plyšio ilgis skaitiniame modelyje $a_I = 2,8$ mm.



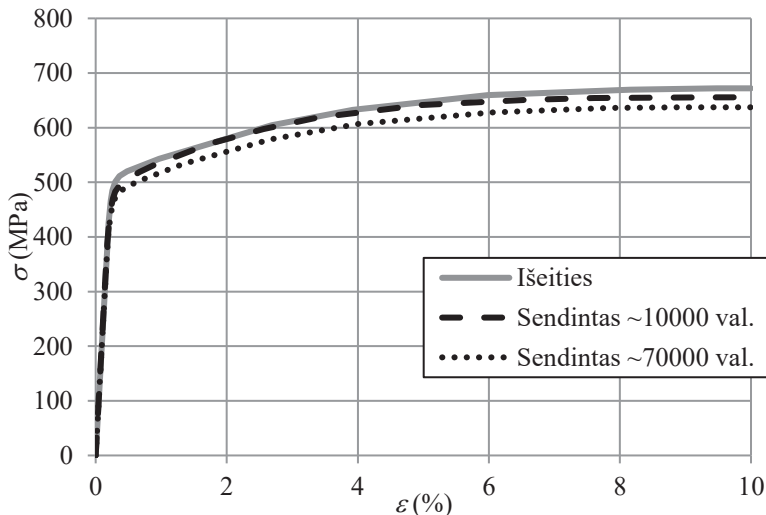
2.25 pav. C(T) bandinio trimatis BE modelis ir kraštinės sąlygos J_{IC} tyrimui

Kadangi C(T) bandinys, kraštinės sąlygos ir apkrovimas yra simetriški XZ plokštumos atžvilgiu, todėl buvo sumodeliuota tik pusė bandinio. Modelis sudalintas C3D20R elementais [87]. Tai trimačiai kubo formos elementai, turintys 20 mazgų.

Remiantis trimačio skaitinio modelio, skirto K_{IC} tyrimui, tinklelio įtakos skaičiavimo rezultatams tyrimo rezultatais, šiam modeliui sudalinti parinktas 1 mm dydžio BE tinklelis. C(T) bandinyje skirtam J_{IC} tyrimui suformuotas griovelis (2.22 pav.), kontroliuojantis plyšio didėjimo kryptį. Dėl to BE modelio geometrija tampa sudėtingesnė ir programa ABAQUS sudaryti apskritiminį BE tinklelį apie plyšio viršūnę naudojant singuliarinius elementus negalima. Vadovaujantis ABAQUS vartotojo instrukcijos rekomendacijomis [87], apie plyšio viršūnę apskritimine kryptimi sudarytas tinklelis naudojant tuos pačius elementus, C3D20R, kaip ir likusiai modelio daliai, tačiau padidinant tinklelio smulkumą, t. y. sumažinant elementų dydį. Optimaliam tinklelio dydžiui apie plyšio viršūnę parinkti atliktas J_I rezultatų palyginimas keičiant elementų dydį. Tyrimas parodė, kad apskritiminėje dalyje radialine kryptimi keičiant elementų skaičių nuo 5 iki 20 J_I rezultatas nesikeičia. Todėl pasirinkta šią dalį sudalinti naudojant 10 elementų radialine kryptimi.

Kraštinės sąlygos modelyje pridėtos analogiškai trimačiam BE modeliui skirtam K_{IC} tyrimui. Raudona spalva pažymėtai pjūvio plokštumai (2.25 pav.) pridėtos simetrijos kraštinės sąlygos. RP taško poslinkiai suvaržyti X ir Z koordinatės kryptimis, taip pat suvaržyti posūkiai apie Y ašį. Kaip apkrova buvo pridėtas poslinkis prie taško RP neigiama Y koordinatės ašies kryptimi. RP taškas su BE modelio cilindrinės skylės apatiniu paviršiumi, pažymėtu geltona spalva (2.25 pav.), standžiai sujungtas ryšio elementais. Didelėms deformacijoms ir poslinkiams įvertinti aktyvuota netiesinio geometrinio poveikio parinktis *Nlgeom* [87].

Skaitinio J_{IC} nustatymo metodikai sudaryti skaičiavimai atlikti naudojant nesendinto (išeities) ir sendinto iki ~10000 val. ir ~70000 val. plieno P91 savybes. Medžiagų modeliams aprašyti naudotos eksperimentiškai nustatytos medžiagos savybės pateiktos 2.24 pav. ir įtempių-deformacijų kreivės 2.26 pav. Visais atvejais buvo naudotas Puasono koeficientas $\nu = 0,3$.



2.26 pav. Išeities ir sendinto plieno P91 inžinerinės įtempių-deformacijų kreivės

Atlikus skaičiavimus gauti tokie rezultatai: reakcijos jėga, matuota RP taške, J-integralas J_I plyšio viršūnėje, plyšio atsivėrimo poslinkiai v . v buvo nustatyti sekant taško P_1 poslinkius Y koordinatės kryptimi (skaitiniame modelyje taškas P_1 sumodeliuotas briaunoje, ties kuria eksperimento metu montuojamas ekstenzometras).

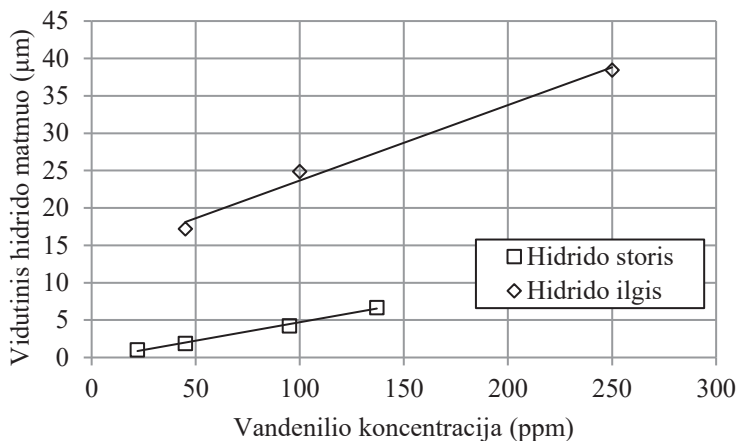
Pagal kritinio J-integralo J_{IC} nustatymo metodiką, aprašytą 2.8 skyriuje, reikia sudaryti J-integralo priklausomybę nuo plyšio padidėjimo. Kadangi skaitiniame modelyje plyšio didėjimas nėra modeliuojamas, todėl tiesiogiai išmatuoti plyšio padidėjimo negalima. Todėl plyšio padidėjimui nustatyti naudojama plyšio atsivėrimo poslinkių ir apkrovos santykio priklausomybė nuo plyšio padidėjimo. Sullivan ir Crooker [96] pristatė metodiką, leidžiančią, plyšio atsivėrimo poslinkius naudoti plyšio ilgiui nustatyti. Autoriai šiam tikslui siūlo naudoti daugianarę funkciją $a/W = f(E, B, v, F)$, o kai naudojamas C(T) bandinys su šoniniais grioveliais, bandinio storį B pakeisti nominaliu bandinio storium B_N . Kadangi daugianarė funkcija skirta plyšio pailgėjimui nustatyti, kurioje metodikoje siūloma ilgį a pakeisti plyšio pailgėjimu Δa .

Daugianarės funkcijos nustatymui sudarytos $EB_N v/F$ priklausomybės nuo $\Delta a/W$ kreivės ir daugianarės funkcijos plyšio padidėjimui nustatyti radimas bei skaitiškai nustatyto J_{IC} palyginimas su eksperimentiniais rezultatais aprašytas 3.6 skyriuje.

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR DISKUSIJA

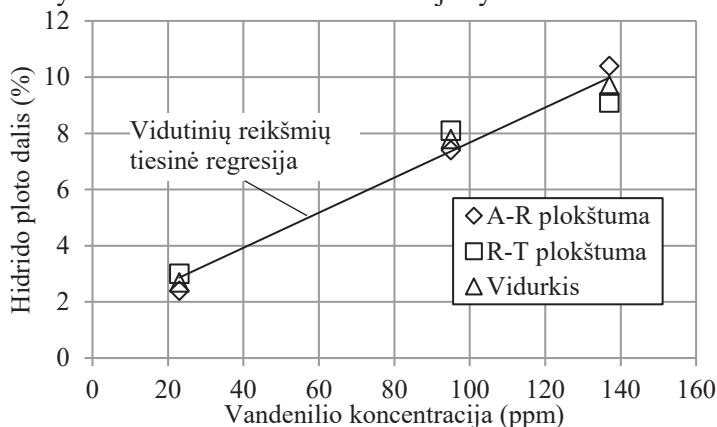
3.1. Hidridų dydžio matavimo rezultatai

Hidridų ilgio ir storio matavimai atlikti pagal metodiką, aprašytą 2.2 skyriuje. Išmatuotų hidridų vidutinių ilgių bei storių priklausomybės nuo vandenilio koncentracijos pavaizduotos 3.1 pav.



3.1 pav. Cirkonio hidrido ilgio ir storio priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos

Hidridų matmenų matavimai parodė, kad didėjant vandenilio koncentracijai cirkonio lydinyje didėja ir hidridų ilgis bei storis. Tiek hidrido storio, tiek ir hidrido ilgio priklausomybės nuo vandenilio koncentracijos yra tiesinės.



3.2 pav. Hidridų ploto dalies priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos

Hidridų tūrinės dalies cirkonio matricijoje nustatymas atliktas pagal metodiką, aprašytą 2.3 skyriuje. Rezultatai pateikti 3.2 pav. ir 3.1 lentelėje. Iš matavimo rezultatų matyti, kad hidridų procentinė tūrio dalis, nustatyta A-R plokštumoje, yra artima procentinei tūrio daliai, nustatyta R-T plokštumoje. Tai parodo, kad hidridų pasiskirstymas bei jų matmenys (ilgis ir storis) A-R ir R-T plokštumose yra panašūs, t. y. nesiskiria daugiau kaip 20 %.

3.1 lentelė. Hidridų ploto dalies analizės rezultatai

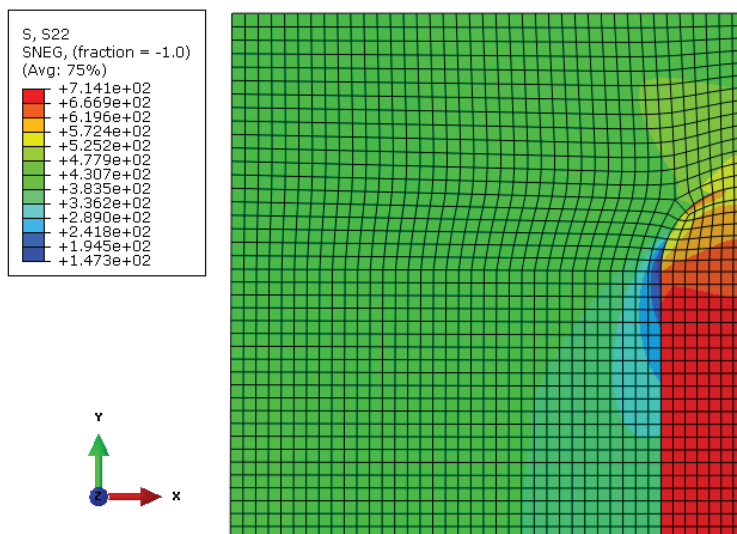
Vandenilio koncentracija, ppm	Hidridų ploto dalis, %		Vidurkis, %
	A-R plokštumoje	R-T plokštumoje	
23	2,4	3,0	2,7
84	7,4	8,1	7,8
137	10,4	9,1	9,7
460	32,0	28,6	30,3

Pagal metodiką (2.3 skyrius) nustatyta hidrido procentinę ploto dalį plokštumoje galima prilyginti procentinei tūrio daliai, t. y. gauti rezultatai pristatyti 3.2 pav. ir 3.1 lentelėje atitinka hidridų užimamą tūrinę dalį cirkonio matricioje.

3.2. Cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių skaitinio įvertinimo rezultatai

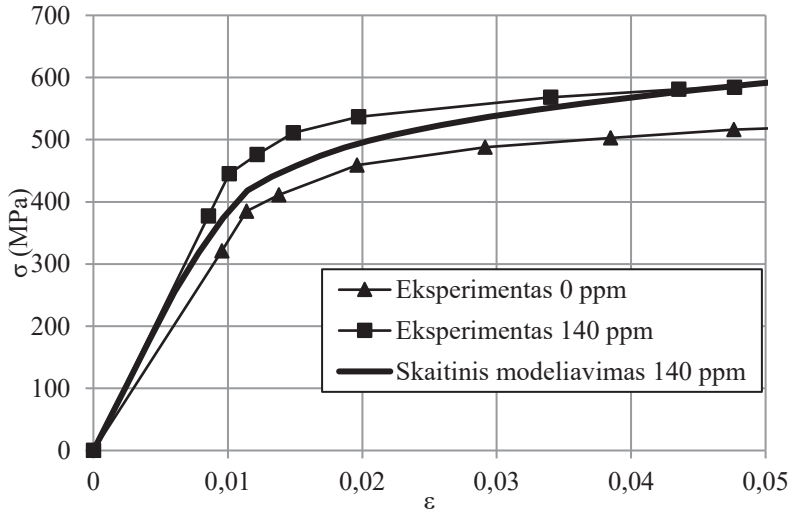
Cirkonio lydinio su hidridais mechaninių savybių (įtempių-deformacijų kreivės) skaitinis nustatymas atliktas naudojant 2.4.2 skyriuje aprašytą BE modelį. Skaičiavimai atlikti bandinių, pagamintų iš KK lydinio Zr-2,5Nb, kai vandenilio koncentracija yra 52, 100 ir 140 ppm, pagrindu.

3.3 pav. pavaizduotas įtempių pasiskirstymas BE modelyje, kai vandenilio koncentracija siekia 140 ppm. Čia pavaizduotas įtempių pasiskirstymas Y ašies kryptimi (jėgos pridėjimo kryptimi), kai deformacijos modelyje siekia 1,6 % (esant šioms deformacijoms geriausiai stebimas įtempių laukų perėjimas iš hidrido į cirkonio matricią). Įtempių laukų pasiskirstymas BE modelyje svarbus tuo, kad gali atskleisti modelio nekorektišką veikimą, neteisingą jėgų perdavimą ar blogą suvaržymą. Kadangi paveiksle matyti, kad tiek cirkonio lydinio dalyje, tiek ir hidrido dalyje įtempių laukų perėjimas yra sklandus, galime daryti išvadą, kad modelis veikia korektiškai.



3.3 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas esant 140 ppm vandenilio koncentracijai ir 1,6 % deformacijoms

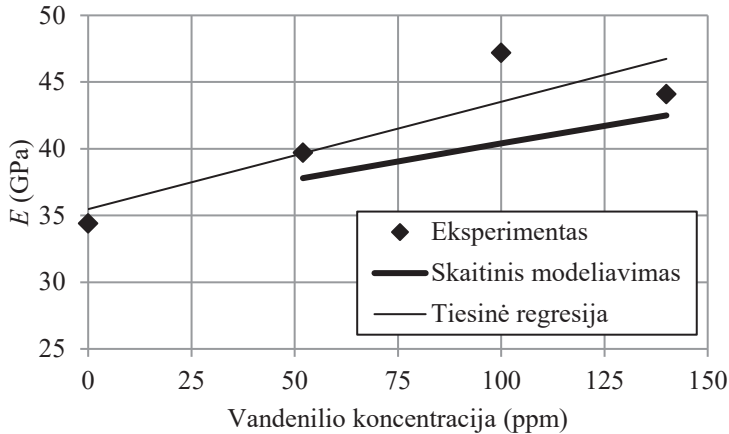
Skaitinio modeliavimo rezultatai (sudaryta įtempių-deformacijų kreivė), kai vandenilio koncentracija siekia 140 ppm, pavaizduoti 3.4 pav. Paveiksle jie palyginti su eksperimentiškai nustatytomis įtempių-deformacijų kreivėmis, rastomis [50] literatūroje, kai vandenilio koncentracija yra 0 ppm ir 140 ppm. Reikia pabrėžti, kad literatūroje [50] aprašytų eksperimentinių tyrimų bandiniai įsotinti vandeniliu ir hidridai juose suformuoti buvo Lietuvos energetikos institute tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir mikroslifų hidridų matmenų bei tūrinės dalies matavimams, aprašytiems šiame darbe.



