

Ա. Ի. ԱԼԻԿԻԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Դավթյան Ալբերտ Հարությունի

Con-Flat տեսակի կցաշտրթային միացման տեխնոլոգիայի մշակումը գերբարձր վակուումային
համակարգերում

Ա.04.20 - «Փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ-2026

A. I. ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE LABORATORY
(YEREVAN PHYSICS INSTITUTE)

Albert Davtyan

Development of ConFlat-type flange joint technology in ultra-high vacuum systems

SYNOPSIS

of Dissertation in 01.04.20 - "Beam physics and accelerator technology" presented for the degree of
candidate in technical sciences

YEREVAN - 2026

Ատենախոսության թեման հաստատված է ՔԵՆՀԻ սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտի գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար՝ Տեխն. գիտ. դոկտոր
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու
Տեխն. գիտ. դոկտոր

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. մայիսի 7-ին ժամը 14:00-ին ԱԱԳԼ-ում գործող ԲԿԳԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» սեանսգիտական խորհուրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան Եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:
Սեղանգիրն առաքված է 2026թ. ապրիլի 7-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝ Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր

Հրաչյա Մարուկյան

The subject of the dissertation is approved by the scientific council of the CANDLE Synchrotron Research Institute.

Scientific Supervisor:
Doctor of tech. sciences
Vardan Avagyan (CANDLE SRI, AANL)

Official Opponents:
Candidate of ph-math. sciences
Doctor of tech. sciences
Bagrat Grigoryan (CANDLE SRI, Vahan Avetisyan (RAU))

Leading Organization:
Institute for Physical Research

The defence will take place on the 7th of May, 2026, at 14:00 during the "Physics" professional council's session of HESG 024 acting within AANL (2 Alikhanyan Brothers str., 0036, Yerevan).

The dissertation is available at the AANL library.
The synopsis is sent out on the 7th of April, 2026.

Scientific Secretary of the Special Council:
Doctor of ph-math. sciences
Hrachya Marukyan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Ժամանակակից գիտության և տեխնոլոգիայի զարգացումը ավելի է պահանջում իրականացնել ճշգրիտ հիմնարար հետազոտություններ տարբեր ոլորտներում՝ հատկապես տարրական մասնիկների ֆիզիկայում: Այս ոլորտում հետազոտություններն ու փորձերը հիմնված են տարբեր տեսակի մասնիկների արագացուցիչների և դրանց հետ կապված վախճանային համակարգերի վրա, որտեղ գերբարձր վակուումային (ԳԲՎ) պայմանները (10⁻⁹ ... 10⁻¹¹ մԲար) անհրաժեշտ են գազի փոխադրությունը արագացված մասնիկների հետ նվազագույնի հասցնելու և փորձի վերարտադրելի պայմաններ ապահովելու համար: ConFlat (CF) կցաշարային միացումները դեֆորմացնող եզրով և պինձե խտարար օղակներով արդյունաբերական ստանդարտ են արագացուցիչների ԳԲՎ համակարգերում և փնջատարներում ԳԲՎ ապահովելու համար՝ շնորհիվ չափազանց ցածր ներհատքի ատոիճանի հուսալի մետաղ-մետաղական միացում ստեղծելու ունակության:

CF կցաշարերի միացման մեխանիզմը հիմնված է դրանց դեֆորմացնող եզրերի միջև թթվածնագրկված պրիճե խտարար օղակի պլաստիկ դեֆորմացման վրա, որը ապահովում է ԳԲՎ հերմետիկացում: Գոյություն ունեն Վիլերի և CERN-ի կողմից սճակված կցաշարերի դեֆորմացնող եզրերի երկրաչափություններ, որոնց կիրառումը ամենատարածվածն է: Այնուամենայնիվ, փնջի ենթգիալի մեծացումը, կիրճեն սեխնոլոգիայի օգտագործումը, էլեկտրոնային ճառագայթման սերիալերային տիրույթի անցումը, մեծ պահանջներ են դնում վակուումի կայունության և համակարգի բնօրինակ հերմետիկության վրա: Բացի այդ, CF կցաշարերի միացման հերմետիկացման գոտում առաջանում է զգալի մեխանիկական լարվածային վիճակ: Գոյություն ունեցող թվային և վերլուծական ուսումնասիրությունների մեծ մասում CF միացումներում կցաշարը բնօրինակ որպես բացարձակ պինդ (դեֆորմացվող) մարմին, և լարվածադեֆորմացիոն վիճակի հաշվարկման ժամանակ հաշվի է առնվում միայն խտարար օղակի դեֆորմացիան:

Այս պարզեցումը հիմնված է այն ենթադրության վրա, որ կցաշարերի դեֆորմացիան անշան է, երբ համեմատվում է խտարար օղակի դեֆորմացիայի հետ: Այնուամենայնիվ, վերջին ուսումնասիրությունները ցույց են տալիս, որ լարումների կոնցենտրացիան դեֆորմացնող եզրում կարող է գերազանցել դրա նյութի հոսունության սահմանը, հատկապես բարձր հերմետիկացման աստիճանի, ջերմաստիճանային գրադիենտների և բազմակի օգտագործման դեպքերում: Այս ամենը կարող է հանգեցնել դեֆորմացնող եզրի զգալի պլաստիկ դեֆորմացիայի, որը փոխում է հերմետիկացման գոտու երկրաչափությունը և լարումների բաշխումը կցաշարերի հանգույցում մի քանի հավաքման-քանդման ցիկլերի ընթացքում:

ՓԻՋՈՒՆԻՍ ԻՆՎԵՍՏԻՄԵՆՏ ԳՐԻԳՐԻԱ
ԵՌՈՒԿՈՒՄՔ ՓԲԻՅՈՒԿԵՑՈՐ ԿԵՆՏՐՈՆ
23.04.2026թ.

Հնայած ԳԲԿ համակարգերում և առաջադեմ տեխնոլոգիաներում CF կցաշարքերի գործնական կիրառելիությունը, բացակայում են համապարփակ երմումելանիկական ուսումնասիրություններ, որոնք հաշվի կառնեն ինչպես ստարար օդակի կյուբի, այնպես էլ կցաշարքերի առավելագույն աստիճանայինությունները: Աման ուսումնասիրությունների բացակայությունը հանգեցնում է F կցաշարքերի իրական լարվածադեֆորմացիոն վիճակի կանխատեսման անճշտությունների, նվազեցնում է գործողություն ունեցող մոդելների կանխատեսվող ուսուսկությունը, դրանք բազմակի օգտագործման հնարավորությունը և կապածի էությունը է տալիս դրանց օպտիմալ կիրառման և ծառայության ժամկետների սահմանման համար: Այսպիսով ստանդարտ CF մոդելների առավելություններն ու երությունները դեռևս վերլուծված չեն, և դրանց օպտիմալ օգտագործման համար էլեկտրոնիկական հանձնարարականները, ներառյալ սահմանափակումները, սահմանված չեն:

Աշխատանքի նպատակը և խնդիրները

Աշխատանքի նպատակն է ԳԲԿ CF կցաշարքերի սիստեմների երմումելանիկական և առավելագույն աստիճանային հատկությունների ուսումնասիրությունը էնյակային ջերմաստիճանի և բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտի պայմաններում հաշվի առնելով ինչպես խտարար օդակի, այնպես էլ կցաշարքերի կյուբերի պլաստիկ դեֆորմացիաները, ինչպես նաև մշակել վերջինիս ճշգրիտ նախատման բանաձևեր, տեխնիկական հանձնարարականներ և կցաշարքերի աստարելագործված երկրաչափություն(ներ) բարձր կայունության և հնարավորինս վաղեցված մնացորդային դեֆորմացիաներով, հետևաբար նաև բազմակի գտագործման ավելի լավ հատկություններով համեմատած ստանդարտ մոդելների ետ:

- Ստեղծել ստաբիլ խնդիրներ են:
- CF կցաշարքերի սիստեմների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի ճշգրիտ թվային մոդելավորման իրականացումը հաշվի առնելով կյուբերի առավելագույն աստիճանային հատկությունները,
- փորձերի անցկացումը մոդելավորման արդյունքների հետ համեմատելու և կցաշարքերի, ինչպես նաև խտարար օդակների պլաստիկ դեֆորմացիաները բանակականցելու համար,
- իրական պայմաններում ամբողջական հերմետիկացման (100% ձգման) աննարինությունը և հեղուկ-ամուսնային միացության հաշվարկները,
- դեֆորմացիոն եզրերի բարձրությունների որոշման էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաների մշակումը:

- մշակել տեխնիկական հանձնարարականներ ստանդարտ CF մոդելների օպտիմալ օգտագործման և բազմակի հավաքման-քանդման ցիկլերի համար, նախագծել և փորձարկել կցաշարքերի նոր բարելավված երկրաչափություն(ներ)՝ ապահովելով ավելի բարձր կայունություն և ցածր մնացորդային դեֆորմացիաներ:

Ֆիզիկական նորույթը

Առաջին անգամ իրականացվել են CF կցաշարքերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի ջերմումելանիկական և առավելագույն աստիճանային հետազոտություններ՝ գնահատելով կցաշարքերի պլաստիկ դեֆորմացիաները, բազմակի օգտագործման հնարավորությունը և փորձակամորեն ցույց տրված ամբողջական հերմետիկացման հասնելու աննարինությունը (100% ձգում): Առաջին անգամ մշակվել են էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաներ, որոնք թույլ են տալիս ձևուն գնահատել կցաշարքերի դեֆորմացիոն եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիան առանց բարդ ու ժամանակատար մոդելավորումների և փորձերի: Հասնակված թվային մոդելավորման և փորձարարական հետազոտությունների հիման վրա առաջին անգամ ձևակերպվել են ստանդարտ CF կցաշարքերի օպտիմալ շահագործման տեխնիկական հանձնարարականները: Այսպիսով, հետազոտությունների արդյունքում, մշակվել են կցաշարքերի երկու նոր, բարելավված CANDE-մոդելներ, որոնք ապահովում են ավելի բարձր կայունություն և հուսալիություն՝ համեմատած առկա ստանդարտ մոդելների հետ:

Վերաբերյալ նշանակությունը

- Ստացված արդյունքները և մշակված տեխնիկական հանձնարարականները կարող են օգտագործվել տարբեր ցածր և բարձր էներգիաների արագացուցիչների ԳԲԿ համակարգերում, ինչպես սենյակային, այնպես էլ բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտների պայմաններում աշխատող:
- Աշխատանքում ներկայացված առաջարկությունները և նոր մշակված մոդելները կարող են օգտագործվել ՔԵՆԴԼ սինթրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտում գործող ԱՐԵՍԼ գծային էլեկտրոնային արագացուցիչի հետագա արդիականացման համար:
- Դեֆորմացիոն եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիաները հաշվարկելու համար մշակված էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաները թույլ են տալիս գնահատել արագացուցիչներում և ԳԲԿ այլ համակարգերում կցաշարքերի երկարակեցությունը, ինչպես նաև առկա համակարգերում կցաշարքերի ընթացիկ վիճակը:
- Նոր մշակված կցաշարքերի CANDE-մոդելները կարող են օգտագործվել ավելի հուսալի և կառուցվածքայինորեն կայուն ԳԲԿ համակարգերի

նախագծման մեջ, որոնք նախատեսված են բազմակի հավաքման-քանդման ցիկլերի համար:

- Կոնստրուկցիայի համապատասխան ձևափոխման դեպքում ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել տիեզերական տեխնիկայում ևս, որտեղ առկա են նաև ջերմաստիճանային գրադիենտներ: Այնտեղ, ի տարբերություն ստանդարտ ԳԲՎ համակարգերի, վակուումային միջավայրը գտնվում է համակարգից դուրս, մինչդեռ մեխոլորտային ձնշումը պահպանվում է ներսում:

Ատենախառության հիմնական դրույթները

- Ստանդարտ կցաշարերի լարվածադեֆորմացիան վիճակի տեսանկյունից CERN-ի մոդելը ավելի գերադասելի է, քան Վիլերի մոդելը, որը ենթակա է ոչ միայն սրբորման, այլ նաև պլաստիկ ծաման: Երկու ստանդարտ մոդելների օպտիմալ կիրառման համար կարելի է օգտվել մշակված տեխնիկական հանձնարարականներից:

- Ստացված ենայրիկի մոտարկված ֆունկցիաները կիրառելի է կցաշարերի (CERN-ի մոդելի) դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիայի ճկուն գնահատման համար, որը հաշվի է առնում կուրի ամրացման գործընթացը (կուրի պլաստիկ հատկությունները), առանց դրանց պլաստիկ քայքայման: Հիմնական սահմանափակումն է կցաշարի չափերի փոփոխությունը և այլ կուրի կիրառումը:

- Թրժաթողված խտարար օղակները խորհուրդ չի տրվում կիրառել բարձր ջերմային գրադիենտների միջավայրում, եթե ակնկալվում է, որ կցաշարերը ենթարկվելու են ավելի քան 4 հերմետիկացման-ապահերմետիկացման ցիկլերի: Ցիկլերի քանակը կարելի է հասցնել մինչև 8-ի, սակայն միայն գազի ներհուսքի խիստ վերահսկման դեպքում:

- Կցաշարերի մշակված CANDLE-մոդելները սպահովում են երկրաչափության ավելի բարձր կայունություն, հուսալիություն և նպատակահարմար են բազմակի օգտագործման տեսանկյունից համեմատած ստանդարտ մոդելների:

Հրապարակումներ և գիտաժողովներ

Ատենախառության շրջանակներում կատարված աշխատանքները ղարգրվել են թվով հինգ գիտական հոդվածների տեսքով, որոնցից երեքը «Scimago Journal & Country Ranking (SJR)» պարբերականից են, երկուսը ընդգրկված ամսագրերի ասակարգման երկրորդ (Q2), իսկ մեկը՝ երրորդ (Q3) քառորդներում (ներառված են և Scopus, և Web of Science միջազգային գիտատեղեկատվական շտեմարանների անկում): Հրապարակումներից երկուսը պատկանում են ՀՀ ԲՈՒԿ-ի ցանկին

պատկանող հանդեսներին: Հորվածների ցանկը ավելի մանրամասն ներկայացված է վերջում:

Աշխատանքի արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ տեղական և միջազգային գիտաժողովներում:

1) A. Davtyan // “The analysis of ultrahigh vacuum CF flange joints applied in accelerator and space technology”, in the 3rd International Workshop on “Ultrafast Beams and Applications” (UBA 22), Yerevan, Armenia.

2) Ա.Հ. Դավթյան, Հ.Ա. Իսունց, Վ.Ս. Դեխտյարով // «Արագացուցչային և տիեզերական տեխնոլոգիայում կիրառվող գերբարձր վակուումային CF կցաշարերի միացումների համակարգչային մոդելավորումը և փորձարարական վերլուծությունը», ՀԱՊՀ տարեկան գիտաժողով 2022, Երևան:

3) Ա.Հ. Դավթյան // «Վակուումային համակարգերի հերմետիկացման խնդիրները արագացուցչային տեխնիկայում», ՀԱՊՀ 90-ամյա հորելյանին նվիրված տարեկան գիտաժողով 2023, Երևան:

4) A. Davtyan // “Simulation and experimental analysis of the ConFlat-type flange joints under high-temperature gradients”, in the 4th International Workshop on “Ultrafast Beams and Applications” (UBA 24), Yerevan, Armenia.

5) Ա.Հ. Դավթյան, Հ.Ա. Իսունց, Վ.Շ. Ավագյան // «Արագացուցչային CF կցաշարերի համակարգչային և փորձարարական վերլուծությունը տարբեր ջերմաստիճաններում», ՀԱՊՀ տարեկան գիտաժողով 2024, Երևան:

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՄՍ նախարարության Բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի աջակցությամբ (գիտական նախագծեր № 23AA-2D019 և № 21T-2D084): Թեմայի շրջանակներում իրականացված հետազոտության արդյունքները ներկայացվել են քննարկվել են Համբուրգի Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY գիտական կենտրոնի վակուումային և ճարտարագիտական խմբերի ղեկավարների հետ՝ 15-օրյա գործարանի ընթացքում: Արդյունքները ներկայացվել են «Հայ-գերմանական ուսանողական դասընթացներ 2024 և 2025»-ի ուսանողներին, «Վակուումային տեխնոլոգիաներն արագացուցիչներում» դասընթացների շրջանակներում:

Ատենախառության կառուցվածքը և ծավալը

Ատենախառությունը բաղկացած է ներածությունից, 5 գույններից և 87 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 117 էջ, պարունակում է 54 նկար և 11 աղյուսակ: Ատենախառության գույններն են.

Գույն 1. Գրականության ակնարկ

Գույն 2. Մարքավորումներ

Գլուխ 3. Արագագուցային և տիեզերական տեխնիկայում կիրառվող էրբարձր վակուումային ConFlat-տեսակի կցաշարքային միացումների կիրառություն և փորձարարական հետազոտություն

Գլուխ 4. Մոդելավորման և փորձարարական մոտեցումներով մասնիկների արագագուցայինների CF կցաշարքային միացումների ջերմամեխանիկական վիճակի նախատեսում

Գլուխ 5. Մշակված նոր կցաշարքերի CANDLE-մոդելները

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԱՄԱՌՈՏ ԲՈՎԱՆ ԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Ներածության մեջ հիմնավորված է ԳԲՎ համակարգերում օգտագործվող վիլերի և GERN-ի կցաշարքերի մոդելների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի և վլաստիկ դեֆորմացիայի ուսումնասիրության արդիականությունը, վերլուծված են առկա ուսումնասիրությունների սահմանափակումները և ձևակերպված է ցաշարքերի նյութի պլաստիկ հատկությունների մասնակցությամբ, դրանց մոդելավորման անհրաժեշտությունը: Նման մոդելավորումները անհրաժեշտ են ԳԲՎ ցաշարքերի բազմակի օգտագործման հնարավորության ճշգրիտ գնահատման ամար: Այսուհետև ներկայացված են ատենախառնության թեմայի արդիականությունը, նրա նպատակն ու խնդիրները, արդյունքների նորությունը և արդյունքների կիրառական նշանակությունը, որոնցից հետո ներկայացված է բաժր 5 վրլուխների համընթաց բնութագրությունները:

Առաջին գլուխ: Ներկայացված է արագագուցայինում օգտագործվող ԳԲՎ ցաշարքերի համապարփակ վերլուծական ակնարկ: Ուսումնասիրված են ստանդարտ և ոչ ստանդարտ կցաշարքերը, խտարար օղակները, դրանց նյութերը և երմեխանիկական մեթոդները: Հստակեցվել է նաև դեֆորմացիոն եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիայի խնդրի առկայությունը բազմակի օգտագործման տեսանկյունից: Առումնասիրությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետազոտության պատակները, հետագա թվային և փորձարարական ուսումնասիրությունների իմնավորումը և ուղղությունները:

Իրականացված վերլուծությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետևյալ անդիւրները:

- իրականացնել բազմաքանակ մոդելավորումներ՝ հաշվի առնելով կցաշարքերի նյութի պլաստիկ հատկությունները,
- կատարել փորձարկումներ՝ մոդելավորման արդյունքների ստուգման համար,
- որոշել ստանդարտ CF կցաշարքերի մոդելների առավելություններն և թերությունները: Մշակել տեխնիկական հանձնարարականներ դրանց օպտիմալ օգտագործման և նախագծման համար,

• իրականացնել ջերմաստիճանային գրադիենտի ազդեցության պայմաններում դեֆորմացիոն եզրի պլաստիկ դեֆորմացիայի և դրա բազմակի օգտագործման հնարավորության վերլուծություն, ինչպես նաև մշակել այդ պայմաններում դրանց օպտիմալ օգտագործման համար տեխնիկական հանձնարարականներ,

• մշակել կցաշարքերի օպտիմալ երկրաչափություններ, որոնք ապահովում են դեֆորմացիոն եզրի պլաստիկ դեֆորմացիայի հնարավորինս փոքր արժեք պահպանելով համակարգի երմեխանիկական արդյունավետությունը:

Երկրորդ գլուխ: Ներկայացված են տեխնոլոգիական և չափագիտական ենթակառուցվածքները, որոնք օգտագործվում են փորձարարական նմուշների մշակման (տեխնոլոգիական սարքավորումների վրա) և ուսումնասիրության շրջանակներում ճշգրիտ չափումներ կատարելու համար:

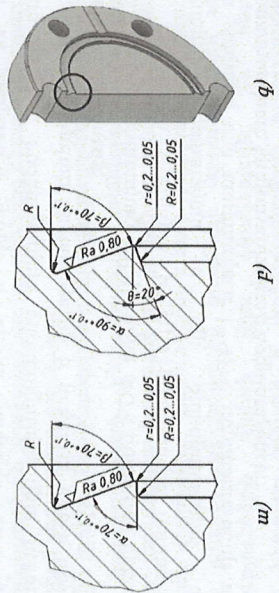
Մեխանիկական մշակումներն իրականացվել են HAAS ST-10 խառատային և HAAS TM-1P ուղղահայաց ֆրեզերային թվածրագրային կառավարման (ԹԾԿ) հաստոցների վրա: Իլի մեծ պտուտաթվերով HAAS ST-10 խառատային հաստոցը ապահովում է դետալի բարձր կրկնելիություն և ծավալային կայունություն ճշգրիտ խառատային մշակումներ կատարելիս: Դրա կոնյակտ չափը և ջերմակայունությունը այն հարմար են դարձնում փոքր և միջին չափերի ԳԲՎ մեքենամասերի արտադրության համար: Ինժեներական տեսանկյունից դրա ուժեղ կողմերն են կրշուտությունը, ծրագրավորման հեշտությունը և ընդհուպ մինչև միջին սերիական արտադրության ապահովումը:

HAAS TM-1P ուղղահայաց ֆրեզերային ԹԾԿ հաստոցը կիրառվում է հարթ մշակումների, ակումների մշակման և պրոֆիլավորման համար: 3 արանցքի կոնֆիգուրացիայի, ճշգրտության և իլի ծրագրավորվող պտուտաթվերի կառավարման շնորհիվ այն ապահովում է ԳԲՎ մեքենամասերի պտուտաստման համար համապատասխան երկրաչափական ճշգրտություն:

Մշակված դետալների չափերի ստուգումն իրականացվել է HEXAGON Leitz Reference 5.4.3 կոորդինատային չափիչ մեքենայի (ԿՉՄ) միջոցով: Այս բարձր ճշգրտության չափագիտական համակարգը հիմնված է իր յուրահատուկ կառուցվածքի վրա՝ գծային սենսորներով, որոնք ապահովում են շարժման գերազանց կայունություն և չափման սխալների փոքր արժեք: Մարքն իրականացնում է հպակային եղանակով չափման և սթանավորման ռեժիմներ թույլ տալով կատարել ինչպես դիսկրետ կետային չափումներ, այնպես էլ անընդհատ կոնտուրների ստացում: Նման ԿՉՄ համակարգերը լայնորեն կիրառվում են օդատիեզերական արդյունաբերության, ճշգրիտ մեքենաշինության և հետազոտական լաբորատորիաներում, որտեղ պահանջվում է չափերի խիստ և մեծ ճշտությամբ հսկողություն:

Կցաշառիքների կտրվածքների և հերմետիկացման բնութագրերի չափումներն իրականացվել է MMT-1600B մետաղագրաֆիկական մակրադիտակի միջոցով: Երկրայացված են մակրադիտակի ընդհանուր նկարագրությունը, կիրառման պայտասակները, օպտիկական և մեխանիկական բնութագրերը, ինչպես նաև ասանամափայլումները:

Ելքային գույք: Իրականացվել են բազմաքանակ մոդելավորումներ և իրարադարձական ուսումնասիրություններ՝ վերլուծելու CF կցաշառիքների ամենատարածված երկու ստանդարտ մոդելների լարվածության ռեֆորմացիան ինժանյուր, դրանց ռեֆորմացող եզրերի պլաստիկ ռեֆորմացիաները և հերմետիկացման բնութագրերը բազմակի հավաքման-քանարման ցիկլերում: Այդ պատասխանով, մոդելավորման ժամանակ ներմուծվել են կուրթերի ոչ միայն ասանամափայլման և առաձգական, այլ նաև պլաստիկ հատկությունները: Ելքային գույքը բաղկացնում է մոդելավորման նպատակով վերջավոր տարրերով հանդուրձված ստեղծվել են բավականին խիստ: Վերլուծության ընթացքում պարամետրերն էին ռեֆորմացող եզրի ծայրի կլորացման շառավիղը $r = 0.05; 0.1; 0.2$