3.4 pav. Skaitiškai nustatytos cirkonio lydinio Zr-2,5Nb su hidridais įtempių-deformacijų kreivės palyginimas su eksperimento duomenimis

3.4 pav. matyti, kad skaitinio modeliavimo rezultatai tampriojoje zonoje gerai sutampa su eksperimento duomenimis, tačiau plastinių deformacijų pradžioje skaitiškai nustatyti įtempiai atitolsta nuo eksperimento metu nustatytų įtempių. Taip pat reikia pabrėžti, kad skaitiškai nustatytoje įtempių-deformacijų kreivėje nėra įtempių kritimo, t. y. didėjant deformacijoms įtempių augimas palaipsniui lėtėja ir galiausiai sustoja, tačiau įtempiai nesumažėja, todėl nustatyti tikslios stiprumo ribos neįmanoma. Eksperimentinių tyrimų metu įtempių kritimas atsiranda dėl kaklelio bandinyje susidarymo (dėl bandinių mikrodefektų ar medžiagos nevienalytiškumo). Skaitiniame modelyje nagrinėjama sistema iš dviejų vienalyčių medžiagų (cirkonio matricos ir hidrido) neturinti geometrinių ar fizinių defektų.

Skaitiškai nustatyto tamprumo modulio palyginimas su eksperimentiškai nustatytu [50], esant skirtingai vandenilio koncentracijai, pavaizduotas 3.5 pav. Paveiksle taip pat pavaizduota eksperimentinių duomenų tiesinės regresijos tiesė. Skaitinio modeliavimo rezultatai, kaip ir eksperimento duomenys, rodo, kad didėjant vandenilio koncentracijai didėja ir tamprumo modulio reikšmė. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant didesnei vandenilio koncentracijai, hidrido tūrinė dalis yra didesnė (3.2 pav.), o tai reiškia, kad hidridas cirkonio lydinio savybėms daro didesnę įtaką. Kadangi hidrido tamprumo modulis yra didesnis, nei cirkonio lydinio (2.7 pav.), tai lemia visos sistemos (cirkonio lydinio su hidridu) tamprumo modulio padidėjimą.



3.5 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytos tamprumo modulio priklausomybės nuo vandenilio koncentracijos

3.2 lent. pateiktas cirkonio lydinio su hidridais tamprumo modulio ir takumo ribos skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas su eksperimento duomenimis. Matyti, kad skaitiškai nustatyto tamprumo modulio didžiausias nuokrypis siekia 9 %. Priklausomai nuo vandenilio koncentracijos skaitiškai nustatytos takumo ribos reikšmė nuo eksperimentiškai nustatytos kinta tarp 11 ir 14 %. Kaip ir eksperimentinių tyrimų metu, skaitiškai nustatyta takumo riba didėja, didėjant vandenilio koncentracijai, tačiau ne taip ženkliai.

3.2 lentelė. Zr-2,5Nb lydinio su hidridais mechaninių savybių skaitinio modeliavimo ir eksperimento [50] rezultatai

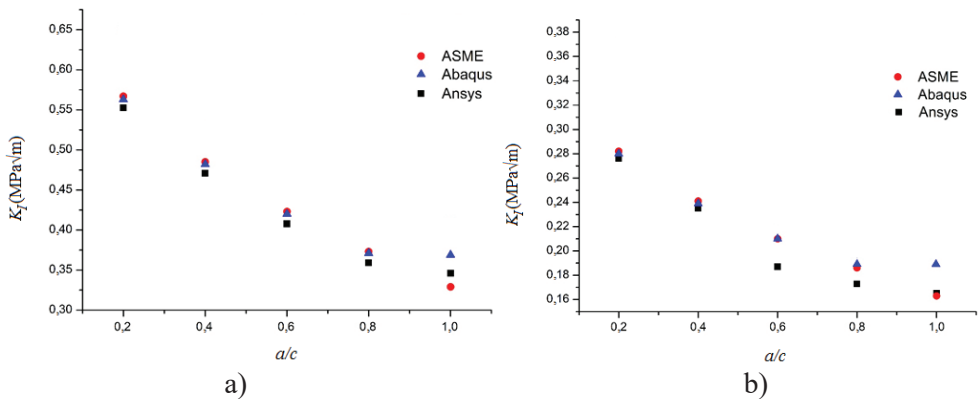
Vandenilio koncentracija, ppm	E, MPa		Nuokrypis, %	$\sigma_{0.2}$, %		Nuokrypis, %
	Eksperimento tiesinė regresija	Skaitinis modeliavimas		Eksperimentas	Skaitinis modeliavimas	
52	39,7	37,8	4,8	368	418	13,6
100	43,5	40,4	7,1	470	420	10,6
140	46,7	42,5	9,0	470	420	10,6

3.3. BE programos ABAQUS irimo mechanikos uždaviniams spręsti validavimo rezultatai

Programos ABAQUS irimo mechanikos uždaviniams spręsti validavimas atliktas palyginant įtempių intensyvumo koeficiento reikšmes plyšiuose, esančiuose Es-Salam reaktoriaus korpuse, apskaičiuotas analitiškai bei naudojant programas ABAQUS ir ANSYS. Es-Salam reaktorių, nagrinėti plyšiai, analitinių skaičiavimų metodika ir BE modelis, sudarytas programa ABAQUS, aprašyti 2.6 skyriuje.

Įtempių intensyvumo koeficientų reikšmių, nustatytų naudojant ABAQUS skaitinį modelį, ANSYS skaitinį modelį bei apskaičiuotų analitiškai (pagal ASME reikalavimus) palyginimas ašinio ir žiedinio plyšio atvejais pateiktas 3.6 pav.

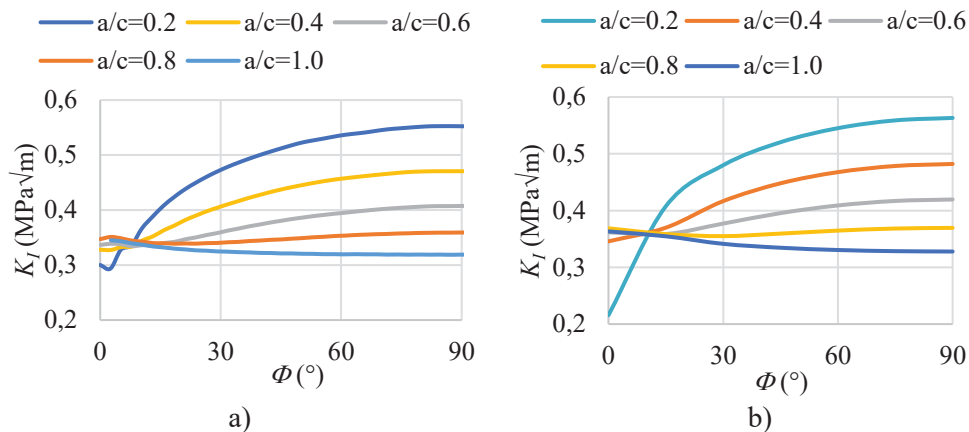
Paveiksle pateikti skaičiavimo rezultatai, kai plyšio gylio ir reaktoriaus korpuso sienelės storio santykis $a/t = 0,25$. K_I reikšmės šiame paveiksle nustatytos giliausiame plyšio taške, t. y., kai $\Phi = 90^\circ$. Iš paveikslo matyti, kad K_I reikšmės, suskaičiuotos programa ABAQUS, labai gerai sutampa su K_I , suskaičiuotomis analitiškai. Kiek didesnis ABAQUS rezultatų nukrypimas gautas, kai plyšio gylio ir ilgio santykis $a/c = 1,0$ ir siekia 7 % ir 18 % atitinkamai ašinio ir žiedinio plyšio atvejais. Lyginant įtempių intensyvumo koeficientų reikšmes, nustatytas programa ANSYS, su analitiškai apskaičiuotomis gautas didesnis nukrypimas, nei programa ABAQUS ašinio ir žiedinio plyšio atvejais, išskyrus, kai $a/c = 1,0$. Tai rodo, kad baigtinių elementų programa ABAQUS tiksliau nustato K_I negu ANSYS programa, o gautas tikslumas yra pakankamas. Todėl galima teigti, kad BE programa ABAQUS yra tinkama irimo parametrų modeliuoti ir jų skaitiniams tyrimams.



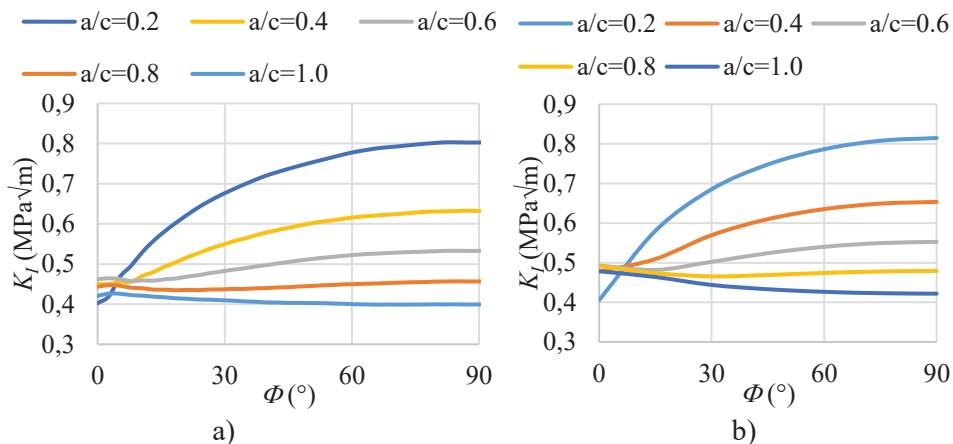
3.6 pav. ABAQUS, ANSYS ir analitiškai apskaičiuotų K_I reikšmių palyginimas, kai $a/t = 0,25$: a) ašinio plyšio atveju; b) žiedinio plyšio atveju

Skaitiškai nustatytų įtempių intensyvumo koeficiento K_I reikšmių pasiskirstymas plyšio viršūnėje esant įvairiems plyšio dydžiams ($a/c = 0,2-1,0$ ir $a/t = 0,25-0,8$) pavaizduotas 3.7-3.12 pav. ANSYS ir ABAQUS rezultatai paveiksluose pristatyti vienas šalia kito patogiam rezultatų palyginimui.

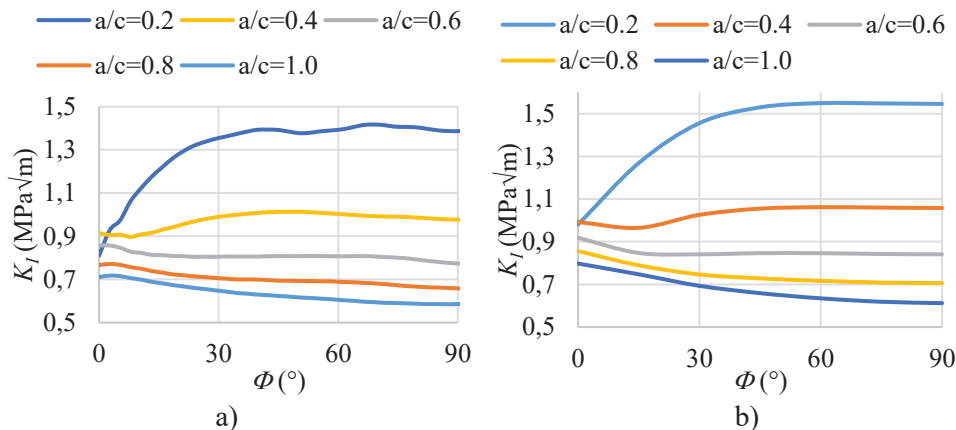
Lyginant ANSYS ir ABAQUS gautus rezultatus matyti, kad K_I pasiskirstymo pobūdis plyšio viršūnėje nustatytas panašus abejomis baigtinių elementų programomis, o jų skaitinės reikšmės panašios. Didesnis K_I skirtumas stebimas giliausio ir ilgiausio plyšio atveju bei prie laisvo paviršiaus, t. y., kai $\Phi = 0^\circ$. Kampui Φ viršijus 15° , ANSYS ir ABAQUS rezultatai suartėja. Gauti rezultatai parodo, kad programa ABAQUS galima skaičiuoti K_I ne tik giliausiame plyšio taške, bet ir kituose plyšio viršūnės taškuose.



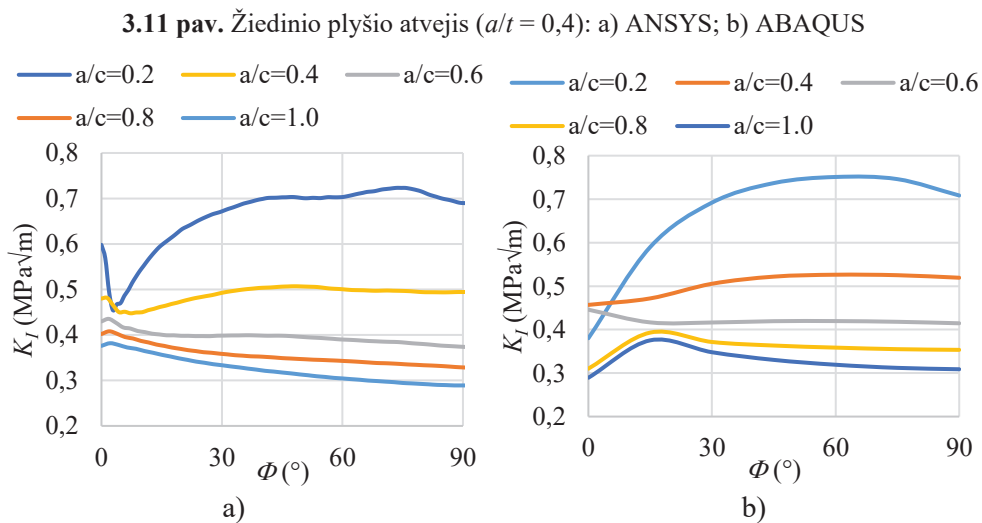
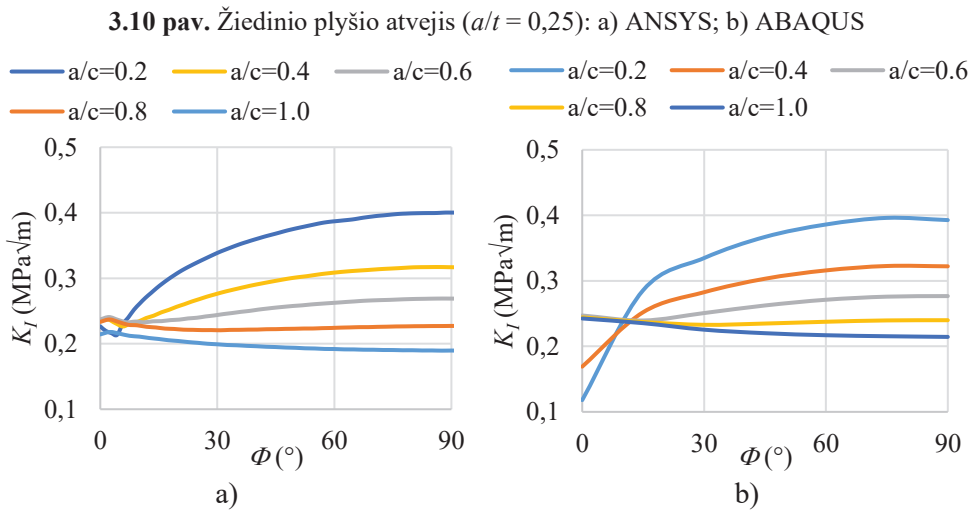
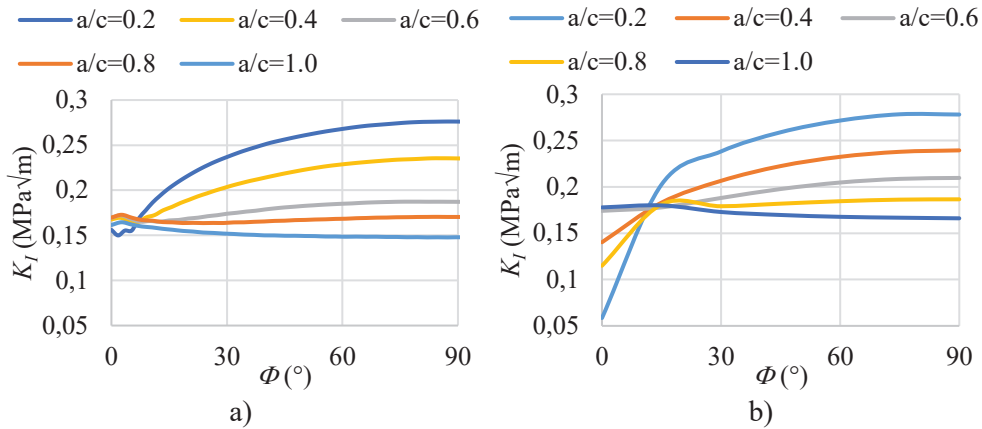
3.7 pav. Ašinio plyšio atvejis ($a/t = 0,25$): a) ANSYS; b) ABAQUS



3.8 pav. Ašinio plyšio atvejis ($a/t = 0,4$): a) ANSYS; b) ABAQUS



3.9 pav. Ašinio plyšio atvejis ($a/t = 0,8$): a) ANSYS; b) ABAQUS



Supaprastintam inžineriniam konstrukcijų su paviršiniais plyšiais įvertinimui naudojama Irwin'o lygtis, skirta įtempių intensyvumo koeficientui nustatyti begalinio dydžio plokštelėje su paviršiniu plyšiu [97]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}; \quad (26)$$

kur:

$$Q = 1 + 1.464(a/2c)^{1.65}; \quad (27)$$

o σ cilindre ašinio plyšio atveju randama pagal lygtį:

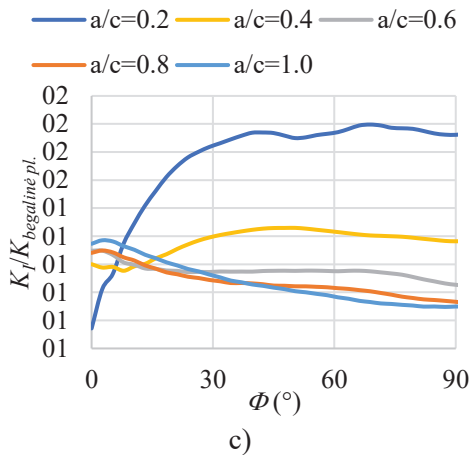
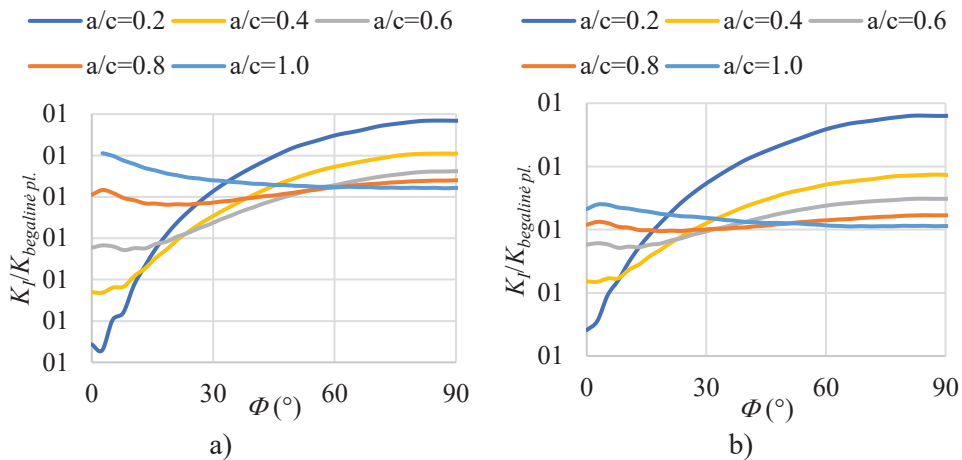
$$\sigma = \sigma_m = \frac{pr}{t}; \quad (28)$$

čia σ_m – membraniniai įtempiai, Pa; p – slėgis, Pa; r – cilindro spindulys, m.

Manoma, kad toks supaprastinimas leidžia nustatyti K_I cilindrinėse konstrukcijose su paviršiniais plyšiais 20 % tikslumu [98]. 3.13 pav. pavaizduotas supaprastinto ir skaitiniais metodais įvertinto K_I santykinis palyginimas. Abscisių ašyje pavaizduotas plyšio viršūnės kampas Φ , o ordinačių ašyje – skaitiškai nustatyto įtempių intensyvumo koeficiento santykis su įtempių intensyvumo koeficientu begalinio dydžio plokštelėje $K_I/K_{\text{begalinė pl.}}$.

Kadangi normalizuotos įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės giliausiame plyšio taške ($\Phi = 90^\circ$) visais nagrinėtais atvejais didesnės nei 1,0, galima teigti, kad vis tik susidaro pakankamas lenkimo įtempių kiekis net ir analizuojant plonasienį cilindrinį indą ($t/r = 0,006 < 0,1$). Pateikti rezultatai parodo, kad manyta 20 % paklaida, vertinant paviršinius plyšius cilindriniam slėgio inde supaprastintais skaičiavimais, ne visais atvejais yra teisinga. Paklaida priklausomai nuo a/c ir a/t santykių gali būti didesnė, o $a/c = 0,2$ ir $a/t = 0,8$ atveju gali siekti net 65 %.

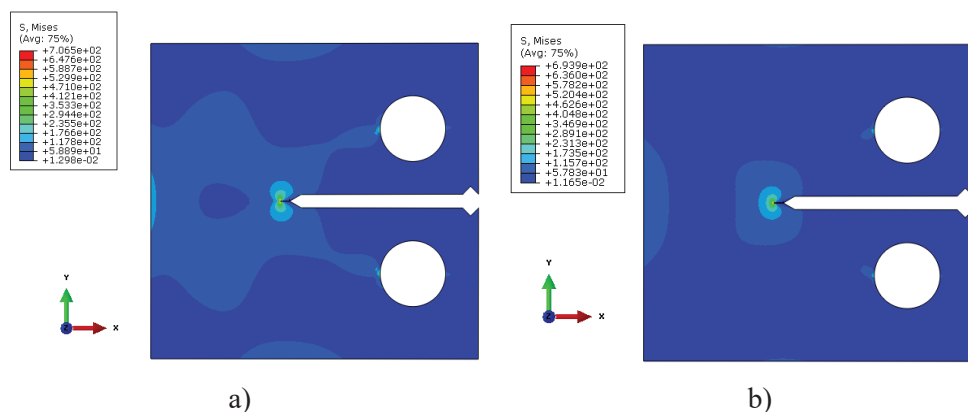
Ašinių ir žiedinių plyšių įtempių intensyvumo koeficientų didžiausios reikšmės pasiekiamos giliausiame plyšio taške ($\Phi = 90^\circ$) esant mažam a/c santykiui, o esant dideliame a/c santykiui didžiausios K_I reikšmės nustatytos ties plyšio viršūnės ir slėgio indo sienelės sankirta ($\Phi = 0^\circ$). Gauti rezultatai sutampa su Newman ir Raju [99] rezultatais.



3.13 pav. Supaprastinto ir skaitiškai nustatyto įtempių intensyvumo koeficiento per plyšio viršūnę palyginimas: a) $a/t = 0,25$; b) $a/t = 0,4$ c) $a/t = 0,8$

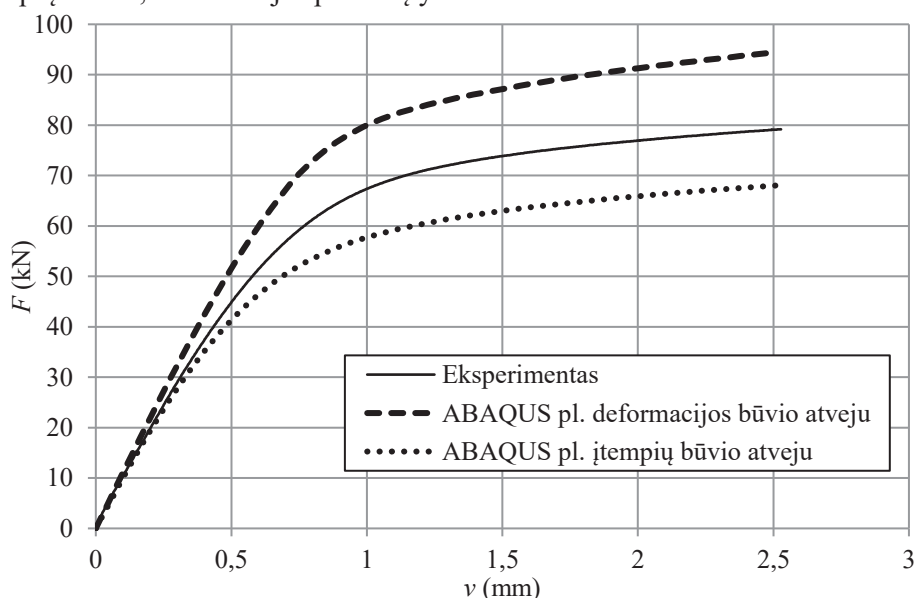
3.4. Dvimačio skaitinio modelio K_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai

Skaitinio dvimačio C(T) bandinio modelio, aprašyto 2.7.2 skyriuje, tyrimas atliktas plokščios deformacijos bei plokščio įtempių būvio atvejais. Ekvivalentinių įtempių pasiskirstymas abiejų būvių atvejais pateiktas 3.14 pav. a ir b. Paveiksle pateikti rezultatai esant labai mažam plyšio atsivėrimo poslinkiui – $v = 0,07$ mm. Kai BE modelio apkrovimo lygis nedidelis, geriausiai matosi, kur yra linę koncentruotis įtempiai. Kaip tikėtasi, didžiausi įtempiai susidaro plyšio viršūnėje, o įtempių laukai tęsiasi nuo skylių briaunų, kur yra pridėti tempimo poslinkiai, iki plyšio viršūnės. Tai rodo, kad BE modelis veikia teisingai.



3.14 pav. Ekvivalentinių (Mizeso) įtempių pasiskirstymas, kai plyšio atsivėrimo poslinkiai $v = 0,07$ mm: a) plokščio deformacijų būvio atvejis; b) plokščio įtempių būvio atvejis

Skaičiavimo rezultatai naudojant plieno P91 išeties mechanines savybes pateikti 3.15 pav. Šiame paveiksle pateiktos tempimo jėgos F priklausomybės nuo plyšio atsivėrimo poslinkių v , nustatytos eksperimentiškai bei naudojant dvimatį skaitinį BE modelį. Kaip matyti paveiksle, skaitiškai nustatyta tempimo jėga F yra didesnė 20 % esant plokščios deformacijos būvio atveju, o esant plokščio įtempių būvio atveju – mažesnė 13 % už jėgą, nustatytą eksperimentiškai, kai $v = 2,5$ mm. Tamprumo teorijoje [100] plokščios deformacijos būvis taikomas analizuojant storas struktūras, kai deformacijos per storį nėra svarbios. Plokščias įtempių būvis – priešingai, taikomas, kai analizuojamos plonos struktūros. Šiuo atveju, esant dviašiam įtempių būviui, deformacijos per storį yra svarbios.

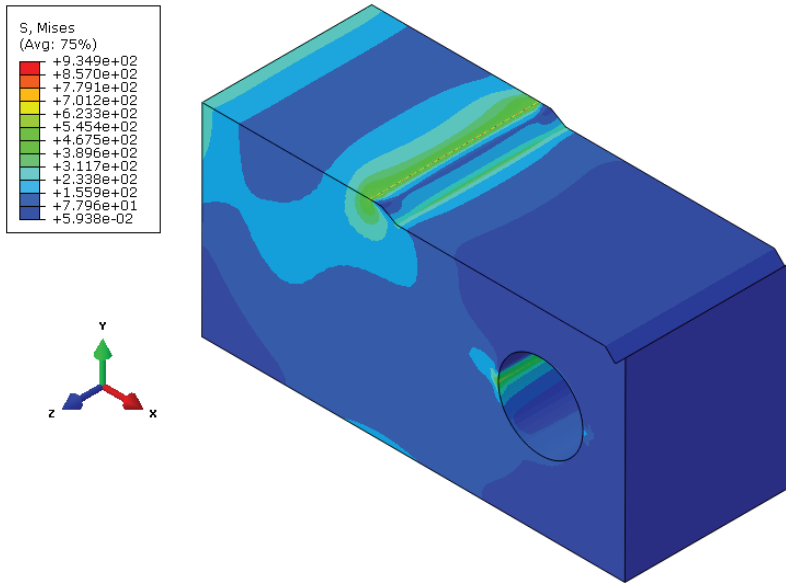


3.15 pav. F priklausomybės nuo v , gautos skaitinio modeliavimo būdu, naudojant dvimačius plokščios deformacijos ir plokščio įtempių būvių BE modelius ir eksperimentinio tyrimo metu

Akivaizdu, kad analizuojant $W = 50$ mm pločio standartinių matmenų kompaktinį tempimo bandinį C(T), kurio storis $B = 25$ mm, dvimatis skaitinis modelis nėra tinkamas, todėl K_{IC} nustatymo metodikos sudarymui tirtas trimatis skaitinis BE modelis, aprašytas 2.7.3 skyriuje. Šio modelio tyrimo rezultatai pristatyti 3.5 skyriuje.

3.5. Trimačio skaitinio modelio K_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai

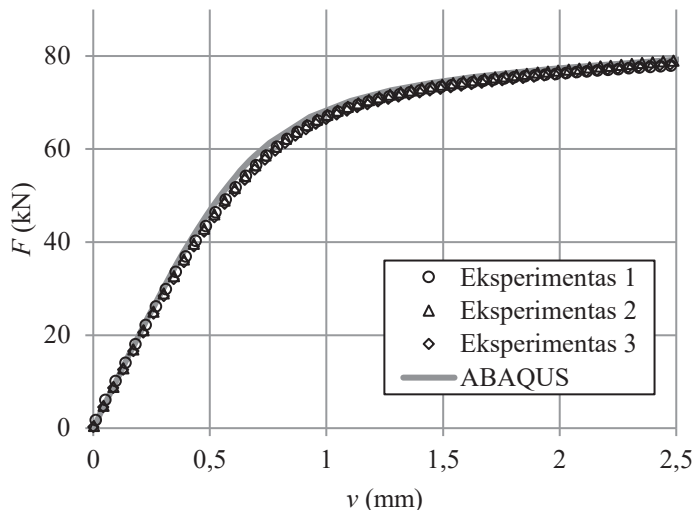
2.7.3 skyriuje aprašyto C(T) bandinio trimačio BE modelio, skirto nustatyti K_{IC} , ekvivalentinių įtempių pasiskirstymas, kai $v = 0,2$ mm, pateiktas 3.16 pav. Kaip ir dvimačių modelių atveju matyti, kad didžiausi įtempiai susidaro plyšio viršūnėje, o įtempių laukai sklandžiai pasiskirsto nuo jėgos pridėjimo paviršiaus (nuo cilindrinės skylės apatinės pusės paviršiaus, kuriam pridėti plyšį atveriantys poslinkiai) iki plyšio viršūnės. Iš to galima spręsti, kad apkrovimas ir kraštinės sąlygos pridėtos teisingai ir modelis veikia korektiškai.



3.16 pav. Ekvivalentinių (Mizeso) įtempių pasiskirstymas trimačiame BE modelyje, kai plyšio atsivėrimo poslinkiai $v = 0,2$ mm

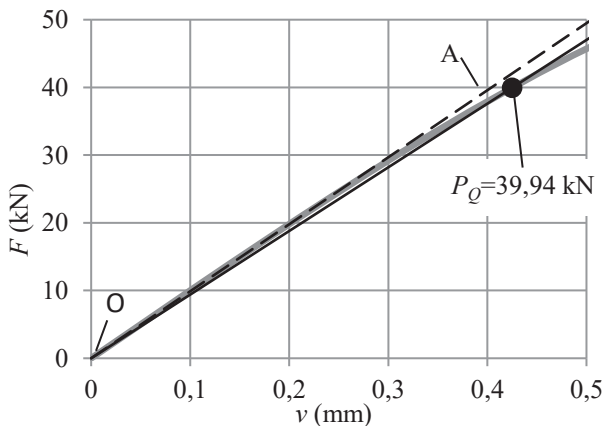
Kaip aprašyta 2.7 skyriuje, kritinio įtempių intensyvumo koeficiento nustatymui pirmiausia reikia sudaryti tempimo jėgos F priklausomybę nuo plyšio atsivėrimo poslinkių v . Šiam tikslui atliekama netiesinė C(T) bandinio tempimo skaitinė analizė įvertinant tamptariai plastines medžiagos savybes. Analizė atlikta naudojant trimatį BE modelį, aprašytą 2.7.3 skyriuje. Eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos išeities (nesendinto) plieno P91 F priklausomybės nuo v kreivės pateiktos 3.17 pav. Šame paveiksle skaitinio tyrimo rezultatai palyginti su trijų bandinių eksperimentinio tyrimo rezultatais (pastarieji pavaizduoti apskritimo formos taškais). Skirtingų eksperimentų rezultatų taškai labai arti vienas kito. Tai rodo labai didelį eksperimentinių matavimų, jėgos ir plyšio atsivėrimo poslinkių, tikslumą. Skaitiniais tyrimais naudojant trimatį

BE modelį gauta F - v kreivė gerai sutampa su eksperimento duomenimis, nes didžiausias nuokrypis neviršija 5 %.



3.17 pav. F priklausomybės nuo v skaitinio modeliavimo naudojant trimatį BE modelį ir eksperimentinių tyrimų rezultatai

Pagal ASTM E399-12e3 [93] reikalavimus, aprašytus 2.6 skyriuje, nustatius F - v kreivę galima rasti P_Q ir P_{max} jėgas. Išėjties plieno P91 P_Q jėgos nustatymo rezultatai pavaizduoti 3.18 pav.

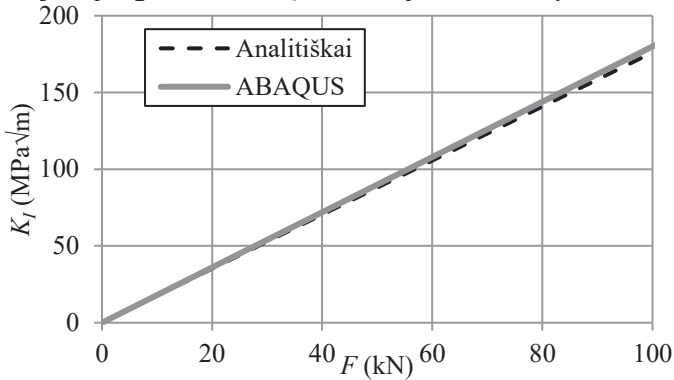


3.18 pav. P_Q jėgos nustatymo rezultatai

Žinant sąlyginę jėgą P_Q galima rasti sąlyginį įtempių intensyvumo koeficientą K_Q . Kadangi programoje ABAQUS yra įdiegtos procedūros, leidžiančios įvertinti įtempių intensyvumo koeficiento K_I vertę plyšio viršūnėje, K_Q galima nustatyti skaitiškai arba apskaičiuoti analitiškai naudojant (22, 23) lygtis, aprašytas 2.6 skyriuje. Programos ABAQUS K_I įvertinimo tikslumo patikrinimas pateiktas 3.19 pav. Paveiksle pavaizduotos K_I priklausomybės nuo F nustatytos analitiškai ir

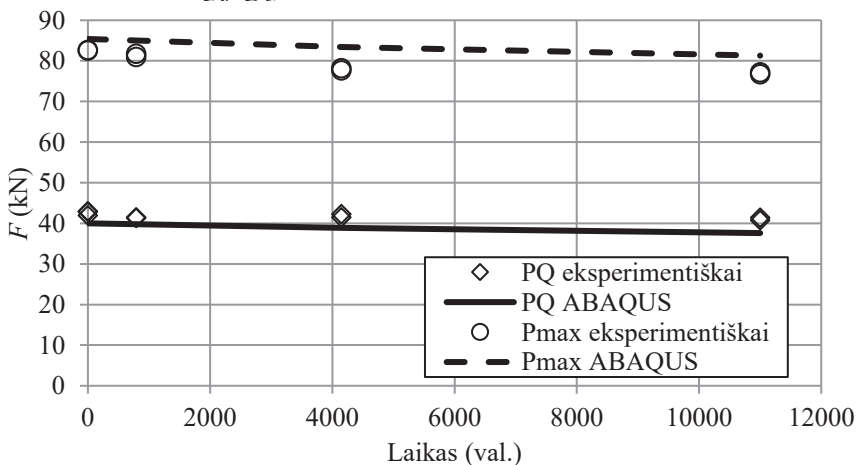
naudojant programą ABAQUS. Matyti, kad skaitiškai sudaryta tiesė gerai sutampa su tiese, apskaičiuota analitiškai, o K_I reikšmės skirtumas tesiekia 2 %, kai $F = 50$ kN. Skaitiškai nustatytos K_I reikšmės nukrypimas nuo apskaičiuotos analitiškai gaunamas todėl, kad analitiniam K_I nustatymui naudojamos lygtys pagal reikalavimus ASTM E399-12e3, skirtos plokščio deformacijų būvio irimo tąsumui įvertinti, kur deformacijos išilgai bandinio storio nevertinamos. Tačiau trimatis BE modelis deformacijas ir įtempius įvertina trimis kryptimis.

Atsižvelgiant į šiuos rezultatus, toliau K_Q ir K_{max} reikšmės bus nustatomos skaitiškai, naudojant programa ABAQUS sudaryta K_I - F tiesę.



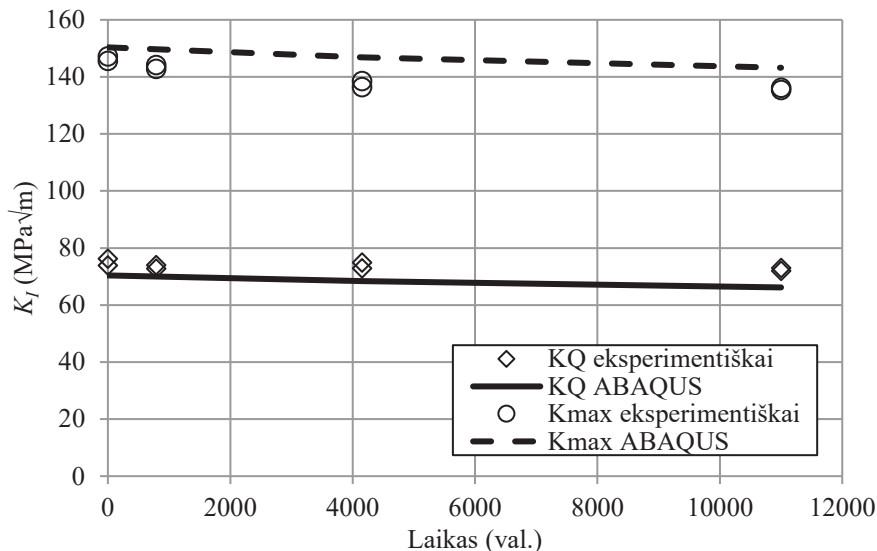
3.19 pav. K_I priklausomybės nuo F , nustatytos analitiškai ir skaitiškai, naudojant programą ABAQUS

Išeities ir sendinto plieno P91 skaitiškai nustatytų P_Q ir P_{max} jėgų palyginimas su eksperimentiškai nustatytais pavaizduotas 3.20 pav. Skaitiškai plieno P91 sendinimo efektas įvertinamas naudojant sendinto plieno medžiagos savybes. Iš paveikslu matyti, kad skaitiškai nustatytos P_Q jėgos mažesnės, o P_{max} jėgos – didesnės, nei gautos eksperimentiškai, tačiau skirtumas nėra didelis. Didžiausias 9 % nuokrypis užfiksuotas nustatant P_Q jėgą, esant 11000 val. sendinimo laikui.



3.20 pav. Eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos P_Q ir P_{max} jėgos esant skirtingam plieno P91 sendinimo laikui

Eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos K_Q ir K_{max} reikšmės pavaizduotos 3.21 pav. Iš paveikslo matyti, kad didėjant sendinimo laikui tiek eksperimentiškai, tiek ir skaitiškai nustatytos K_Q ir K_{max} reikšmės mažėja. Kaip ir P_Q jėgos atveju, skaitiškai nustatytos K_Q reikšmės yra mažesnės už nustatytas eksperimentiškai, o K_{max} – didesnės. Tačiau skirtumas tarp eksperimentinių ir skaitinių rezultatų nėra didelis, didžiausias nuokrypis neviršija 9 %. Įtempių intensyvumo koeficiento reikšmių sumažėjimas po 11000 val. sendinimo, lyginant su išeities bandinių duomenimis, nėra didelis, eksperimentiškai nustatytos K_Q ir K_{max} reikšmės atitinkamai sumažėja 4 % ir 7 %, o skaitiškai – 6 % ir 5 %.



3.21 pav. Eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos K_Q ir K_{max} esant skirtingam plieno P91 sendinimo laikui

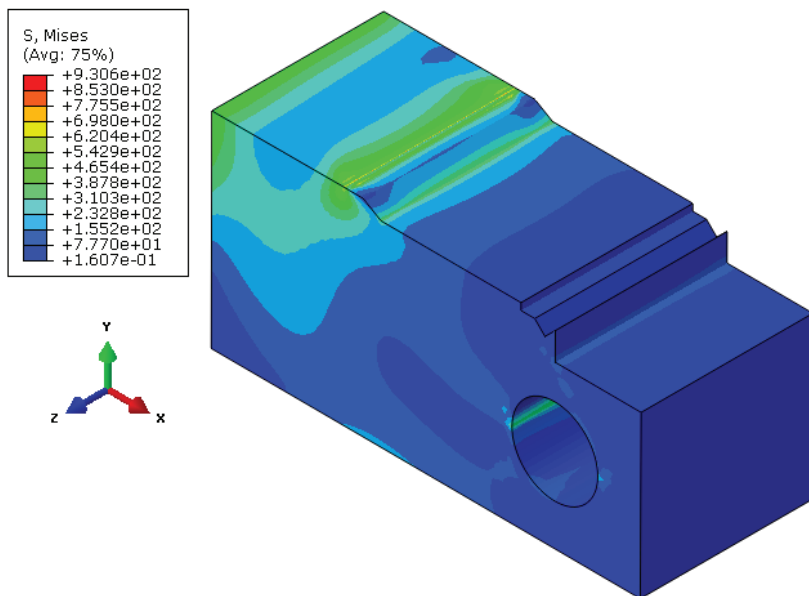
Tam, kad nustatytas sąlygines įtempių intensyvumo koeficiento reikšmės būtų galima prilyginti kritiniam įtempių intensyvumo koeficientui $K_Q = K_{IC}$, buvo patikrintos reikalavimuose ASTM E399-12e3 [93] aprašytos sąlygos. Visais išeities ir sendinto plieno P91 tyrimo atvejais nebuvo išlaikyta $P_{max}/P_Q \leq 1,1$ sąlyga. Todėl, net ir tiriant santykinai storus ($B = 25$ mm) bandinius, nustatytos $K_Q \neq K_{IC}$. Tai rodo, kad plienas P91 net ir po ilgo išlaikymo aukštoje temperatūroje išlieka plastiškas. Pagal reikalavimus ASTM E399-12e3, jei sąlyga $P_{max}/P_Q \leq 1,1$ nėra tenkinama, medžiagos irimo tūsumo įvertinimui turi būti nustatomas kritinis J-integralas pagal reikalavimus ASTM E1820-15 [54].

Nors tiriant plieną P91 nustatyti K_{IC} nepavyko, tačiau skaitinių tyrimų rezultatų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis parodė gerą sutapimą ir skaitinės metodikos tinkamumą trapių medžiagų K_{IC} nustatymui.

3.6. Trimačio skaitinio modelio J_{IC} nustatymui tyrimo rezultatai

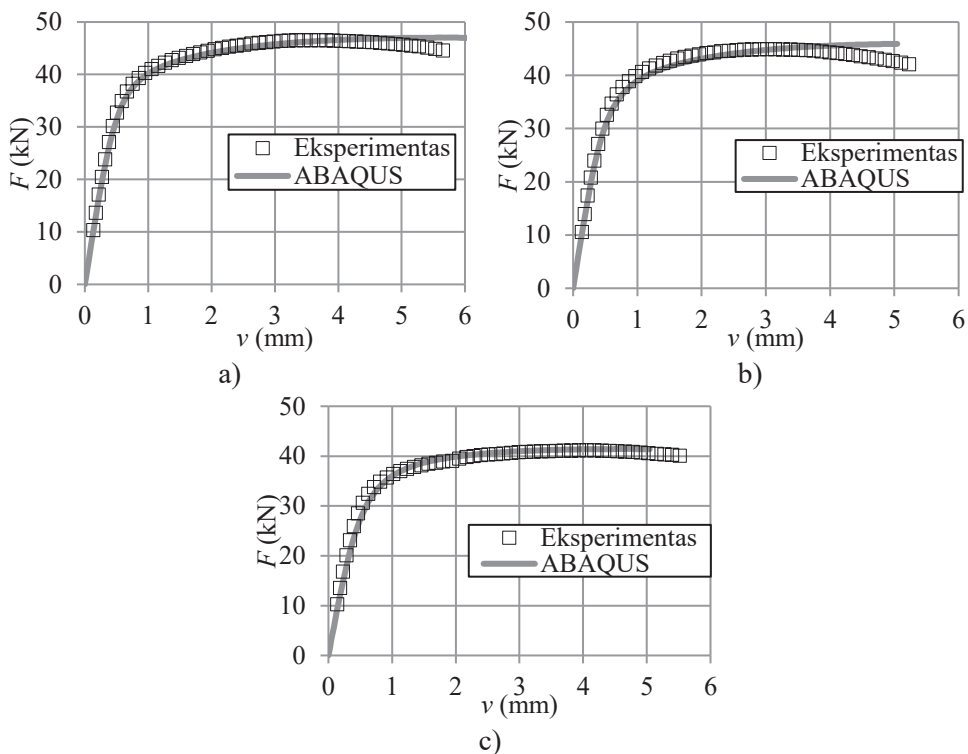
Skaitinio J_{IC} nustatymo metodikos sudarymui skirtu C(T) bandinio trimačio modelio tyrimo rezultatai pateikti 3.22–3.25 pav.

3.22 pav. pateikiamas ekvivalentinių įtempių pasiskirstymas C(T) bandinio BE modelyje skirtame J_{IC} nustatyti, kai $v = 0,33$ mm. Kaip ir dvimačiuose BE modeliuose, didžiausi įtempiai koncentruojasi plyšio viršūnėje, o įtempių laukai nuosekliai pasiskirsto nuo jėgos pridėjimo paviršiaus iki plyšio viršūnės. Todėl daroma išvada, kad apkrovimas ir kraštinės sąlygos pridėtos teisingai ir modelis veikia korektiškai.

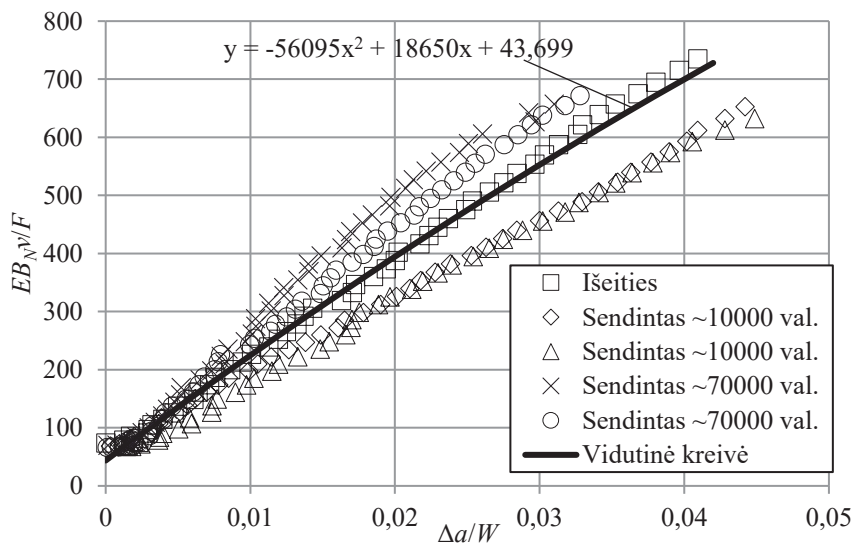


3.22 pav. Ekvivalentinių (Mizeso) įtempių pasiskirstymas trimačiame BE modelyje, skirtam J_{IC} nustatymui, kai plyšio atsivėrimo poslinkiai $v = 0,33$ mm

3.23 pav. pateiktos skaitiška ir eksperimentiška nustatytos C(T) tempimo jėgos F priklausomybės nuo plyšio atsivėrimo poslinkio v . Paveikslė pateikti išeities plieno P91 (a), sendinto iki ~ 10000 val. (b) ir sendinto iki ~ 70000 val. (c) rezultatai. Iš paveikslų matyti, kad skaičiavimų rezultatai gerai sutampa su eksperimentiška nustatytomis kreivėmis iki tempimo jėgos didžiausios reikšmės, t. y. iki kreivių viršūnių (didžiausias užfiksuotas nuokrypis neviršija 4 %). Tačiau skaitinio modelio rezultatai atitolsta nuo eksperimentiška nustatytos kreivės, kai plyšio atsivėrimo poslinkiai v viršija F - v kreivės viršūnę, t. y., kai eksperimentiška nustatytose kreivėse jėga pradeda mažėti. Eksperimentiška nustatytose kreivėse C(T) bandinio tempimo jėga pradeda mažėti dėl plyšio didėjimo bandinyje. Kadangi skaitiniame BE modelyje plyšio didėjimas nemodeliuojamas, jėgos kritimas nenustatomas. Pažymėtina, kad nors tiesiogiai plyšio didėjimas ir nėra modeliuojamas, tačiau programoje ABAQUS J -integralo J_I skaičiavimams įdiegti virtualūs plyšio padidėjimo įvertinimo algoritmai [101].



3.23 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytos plieno P91 C(T) bandinio jėgos priklausomybės nuo plyšio atsivėrimo ploslinkių: a) išėities medžiaga; b) sendintas plienas ~10000 val.; c) sendintas plienas ~70000 val.



3.24 pav. Plieno P91 EB_{Nv}/F priklausomybė nuo $\Delta a/W$

Daugianarės funkcijos radimui, kuri vėliau bus naudojama plyšio padidėjimui nustatyti, naudojant C(T) bandinio eksperimentinius tempimo rezultatus, sudarytos EB_{Nv}/F priklausomybės nuo $\Delta a/W$ pateiktos 3.24 pav. Jos gautos naudojant išeitius ir sendintų plienu P91 rezultatus, pagal kurias sudaryta jų vidutinė kreivė.

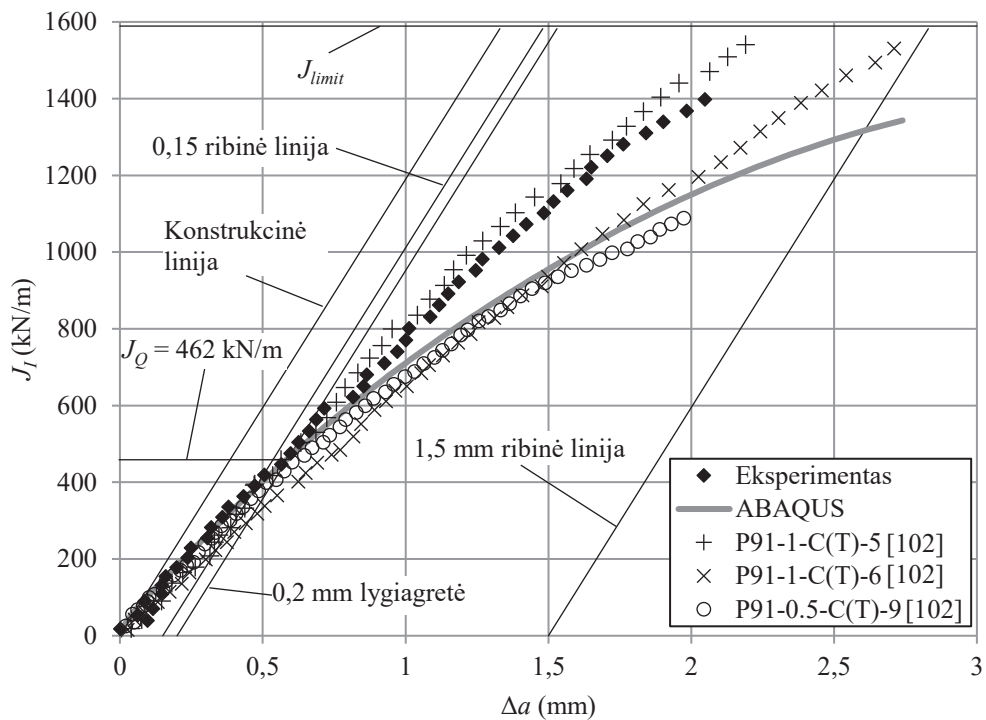
Naudojant 3.24 pav. pateiktą vidutinę kreivę nustatyta ją aprašanti antro laipsnio daugianarė funkcija:

$$\frac{EB_{Nv}}{F} = -56095 \left(\frac{\Delta a}{W} \right)^2 + 18650 \left(\frac{\Delta a}{W} \right) + 43,699. \quad (29)$$

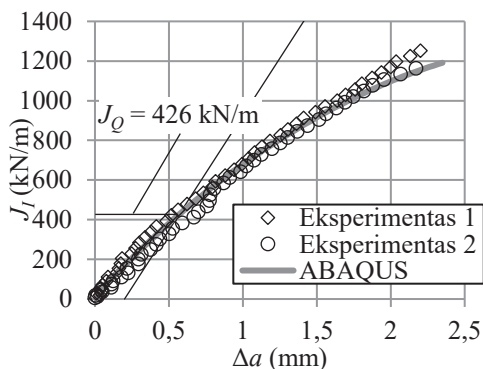
J_I reikšmė plyšio viršūnėje apskaičiuojama pagal programoje ABAQUS įdiegtą algoritmą. Naudojant trimatį BE modelį programa ABAQUS apskaičiuoja J_I visuose plyšio viršūnėje esančiuose mazguose, todėl J_{IC} nustatyti bei rezultatams su eksperimento duomenimis palyginti apskaičiuojama vidutinė skaitiškai nustatyto J_I reikšmė per bandinio storį. Žinant C(T) bandinio skaitiškai nustatytas F priklausomybes nuo v (3.23 pav.), pagal (29) lygtį galima apskaičiuoti plyšio padidėjimą Δa . Tokiu būdu skaitiškai sudarytos J_I priklausomybės nuo Δa esant išeitius ir sendintam plienui P91 pateiktos 3.25 pav. Paveiksle jos palygintos su nustatytomis eksperimentiškai (viena kreivė išeitius plieno atveju ir su dvejomis eksperimentiškai nustatytomis kreivėmis sendinto ~10000 val. ir sendinto ~70000 val. plieno atvejais). Išeitius plieno P91 atveju (3.23 a pav.) skaitiškai sudaryta kreivė papildomai palyginta ir su kreivėmis, rastomis literatūroje [102]. Kaip matyti iš paveikslo, skaitiškai nustatyta J_I - Δa kreivė gerai sutampa su eksperimentiškai nustatyta kreive iki plyšio padidėjimas pasiekia 0,8 mm. Plyšio padidėjimui viršijus 0,8 mm skaitiškai nustatyta kreivė nutolsta nuo nustatytos eksperimentiškai, tačiau neblogai sutampa su P91-1-C(T)-6 ir P91-0.5-C(T)-9 kreivėmis, rastomis literatūroje [102]. Šios kreivės – tai Konopík ir Viehrig tirtu plieno P91 tyrimo rezultatai kambario temperatūroje naudojant standartinių matmenų (P91-1-C(T)-5 ir P91-1-C(T)-6) kompaktinius tempimo bandinius ir bandinį kurio storis du kartus mažesnis (P91-0.5-C(T)-9).

Sendinto plieno P91 skaitiškai nustatytų J_I - Δa kreivių palyginimas su nustatytomis eksperimentiškai kreivėmis pateiktas 3.23 b ir c pav. Sendinto ~10000 val. plieno P91 atveju gautas geras skaitinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimas. Sendinto ~70000 val. atveju antroji kreivės pusė kiek daugiau nutolsta nuo eksperimento rezultatų, tačiau svarbiausia, pirmoji kreivės dalis, kur 0,2 mm lygiagretė kerta J_I - Δa kreivę, sutampa gerai (nuokrypis siekia 9 %).

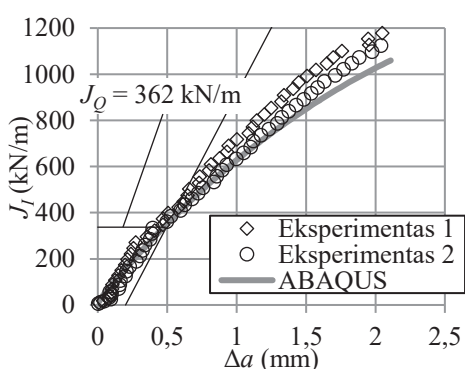
Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytų J_Q reikšmių palyginimas pateiktas 3.3 lent. Iš jos matyti, kad skaitiškai nustatytos J-integralo reikšmės visais atvejais yra mažesnės už J_Q vidutinės reikšmės nustatytas eksperimentiškai. Didžiausias rezultatų nukrypimas (11 %) gautas esant ~70000 val. sendinimui. Reikia paminėti, kad kritinis J-integralas yra jautri charakteristika ir didelis rezultatų išsibarstymas yra dažnas reiškinys. Palyginimui Konopík ir Viehrig [102] tyrimų metu nustatytos plieno P91 J_Q reikšmės išsibarstė gan plačiai – nuo 289 kN/m iki 523 kN/m.



a)



b)



c)

3.25 pav. Eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos plieno P91 J_I - Δa kreivės: a) išeities; b) sendinto ~10000 val.; c) sendinto ~70000 val.

Patikrinus eksperimento ir skaitinio modeliavimo rezultatus pagal standartą ASTM E1820-15 [54] visi reikalavimai ir sąlygos yra tenkinami, todėl galima teigti, kad išeities ir sendinto plieno P91 eksperimentiškai ir skaitiškai nustatytos $J_Q = J_{IC}$.

3.3 lentelė. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytos plieno P91 J_Q reikšmės

Ekvivalentinis sendinimo laikas, val.	J_Q , kN/m			Nuokrypis, %
	Eksperimentas	Vidurkis	Skaitinis modeliavimas	
0	509	509	462	9
~10000	475	434,5	426	2
	394			
~70000	432	405,5	362	11
	379			

Šiame skyriuje pateiktas skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas su eksperimento tyrimo rezultatais patvirtina, kad 2.8 skyriuje aprašyta skaitinio J_{IC} įvertinimo metodika yra tinkama plastiškų medžiagų irimo tūsumui nustatyti.

Kitame disertacijos skyriuje yra pristatomas sukurtos skaitinės irimo tūsumo metodikos taikymas Zr-2,5Nb lydiniai su hidridais.

4. CIRKONIO LYDINIUI SU HIDRIDAIS IRIMO TĄSUMUI ĮVERTINTI SKIRTOS SKAITINĖS METODIKOS TINKAMUMO DEMONSTRAVIMAS

Šiame disertacijos skyriuje aprašytas vandeniliu įsotinto cirkonio lydinio irimo tąsumui įvertinti skirtos skaitinės metodikos tinkamumo demonstravimas ir pristatyti gauti rezultatai. Pagal sukurta skaitinio tyrimo metodiką TMO-2 KK irimo tąsumui įvertinti nustatytas vandeniliu įsotinto Zr-2,5Nb lydinio sąlyginis įtempių intensyvumo koeficientas ir kritinis J-integralas. Skaitinio tyrimo rezultatai palyginti su eksperimentinio tyrimo duomenimis [50].

4.1. Vandeniliu įsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio skaitinis kritinio įtempių intensyvumo koeficiento įvertinimas

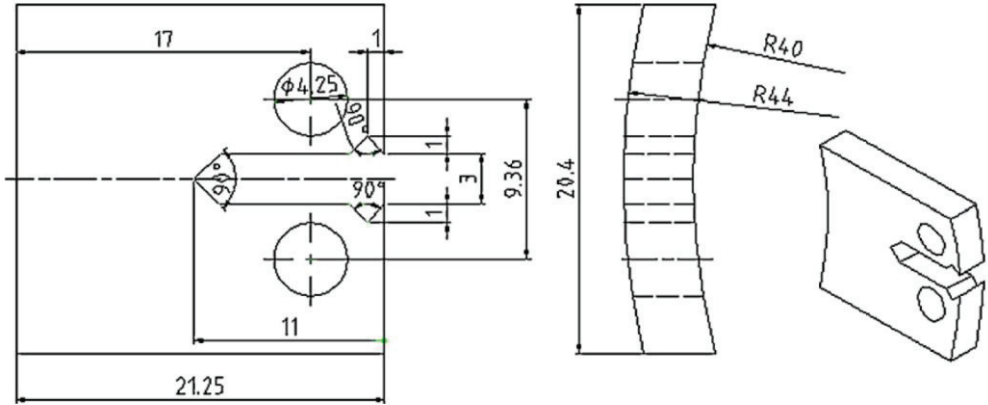
Vandeniliu įsotinto cirkonio lydinio skaitiniam kritinio įtempių intensyvumo koeficientui nustatyti pasirinktas Zr-2,5Nb lydinys. Skaitiniai tyrimai atlikti esant 0, 52, 100 ir 140 ppm vandenilio koncentracijai. Cirkonio lydinio su skirtingomis vandenilio koncentracijomis mechaninės savybės pristatytos 3.2 skyriuje.

Tam, kad būtų galima su eksperimento rezultatais palyginti ne tik skaitiškai nustatyta K_{IC} , bet ir parinktas sąlygines tempimo jėgas P_Q , sukurtas C(T) bandinio BE modelis, kurio matmenys sutampa su eksperimente naudoto bandinio matmenimis (4.1 pav.) [50]. Programa ABAQUS sukurto BE modelio tinklelis su kraštinėmis sąlygomis pavaizduotas 4.2 pav. Eksperimentiniams tyrimams C(T) bandinys pagamintas iš Ignalinos AE KK vamzdžio, kurio vidinis skersmuo – 79,5 mm, o sienelės storis ~4 mm (1.2 skyriuje). Siekiant išlaikyti standartinio C(T) bandinio matmenų proporcijas tyrimams naudoti santykinai maži bandiniai, kurių $W = 17$ mm, $B = 4,2$ mm, $a = 6,75$ mm, o $a_1 = 1,8$ mm. Eksperimentinių bandinių šoniniai paviršiai atkartoją KK vamzdžio cilindrinę formą, t. y. bandiniai buvo lenktos formos, todėl siekiant užtikrinti plokščią apkrovimo būvį naudoti specialios kūgio formos kaiščiai [50]. Atsižvelgiant į tai, skaitiniam K_{IC} įvertinimui sukurtas plokščias C(T) bandinio BE modelis. BE modelis sudalintas naudojant C3D20R tipo baigtinius elementus. Tinklelio kūrimui prie plyšio viršūnės naudoti trimačiai singuliarūs elementai. Apskritiminė BE tinklelio dalis apie plyšio viršūnę sudalinta naudojant 10° kampą ir 7 elementus radialine kryptimi. Likusi modelio dalis sudalinta 0,4 mm dydžio elementais. Visą trimatį BE modelio tinklelį sudaro 13585 elementai. Didelėms deformacijoms ir poslinkiams įvertinti aktyvuota netiesinio geometrinio poveikio parinktis *Nlgeom*.

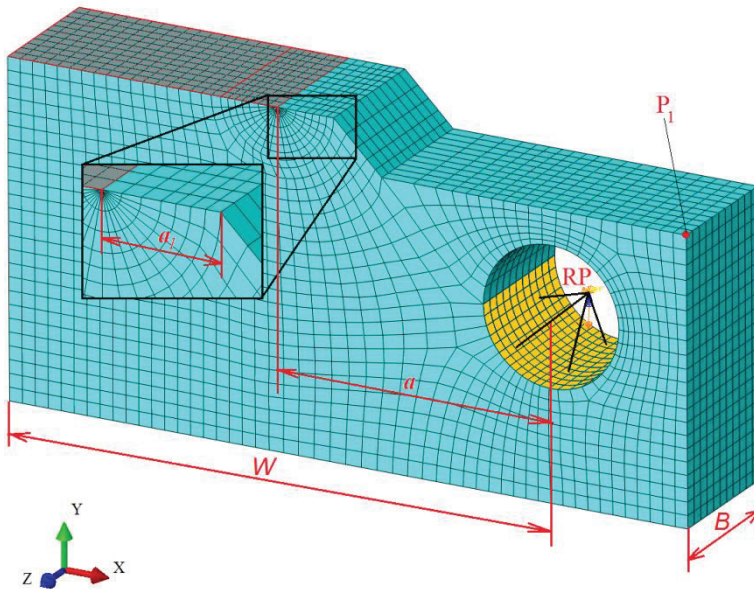
Kaip ir 2.7.3 skyriuje aprašytoje metodikoje, kraštinės sąlygos pridėtos prie RP taško ir simetrijos plokštumos. RP taškas su modeliu sujungtas naudojant standžius ryšio elementus. Kaip apkrovimas naudoti RP taško poslinkiai. Plyšio atsivėrimo poslinkiams nustatyti matuoti P_1 taško poslinkis v . C(T) bandinio tempimo jėgos nustatymui RP taške matuota reakcijos jėga nukreipta neigiama Y koordinatės kryptimi. K_{IC} nustatyti apskaičiuota vidutinė K_I reikšmė per bandinio storį.

Atlikus netiesinio uždavinio skaičiavimus, įvertinant tampriai plastines medžiagos savybes sudarytos $F-v$ priklausomybės, o jas naudojant nustatytos sąlyginės tempimo jėgos P_Q TMO-2 KK Zr-2,5Nb lydinio C(T) bandiniams be

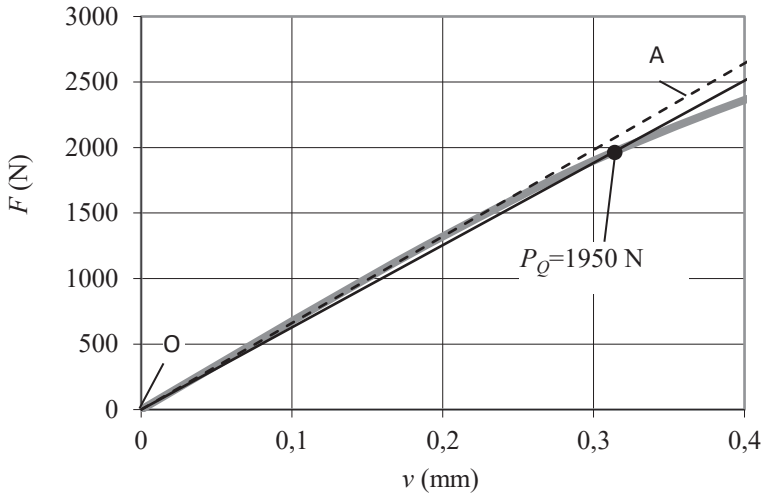
vandenilio ir esant 52, 100 bei 140 ppm vandenilio koncentracijoms. Taip gauta tempimo jėgos F priklausomybė nuo plyšio atsivėrimo v ir P_Q jėgos nustatymas (Zr-2,5Nb lydinio, neįsotinto vandeniliu atveju) pavaizduotas 4.3 pav.



4.1 pav. C(T) bandinio, naudoto TMO-2 lydinio Zr-2,5Nb K_{IC} nustatymui, brėžinys [50]



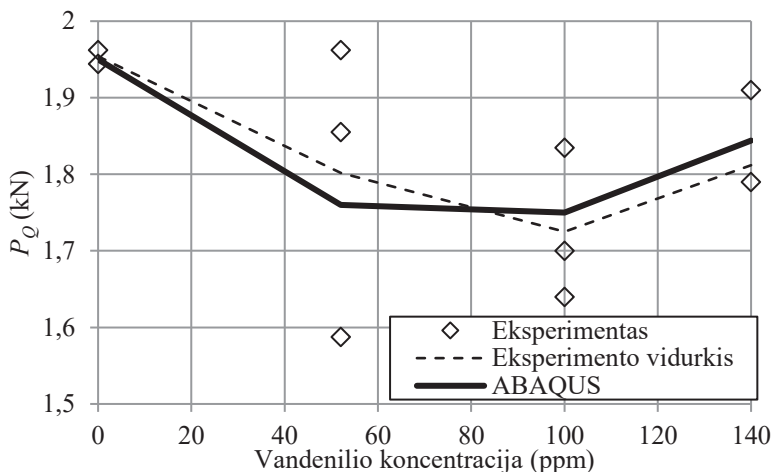
4.2 pav. C(T) bandinio, skirto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio K_{IC} tyrimui, skaitinio modelio BE tinkelis su kraštinėmis sąlygomis



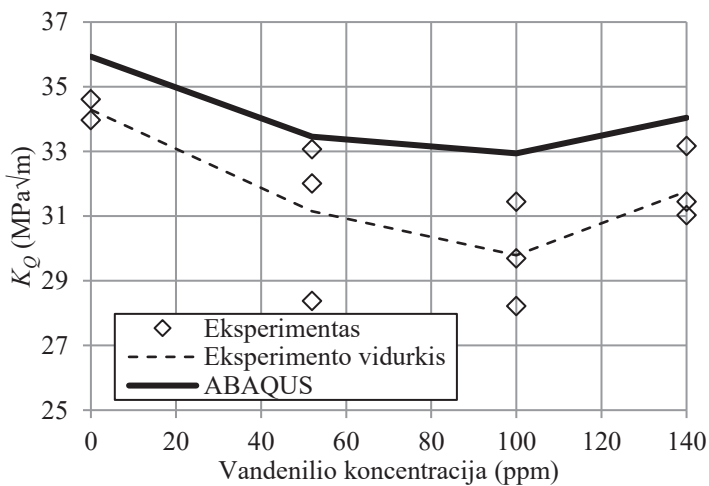
4.3 pav. Tempimo jėgos F priklausomybė nuo plyšio atsivėrimo v ir jėgos P_Q nustatymas Zr-2,5Nb lydiniui be vandenilio

Skaitiškai nustatytos jėgos P_Q , esant skirtingai vandenilio koncentracijai, pateiktos 4.4 pav. Paveiksle taip pat pateiktos eksperimentiškai nustatytos P_Q jėgos (rombo formos taškai) ir jų vidutinės reikšmės (punktyrinė linija). Skaitiškai nustatytos reikšmės gerai sutampa su eksperimento duomenimis, nuokrypis neviršija 3 %.

Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytų K_Q reikšmių palyginimas pateiktas 4.5 pav. Punktyrine linija pavaizduotos vidutinės eksperimentinių taškų reikšmės. Visos skaitiškai nustatytos K_Q reikšmės didesnės už vidutinės eksperimentiškai nustatytas K_Q reikšmes, tačiau reikšmių skirtumas nėra didelis (neviršija 11 %). Taip pat skaitiškai nustatytų K_Q reikšmių kreivės forma atitinka eksperimento vidutinių reikšmių kreivės formą. Didėjant vandenilio koncentracijai nuo 0 ppm iki 100 ppm, skaitiškai nustatyta K_Q reikšmė sumažėja 2,99 MPa \sqrt{m} , o eksperimentiškai nustatyta – 4,5 MPa \sqrt{m} , tai atitinkamai sudaro 8 % ir 13 %. Koncentracijai viršijus 100 ppm reikšmė šiek tiek padidėja.



4.4 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai [50] nustatytos jėgos P_Q esant skirtingai vandenilio koncentracijai



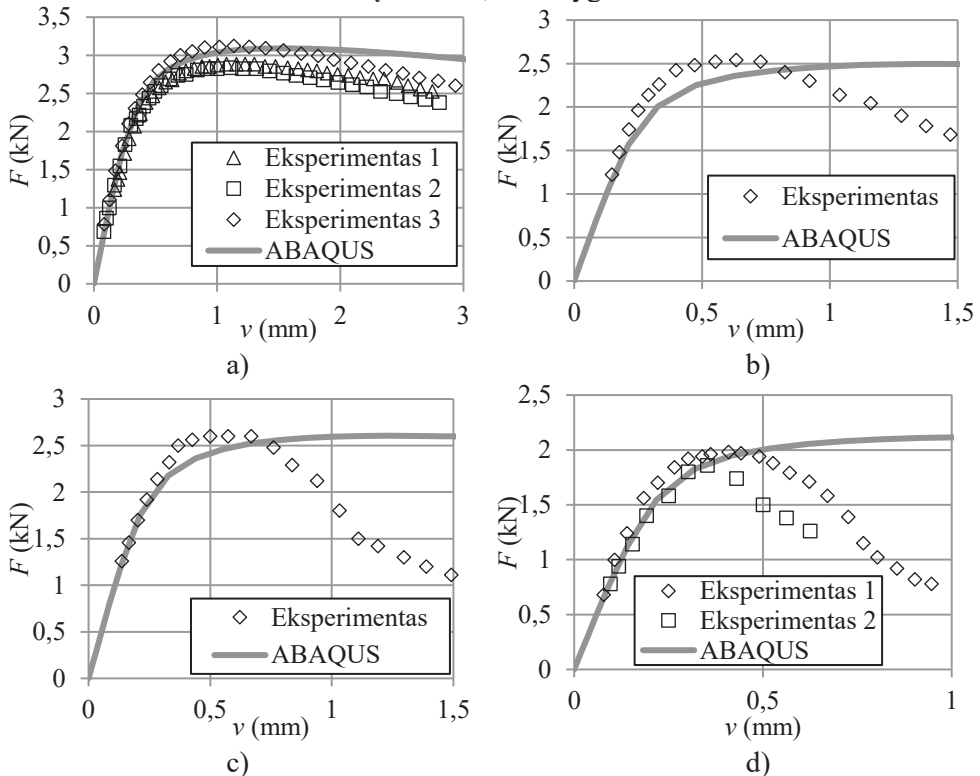
4.5 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai [50] nustatyti K_Q esant skirtingai vandenilio koncentracijai

Patikrinus skaitinio K_{IC} įvertinimo metu gautus rezultatus su standarto ASTM E399-12e3 [93] reikalavimais ne visos sąlygos yra tenkinamos, todėl nustatytos $K_Q \neq K_{IC}$. Tai reiškia, kad norint įvertinti TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio esant vandenilio koncentracijai 0–140 ppm irimo tūsumą, reikia nustatyti kritinę J-integralo reikšmę J_{IC} .

4.2. Vandeniliu įsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio skaitinis kritinio J-integralo J_{IC} įvertinimas

TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio su hidridais skaitinis kritinio J-integralo J_{IC} įvertinimas atliktas pagal metodiką, pristatytą 2.8 skyriuje. Skaitiniai tyrimai atlikti esant 0, 52, 100 ir 140 ppm vandenilio koncentracijai. Cirkonio lydinio su skirtingomis vandenilio koncentracijomis mechaninės savybės pristatytos 3.2 skyriuje. Skaitiškai nustatytos J_{IC} reikšmės palygintos su eksperimentiškai nustatytais reikšmėmis [50].

Skaitiniam J_{IC} nustatymui naudotas toks pats BE modelis, kaip ir K_{IC} nustatymui (4.1 skyr., 4.2 pav.), skiriasi tik nuovarginio plyšio ilgis, kuris lygus $a_1 = 2,2$ mm, o plyšio atsivėrimo poslinkiai matuoti apkrovos pridėjimo taške RP. BE tinkelis sudarytas iš tokio pat tipo C3D20R elementų, parinktas toks pats jų dydis ir sudalinimo būdas. Kadangi J_{IC} nustatymui skirtame BE modelyje yra ilgesnis nuovarginis plyšys a_1 , išlaikant tą pačią tinkelio dalinimo strategiją gaunamas mažesnis viso modelio elementų skaičius, kuris lygus 11363.

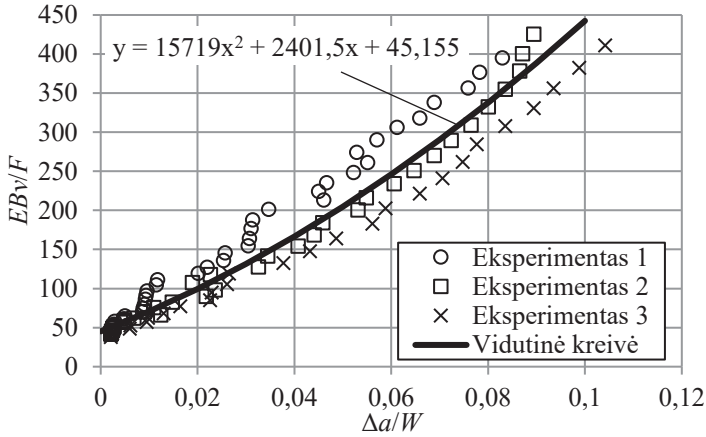


4.6 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai [50] nustatytos F - v priklausomybės esant skirtingoms vandenilio koncentracijoms : a) 0 ppm; b) 52 ppm; c) 100 ppm; d) 140 ppm

Tempimo bandymo skaitinio modeliavimo rezultatai pavaizduoti 4.6 pav. Gauti skaitiniai rezultatai taip pat palyginti su eksperimento duomenimis [50] (trimis kreivėmis 0 ppm vandenilio koncentracijos atvejais, su viena 52 ppm ir 100 ppm atvejais ir su dvejomis 140 ppm atveju). Iš paveikslų matyti, kad esant mažoms v

reikšmėms (iki 0,5–1), gautas geras skaitinių rezultatų sutapimas su eksperimento duomenimis. Nors cirkonio lydinio su hidridais atvejais skaitinio tyrimo rezultatai nutolsta nuo gautųjų eksperimentiškai, kai v reikšmė viršija eksperimentinių kreivių viršūnes, tačiau skaitiškai nustatytos didžiausios tempimo jėgos F reikšmė yra artimos nustatytoms eksperimentiškai, o nuokrypis neviršija 5 %.

Kaip aprašyta 2.8.2 skyriuje, $J_I\text{-}\Delta a$ kreivei sudaryti reikia rasti daugianarę funkciją plyšio pailgėjimo nustatymui. Daugianarės funkcijos radimui naudoti vandeniliu neįsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio eksperimentinių tyrimų rezultatai (4.6 a pav.), o sudarytos EBv/F priklausomybės nuo $\Delta a/W$ pateiktos 4.7 pav.

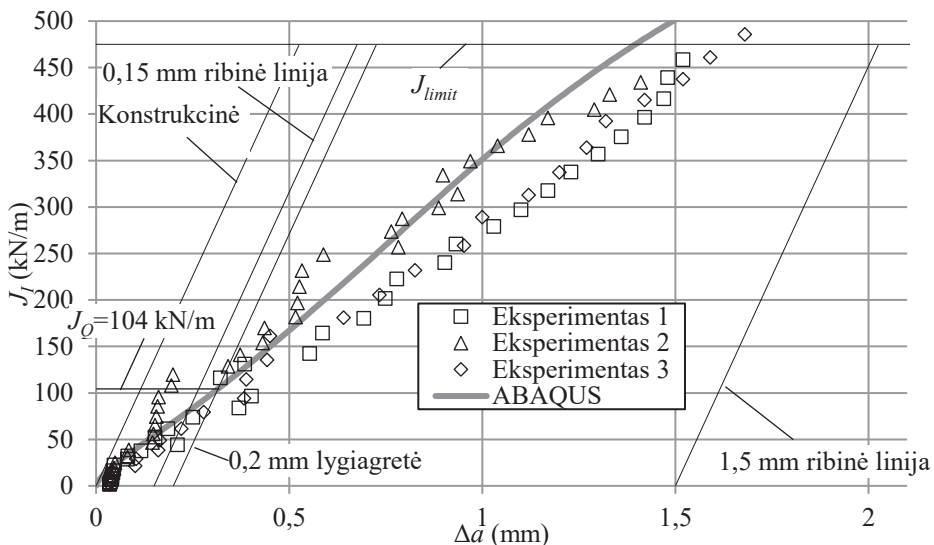


4.7 pav. Zr-2,5Nb lydinio EBv/F priklausomybė nuo $\Delta a/W$

Antro laipsnio daugianarė funkcija nustatyta iš vidutinės kreivės:

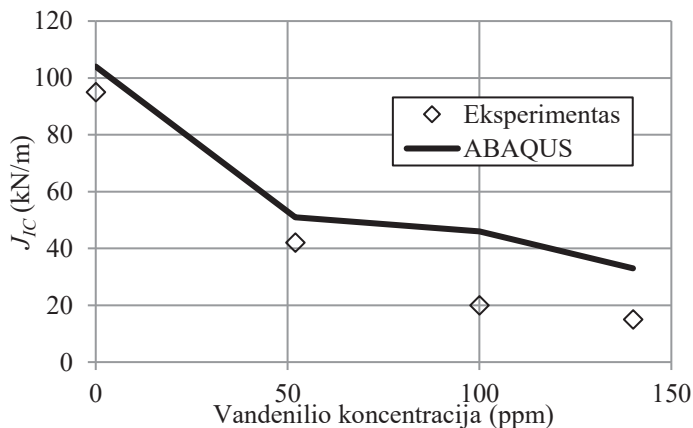
$$\frac{EBv}{F} = 15719 \left(\frac{\Delta a}{W} \right)^2 + 2401,5 \left(\frac{\Delta a}{W} \right) + 45,155. \quad (30)$$

Naudojant (30) lygtį ir trimačio BE modelio skaičiavimo rezultatus, sudarytos $J_I\text{-}\Delta a$ kreivės J_Q radimui. Skaitiškai sudarytos $J_I\text{-}\Delta a$ kreivės pavyzdys vandeniliu neįsotinto TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio atveju pateiktas 4.8 pav. Paveiksle taip pat pateiktos eksperimentiškai nustatytos kreivės [50]. Skaitiškai sudaryta kreivė yra tarp eksperimentinių kreivių iki plyšio pailgėjimo $\Delta a = 1,2$ mm, tai rodo gerą sutapimą su eksperimentiniais duomenimis. $J_I\text{-}\Delta a$ kreivės ir 0,2 mm lygiagretės sankirtoje rasta $J_Q = 104$ kN/m.



4.8 pav. Skaitiškai nustatytos vandeniliu neįsotinto Zr-2,5Nb lydinio J_I - Δa kreivės palyginimas su eksperimento duomenimis [50]

Patikrinus skaitinio J_{IC} įvertinimo metu gautus rezultatus TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio be hidridų ir esant hidridams pagal standarto reikalavimus ASTM E1820-15 [54], visos sąlygos yra tenkinamos, todėl esant visoms vandenilio koncentracijoms nustatytos $J_Q = J_{IC}$. J_{IC} priklausomybė nuo vandenilio koncentracijos pavaizduota 4.9 pav. Skaitiškai nustatytos J_{IC} reikšmės didėjant vandenilio koncentracijai nuo 0 ppm iki 140 ppm sumažėja 68 % (nuo 104 kN/m iki 33 kN/m), o eksperimentiškai – 84 % (nuo 95 kN/m iki 15 kN/m). Skaitiškai nustatytos reikšmės gerai sutampa su eksperimento rezultatais iki vandenilio koncentracija pasiekia 52 ppm (nuokrypis iki 20 %). Toliau didėjant vandenilio koncentracijai skaitinių rezultatų nuokrypis nuo gautų eksperimentiškai didėja (nuokrypis 120 %, kai vandenilio koncentracija 140 ppm).



4.9 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai [50] nustatyto J_{IC} reikšmės esant skirtingai vandenilio koncentracijai

Naudojant sukurta skaitinio vertinimo metodiką ir nustatyta daugianarę funkciją (30) rekomenduojama TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio irimo tūsumą vertinti iki 52 ppm vandenilio koncentracijos ribos. Ši riba yra pakankama KK vertinti, kadangi RBMK tipo reaktorių KK po 30 metų eksploatacijos absorbuoto vandenilio koncentracija vidutiniškai siekia 52 ppm [103]. Norint irimo tūsumą vertinti, kai vandenilio koncentracija viršija 52 ppm ribą, reikia padidinti skaitinio vertinimo tikslumą. Tai galima padaryti atliekant daugiau cirkonio lydinio eksperimentinių bandymų, kuriais remiantis būtų galima tiksliau nustatyti daugianarę funkciją plyšio pailgėjimui nustatyti.

IŠVADOS

Atlikus hidridų ir terminio poveikio branduolinės energetikos objektų konstrukcinių elementų irimui skaitinius tyrimus ir atlikus hidridų matmenų matavimus cirkonio lydinyje, galima daryti tokias išvadas:

1. Hidridai kuro kanalo vamzdyje, pagamintame iš TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio, linę susidaryti vamzdžio žiedine-ašine kryptimi. Hidridų matavimai parodė, kad didėjant vandenilio koncentracijai hidridų vidutinis storis, ilgis ir tūrinė dalis cirkonio matricoje didėja, o jų pokytį nuo vandenilio koncentracijos galima aprašyti tiesine funkcija.
2. Sukurtas skaitinis metodas leidžia nustatyti cirkonio lydinio su hidridais tamprumo modulį su 9 % paklaida, o takumo ribą su 14 % paklaida, lyginant su eksperimentinių tyrimų duomenimis.
3. Dvimatis baigtinių elementų modelis naudojant standartinius kompaktinius bandinius netinka medžiagos kritinei irimo sąsajos vertei nustatyti, kadangi nustatyta P_Q vertė plokščios deformacijos būvio atveju nuo eksperimento rezultatų skiriasi 15 %, o plokščio įtempių būvio atveju net 47 %, o naudojant trimatį baigtinių elementų modelį P_Q vertė nuo eksperimento rezultatų skiriasi tik 5 %. Naudojant trimatį baigtinių elementų kompaktinio bandinio modelį nustatytos cirkonio lydinio su hidridais kritinės įtempių intensyvumo koeficiento vertės lyginant su eksperimento duomenimis nesiskiria daugiau kaip 10 %.
4. Naudojant nustatytą antro laipsnio daugianarę funkciją galima įvertinti plyšio padidėjimą kompaktiniame bandinyje. Skaitiškai nustatytas plyšio padidėjimas yra iki 10 % didesnis nei gautas eksperimentiškai.
5. Cirkonio lydinio su hidridais skaitiškai nustatytos kritinės J-integralo vertės J_{IC} , lyginant su eksperimento duomenimis, didesnės iki 20 %, kai vandenilio koncentracija lydinyje yra mažesnė nei 52 ppm. Didėjant vandenilio koncentracijai didėja ir skaitinio nustatymo paklaida. Todėl skaitinio vertinimo metodiką ir nustatytą daugianarę funkciją rekomenduojama naudoti TMO-2 Zr-2,5Nb lydinio irimo sąsajai vertinti iki 52 ppm vandenilio koncentracijos ribos.

LITERATŪRA

1. ISHIZUKA, N., NAKAI, K. and TAKAYAMA, K. The pressure tube inspection and integrity evaluation in Fugen. *Proceedings of International conference on global environment and advanced nuclear power plants (GENES4/ANP2003)*. Tokyo Institute of Technology, Tokyo (Japan). 2003, pp. 15–19.
2. GYLYS, J. *Branduolinių energetikos sistemų medžiagos*. Kaunas : Technologija, 2000.
3. ALMENAS, K, KALIATKA, A. and UŠPURAS, E. *IGNALINA RBMK-1500. A SOURCE BOOK. Extended and updated version*. Lithuania, 1998. ISBN 9986-492-35-1.
4. CHEADLE, B A, CELOVSKY, A, GHAFOR, M, BUTT, W and BRUNSWICK, New. Assesment of the Integrity of KANUPP Fuel Channels. *Proceedings of the seventeenth annual Canadian Nuclear Society conference*. 1996.
5. IAEA. IAEA Technical Report No. 443 - Understanding and managing ageing of material in spent fuel storage facilities. Vienna, 2006.
6. IAEA. RBMK FUEL CHANNEL INTEGRITY. A Publication of the Extrabudgetary Programme on the Safety of WWER and RBMK Nuclear Power Plants. Viena, 1999. ISSN 1025-2754.
7. KHAN, M.K, PATHAK, M., SUMAN, S., DEO, A. and SINGH, R. Burst investigation on zircaloy-4 claddings in inert environment. *Annals of Nuclear Energy*. 2014, Vol. 69, pp. 292–300. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.02.017>
8. MALLIPUDI, V., VALANCE, S. and BERTSCH, J. Meso-scale analysis of the creep behavior of hydrogenated Zircaloy-4. *Mechanics of Materials*. 2012, vol. 51, pp. 15–28. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.03.003>
9. MURTY, K. L. Internal pressurization creep of Zr alloys for spent-fuel dry storage feasibility. *Jom: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2000, vol. 52(9), pp. 34–38.
10. MURTY, K. L. Creep studies for zircaloy life prediction in water reactors. *Jom: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2007, vol. 51(10), pp. 32–39.
11. SUMAN, S., KHAN, M.K., PATHAK, M. and SINGH, R. N. Effects of hydrogen on thermal creep behaviour of Zircaloy fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, vol. 498, pp. 20–32. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.10.015>
12. TULKKI, V. and IKONEN, T. Modelling anelastic contribution to nuclear fuel cladding creep and stress relaxation. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, vol. 465, pp. 34–41. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.056>
13. SUMAN, S., KHAN, M.K., PATHAK, M., SINGH, R.N. and CHAKRAVARTTY, J.K. Hydrogen in Zircaloy: Mechanism and its impacts. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, vol. 40(17), pp. 5976–5994. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.049>

14. IAEA. IAEA-TECDOC-1410 - Delayed Hydride Cracking in Zirconium Alloys in Pressure Tube Nuclear Reactors. Vienna, 2004.
15. IVANOVA, S. V. Effect of hydrogen on serviceability of zirconium items in VVER and RBMK-type reactors fuel assemblies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2002, vol. 27(7–8), pp. 819–824.
16. CHEADLE, B.A., COLEMAN, C.E., RODGERS, D.K., DAVIES, P.H., CHOW, C.K. and GRIFFITHS, M. Examination of core components removed from CANDU reactors. *Canadian Nuclear Society international conference on CANDU maintenance*. Toronto, Canada. 22–24 Nov 1987. 1988.
17. PLATONOV, P.A., RYAZANTSEVA, A.V., SAENKO, G.P., KNIZHNIKOV, Y.N. and VIKTOROV, V.F. The study of the cause of cracking in zirconium alloy fuel channel tubes. In : *Poster paper at ASTM Zirconium in the Nuclear Industry - 8th International Symposium*. 1988.
18. In-depth safety assessment of Ignalina NPP. Review of safety analysis report - Management of ageing RSR TG7 Final report. Cedex France, 1997.
19. ALVAREZ HOLSTON, A.M. and STJÄRNSÄTER, J. On the effect of temperature on the threshold stress intensity factor of delayed hydride cracking in light water reactor fuel cladding. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, vol. 49(4), pp. 663–667.
20. VIDEM, K., LUNDE, L., HOLLOWELL, T., VILPPONEN, K. and VITANZA, C. Cracking of cladding tubes caused by power ramping and by laboratory stress corrosion experiments. *Journal of Nuclear Materials*. December 1979, vol. 87(2–3), pp. 259–267. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311579905622>
21. HONG, J.D., KIM, H.C., KIM, J.S., YANG, Y.S. and KOOK, D.H. Delayed hydride cracking assessment of PWR spent fuel during dry storage. *Nuclear Engineering and Design*. 2017, vol. 322, pp. 324–330. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.015>
22. KIM, Y.S. Delayed hydride cracking of spent fuel rods in dry storage. *Journal of Nuclear Materials*. 2008, vol. 378(1), pp. 30–34.
23. GRIGORIEV, V. and JOSEFSSON, B. On the mechanism of Zircaloy cladding axial splits. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, vol. 257(2), pp. 99–107.
24. GIROUX, M, GRYGIEL, J.M, MASSON, M and STORRER, F. IAEA-TECDOC-1587. Spent Fuel Reprocessing Options. Vienna, 2008.
25. VIRA, J. Geological repository for high-level nuclear waste becoming reality in Finland. In : *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*. Elsevier, 2017, pp. 645–666. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081006429000232>
26. HEDIN, A., ANDERSSON, E., ANDERSSON, J., GREIS, C., EVINS, L.Z., KAUTSKY, U., LILJA, C., LINDBORG, T., LINDGREN, M., LÖFGREN, M., MUNIER, R., NÄSLUND, J.O., PUIGDOMENECH, I., SELLIN, P., SELROOS, J.O., SKAGIUS, K., SPAHIU, K. and VAHLUND, F. The SR-Site safety assessment for licensing a spent nuclear fuel repository in Sweden. In : *The 13th International High-level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWMC 2011)*. 2011, pp. 193–208.

27. IAEA. IAEA TECDOC-1343. Spent fuel performance assessment and research. Vienna, 2003.
28. PAČES, T., DOBROVOLNÝ, P., HOLEČEK, J., NÝVLT, D. and RUKAVIČKOVÁ, L. Future Water-rock Interaction in Deep Repository of Spent Nuclear Fuel. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017, vol. 17, pp. 100–103. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.013>
29. POŠKAS, P. and ŠMAIŽYS, A. Panaudoto branduolinio kuro saugojimas ir jo laidojimo perspektyvos. *Energetika*. 2006, vol. 3, p. 33–42.
30. US NRC. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility: Final report. NUREG-1536 Revision 1. 2010.
31. CHAO, C. K., YANG, K. C. and TSENG, C. C. Rupture of spent fuel Zircaloy cladding in dry storage due to delayed hydride cracking. *Nuclear Engineering and Design*. 2008, 238(1), pp. 124–129.
32. LAN, K.C., TUNG, H.M., MIAO, Y. and STUBBINS, J. F. Biaxial creep performance of CWSR Zircaloy-4 cladding at emulated off-normal conditions of interim dry storage facility. *Materials Science and Engineering A*. 2018, vol. 736, pp. 400–403. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.102>
33. NAGASAKI, S., WANG, X. and BUIJS, A. Comparison of proliferation resistance among natural uranium, thorium–uranium, and thorium–plutonium fuels used in CANada Deuterium Uranium in deep geological repository by combining multiattribute utility analysis with transport model. *Nuclear Engineering and Technology*. 2018, vol. 50(5), pp. 794–800. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.02.001>
34. PARK, J., LEE, H., TAK, T., SHIN, H.C. and LEE, D. Physics Study of Canada Deuterium Uranium Lattice with Coolant Void Reactivity Analysis. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, vol. 49(1), pp. 6–16. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.07.003>
35. RODRIGUEZ, P. Nuclear Reactor Materials: Irradiation Effects. In : *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier. 2001, pp. 6349–6361. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080431526011244>
36. CORZO, S.F. and RAMAJO, D.E. Numerical simulation of high-temperature creep deformation in Zr-2.5%Nb pressure tubes of CANDU reactors. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020, vol. 179, 104029. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.104029>
37. BOCZAR, P.G. CANDU nuclear reactor designs, operation and fuel cycle. In : *Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering*. Elsevier. 2012, pp. 278–299. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857090737500118>
38. GRANDE, L., PEIMAN, W., MIKHAEL, S., VILLAMERE, B., RODRIGUEZ-PRADO, A., ALLISON, L. and PIORO, I. Thermal Aspects of Using Uranium Nitride in SuperCritical Water-Cooled Nuclear Reactors. *Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18)*. 2011, pp. 705–712.

39. DONG, Q., YAO, Z., WANG, Q., YU, H., KIRK, M. and DAYMOND, M. Precipitate Stability in a Zr–2.5Nb–0.5Cu Alloy under Heavy Ion Irradiation. *Metals*. 2017, vol. 7(8), pp. 287. Prieiga per: <http://www.mdpi.com/2075-4701/7/8/287>
40. GRYBĖNAS, A. Cirkonio lydinių irimo bei kartštyje patvarių anglinių plienų struktūros fazinių pokyčių temperatūros poveikyje dėsningumų eksperimentinis modeliavimas ir tyrimas. Kaunas, 2010.
41. WON, J.J., KIM, M.S. and KIM, K.T. Heat-up and cool-down temperature-dependent hydride reorientation behaviors in zirconium alloy cladding tubes. *Nuclear Engineering and Technology*. 2014, vol. 46(5), pp. 681–688. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.5516/NET.07.2014.052>
42. SHI, S.-Q and PULS, M.P. Fracture strength of hydride precipitates in Zr–2.5Nb alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 1999, vol. 275(3), pp. 312–317. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311599001324>
43. CHAKRABORTY, P., MOITRA, A. and SAHA-DASGUPTA, T. Effect of hydrogen on degradation mechanism of zirconium: A molecular dynamics study. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, vol. 466, pp. 172–178. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.031>
44. SILVA, C., LEONARD, K., TRAMMEL, M. and BRYAN, C. Characterization of different forms of Zr-2.5Nb samples before and after neutron irradiation. *Materials Science and Engineering A*. 2018, vol. 716, pp. 296–307. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.059>
45. BIND, A. K., SUNIL, S. and SINGH, R. N. Effect of hydrogen isotope content on tensile flow behavior of Zr-2.5Nb pressure tube material between 25 and 300 °C. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, vol. 476, pp. 5–12. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.04.019>
46. YENISCAVICH, W, WOLFE, R.A. and LIEBERMAN, R.M. Hydrogen absorption by nickel enriched zircaloy-2. *Journal of Nuclear Materials*. 1959, vol. 1(3), pp. 271–280. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311559900236>
47. LIN, S.C., HAMASAKI, M. and CHUANG, Y.D. The Effect of Dispersion and Spheroidization Treatment of δ Zirconium Hydrides on the Mechanical Properties of Zircaloy. *Nuclear Science and Engineering*. 1979, vol. 71(3), pp. 251–266. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.13182/NSE79-A19062>
48. KIM, J.H., LEE, M.H., CHOI, B.K. and JEONG, Y.H. Effect of the hydrogen contents on the circumferential mechanical properties of zirconium alloy claddings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007, vol. 431(1–2), pp. 155–161. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838806006062>
49. JANG, K.N. and KIM, K.T. The effect of neutron irradiation on hydride reorientation and mechanical property degradation of zirconium alloy cladding. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, vol. 49(7), pp. 1472–1482. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.05.006>
50. DAUNYS, M., DUNDULIS, R., GRYBENAS, A. and KRASAUSKAS, P. Hydrogen influence on mechanical and fracture mechanics characteristics of

- zirconium Zr-2.5Nb alloy at ambient and elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design*. 2008, vol. 238(10), pp. 2536–2545. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029549308002781>
51. KREYNS, P.H., BOURGEOIS, W.F., WHITE, C.J., CHARPENTIER, P.L., KAMMENZIND, B.F. and FRANKLIN, D.G. Embrittlement of Reactor Core Materials. In : *Zirconium in the Nuclear Industry: Eleventh International Symposium*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International. 1996, pp. 758-758–25. Prieiga per: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?STP16200S>
 52. SIMPSON, L.A. and CANN, C.D. Fracture toughness of zirconium hydride and its influence on the crack resistance of zirconium alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 1979, vol. 87(2–3), pp. 303–316. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022311579905671>
 53. HSU, H.H. An evaluation of hydrided Zircaloy-4 cladding fracture behavior by X-specimen test. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006, vol. 426(1–2), pp. 256–262. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838806002301>
 54. ASTM E1820-15A. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. 2015.
 55. BIND, A K, SINGH, R N, SUNIL, S. and CHATTOPADHYAY, J. Effect of deuterium content on fracture toughness of Zr-2.5Nb pressure tube material in the temperature range of ambient to 300 C. *Journal of Nuclear Materials*. 2017, vol. 496, pp. 182–192. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.08.040>
 56. LEMAIGNAN, C. *Zirconium Alloys : Properties and Characteristics*. Elsevier Inc., 2012. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00015-X>
 57. IAEA. IAEA-TECDOC-996. Waterside corrosion of zirconium alloy in nuclear power plants. Vienna, 1998.
 58. BERTOLINO, G., MEYER, G. and PEREZ IPIA, J. Degradation of the mechanical properties of Zircaloy-4 due to hydrogen embrittlement. *Journal of Alloys and Compounds*. 2002, vol. 330–332, pp. 408–413.
 59. LOBO, R.M., ANDRADE, A.H.P. and CASTAGNET, M. Hydride Embrittlement in Zircaloy Components. *2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011*. 2011, pp. 1–6. ISBN 9788599141045. Prieiga per: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/063/43063110.pdf
 60. SUNIL, S., BIND, A.K., KHANDELWAL, H.K., SINGH, R.N. and CHAKRAVARTTY, J.K. Delayed hydride cracking behavior of Zr-2.5Nb alloy pressure tubes for PHWR700. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, vol. 466, pp. 208–219. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.08.002>
 61. KIM, Y.S. and GRYBENAS, A. Effect of load ratio and hydrogen concentration on the crack growth rate in Zr-2.5Nb tubes. *Materials Science and Engineering A*. 2009, vol. 520(1–2), p.p. 147-152.
 62. DUNDULIS, G., GRYBENAS, A., KLIMASAUSKAS, A.,

- MAKAREVICIUS, V. and LEVINSKAS, R. Ageing assessment of RBMK-1500 fuel channel in case of delayed hydride cracking. *Mechanika*. 2006, vol. 57(1), pp. 5–11.
63. LEVINSKAS, R., GRYBĖNAS, A. and MAKAREVICIUS, V. Influence of Temperature on the Axial Hydride Cracking Rate of the Fuel Channel Pressure Tube. *Materials Science*. 2002, vol. 8(4), pp. 388–391.
 64. KIM, Y.S., KIM, S.S., KWON, S.C., CHEONG, Y.M. and IM, K.S. Anisotropic threshold stress intensity factor, K_{IH} and crack growth rate in delayed hydride cracking of Zr-2.5Nb pressure tubes. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007, vol. 33(3), pp. 919–925.
 65. COLEMAN, C.E. Cracking of Hydride-forming Metals and Alloys. In : *Comprehensive Structural Integrity*. Elsevier. 2003, vol. 6, pp. 103–161. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080437494061048>
 66. SINGH, R.N., STÄHLE, P., CHAKRAVARTTY, J.K. and SHMAKOV, A.A. Threshold stress intensity factor for delayed hydride cracking in Zr-2.5%Nb pressure tube alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2009, vol. 523(1–2), pp. 112–117.
 67. LACROIX, E., MOTTA, A.T. and ALMER, J.D. Experimental determination of zirconium hydride precipitation and dissolution in zirconium alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, vol. 509, pp. 162–167.
 68. SAGAT, S. Temperature limit for delayed hydride cracking in Zr-2.5Nb alloys. In : *17th international conference in structural mechanics in reactor technology (SMiRT 17)*. Prague, Czech Republic, 2003. pp. G06-4.
 69. MANKOSA, M. and AVRAMOVA, M. Three-dimensional multi-physics modeling of hydrogen and hydride distribution in zirconium alloy cladding. *Progress in Nuclear Energy*. 2018, vol. 105, pp. 294–300. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.02.012>
 70. HALES, J.D., WILLIAMSON, R.L., NOVASCONE, S.R., PASTORE, G., SPENCER, B.W., STAFFORD, D.S., GAMBLE, K.A., PEREZ, D.M. and LIU, W. BISON Theory Manual The Equations behind Nuclear Fuel Analysis. Idaho national lab., Idaho Falls, United States, 2016. Prieiga per: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1374503/>
 71. BAIR, J., ASLE, M. and TONKS, M. A review on hydride precipitation in zirconium alloys. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, vol. 466, pp. 12–20. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.014>
 72. SHARMA, R.K., TEWARI, A., SINGH, R.N. and KASHYAP, B.P. Optimum shape and orientation of δ-hydride precipitate in α-zirconium matrix for different temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, vol. 742, pp. 804–813. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.085>
 73. SINGH, R N, KHANDELWAL, H K, BIND, A K, SUNIL, S and STÄHLE, P. Materials Science & Engineering A Influence of stress field of expanding and contracting plate shaped precipitate on hydride embrittlement of Zr-alloys. *Materials Science & Engineering A*. 2013, vol. 579, pp. 157–163. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.04.117>
 74. KUBO, T, KOBAYASHI, Y and UCHIKOSHI, H. Determination of fracture

- strength of δ -zirconium hydrides embedded in zirconium matrix at high temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 435(1–3), pp. 222–230. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.12.045>
75. ARREOLA-HERRERA, R., CRUZ-RAMÍREZ, A., RIVERA-SALINAS, J.E., ROMERO-SERRANO, J.A. and SÁNCHEZ-ALVARADO, R.G. The effect of non-metallic inclusions on the mechanical properties of 32 CDV 13 steel and their mechanical stress analysis by numerical simulation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2018, vol. 94, pp. 134–146. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.01.013>
 76. VARIAS, A.G. and MASSIH, A.R. Temperature and constraint effects on hydride fracture in zirconium alloys. *Engineering Fracture Mechanics*. 2000, vol. 65(1), pp. 29–54. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794499001071>
 77. SUMAN, S., KHAN, M.K., PATHAK, M. and SINGH, R.N. Effects of Hydride on Crack Propagation in Zircaloy-4. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 173, pp. 1185–1190. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.105>
 78. JEON, J.Y., KIM, Y.J., LEE, S.Y. and KIM, J.W. Extracting ductile fracture toughness from small punch test data using numerical modeling. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016, vol. 139–140, pp. 204–219. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.02.011>
 79. HE, G., BAO, C. and CAI, L. Study on uniform parameters characterizing the crack-tip constraint effect of fracture toughness. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019, vol. 222, 106706. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106706>
 80. MAHLER, M. and AKTAA, J. Approach for Determining Fracture Mechanical Properties from Tests on Small Size Specimens at Room Temperature. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 3, pp. 434–439. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.073>
 81. MAHLER, M. and AKTAA, J. Prediction of fracture toughness based on experiments with sub-size specimens in the brittle and ductile regimes. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, vol. 472, pp. 178–185. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.08.046>
 82. WEYGAND, S.M. and AKTAA, J. A numerical study of the size effect in fracture mechanical bending tests with the cohesive zone method. *Journal of Nuclear Materials*. 2009, vol. 386–388, pp. 971–973. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.12.264>
 83. KEARNS, J.J. Terminal solubility and partitioning of hydrogen in the alpha phase of zirconium, Zircaloy-2 and Zircaloy-4. *Journal of Nuclear Materials*. 1967, vol. 22(3), pp. 292–303.
 84. CRANK J. *Mathematics of diffusion*. Oxford, 1979.
 85. SHIH, R.H. *AutoCAD LT 2011 Totorial*. SDC Publications, 2010. ISBN 9781585035564.
 86. OHSER, J. and Mücklich, F. *Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science*. Statistics in practice. John Wiley, 2000, pp. 404. ISBN: 978-0-471-97486-4.

87. ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.11. 2011.
88. ANDERSON, T L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition*. CRC Press, 2017. ISBN 9780849316562.
89. IEEE Standard for System and Software Verification and Validation. 2012. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6204026>
90. *ANSYS Mechanical APDL Fracture Analysis Guide 17.0*. 2016. Southpointe, 2600 ANSYS Drive, Canonsburg, PA 15317 : ANSYS Inc. 17.0.
91. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. *Section XI - Rules for inservice inspection of nuclear power plant components*. 2004.
92. SAAD, D., DUNDULIS, G. and JANULIONIS, R. Numerical simulation of SIF in Es-Salam research reactor vessel. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 96, pp. 394-408. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.014>
93. ASTM E399-12. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. 2013.
94. GRYBĖNAS, A., MAKAREVIČIUS, V., BALTUŠNIKAS, A., LUKOŠIŪTĖ, I. and KRIŪKIENĖ, R. Correlation between structural changes of M23C6 carbide and mechanical behaviour of P91 steel after thermal aging. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 696, pp. 453-460. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509317305804>
95. BS EN 10002-1:2001 / ISO 6892-1. Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. 2009.
96. SULLIVAN, A.M. and CROOKER, T.W. A crack-opening-displacement technique for crack length measurement in fatigue crack growth rate testing—development and evaluation. *Engineering Fracture Mechanics*. 1977, vol. 9(1), pp. 159-166. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0013794477900613>
97. NEWMAN, J.C. A Review and Assessment of the Stress-Intensity Factors for Surface Cracks. In : J. CHANG (ed.), *Part-Through Crack Fatigue Life Prediction*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959 : ASTM International, 1979, pp. 16-46. Prieiga per: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?STP35030S>
98. ERDOGAN, F. and YAHSI, O.S. A cylindrical shell with a stress-free end which contains an axial part-through or through crack. *International Journal of Engineering Science*. 1985, vol. 23(11), pp. 1215-1237. Prieiga per: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020722585900436>
99. NEWMAN JR., J.C. and RAJU, I.S. Analyses of surface cracks in finite plates under tension or bending loads. *NASA Technical Paper 1578*. 1979.
100. MACERI, A. *Theory of Elasticity*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11391-8. Prieiga per: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11392-5>
101. ZHU, X.K. and LEIS, B.N. Bending modified J-Q theory and crack-tip constraint quantification. *International Journal of Fracture*. 2006, vol. 141(1-2), pp. 115-134. Prieiga per: <http://link.springer.com/10.1007/s10704-006-0068-5>

102. KONOPIK, P. and VIEHRIG, H.W. Fracture Toughness Characterisation Of The Martensitic Chromium Steel P91. *COMAT 2012 2nd International Conference on Recent Trends in Structural Materials*. 2012, pp. 1–10.
103. IAEA. IAEA - TECDOC-997 - Water channel reactor fuels and fuel channels: Design, performance, research and development. Vienna, 1996.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose

1. Saad D., Dundulis G., Janulionis R. Numerical simulation of SIF in Es-Salam research reactor vessel. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 96, pp. 394-408. ISSN 1350-6307.

Straipsniai mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse

1. Janulionis R., Dundulis G., Kriūkienė R., Grybėnas A. Numerical prediction of mechanical properties of zirconium alloy with hydrides using finite element method. *Energetika*, 2018, 64 (1), pp. 43-51. ISSN 0235-7208.

Tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Dundulis G., Janulionis R., Makarevičius V., Grybėnas A. Fracture toughness numerical modelling of the martensitic chromium steel. *25th Anniversary international conference on metallurgy and materials (METAL 2016)*, May 25-27, 2016, Brno, Czech Republic, EU. ISBN 978-80-87294-67-3.
2. Janulionis R., Dundulis G., Grybėnas A. Numerical investigation of critical stress intensity factor. *The 13th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2016)*, May 26–27, 2016, Kaunas, Lithuania, pp. 226-233. ISSN 1822-7554.
3. Janulionis R. Numerical investigation of J-integral. *The 14th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2017)*, May 25–26, 2017, Kaunas, Lithuania, pp. 335-341. ISSN 1822-7554.
4. Janulionis R., Dundulis G., Grybėnas A. Numerical investigation of hydrogen influence on stress intensity factor of zirconium alloy. *Proceedings of the 23th international scientific conference: Mechanika 2018*, May 18, 2018, Druskininkai, Lithuania, Technologija, 2018, pp. 58-61. ISSN 1822-2951.
5. Janulionis R. Numerical investigation of hydrogen influence on J-integral of zirconium alloy. *The 16th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2019)*, May 23-24, 2019, Kaunas, Lithuania, pp. 234-242. ISSN 1822-7554.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. Dundulis G., Janulionis R., Makarevičius V., Grybėnas A. Fracture toughness numerical modelling of the martensitic chromium steel. *25th Anniversary international conference on metallurgy and materials (METAL 2016)*, May 25-27, 2016, Brno, Czech Republic, EU. ISBN 978-80-87294-67-3.
2. Janulionis R., Dundulis G., Grybėnas A. Numerical investigation of critical stress intensity factor. *The 13th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2016)*, May 26–27, 2016, Kaunas, Lithuania, pp. 226-233. ISSN 1822-7554.
3. Janulionis R. Numerical investigation of J-integral. *The 14th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2017)*, May 25–26, 2017, Kaunas, Lithuania, pp. 335-341. ISSN 1822-7554.
4. Janulionis R., Dundulis G., Grybėnas A. Numerical investigation of hydrogen influence on stress intensity factor of zirconium alloy. *Proceedings of the 23th international scientific conference: Mechanika 2018*, May 18, 2018, Druskininkai, Lithuania, Technologija, 2018, pp. 58-61. ISSN 1822-2951.
5. Janulionis R., Kriūkienė R. Numerical prediction of mechanical properties of zirconium alloy with hydrides using finite element method. *The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018)*, May 23-25, 2018, Kaunas, Lithuania, pp. 408. ISSN 1822-7554.
6. Janulionis R. Numerical investigation of hydrogen influence on J-integral of zirconium alloy. *The 16th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2019)*, May 23-24, 2019, Kaunas, Lithuania, pp. 234-242. ISSN 1822-7554.

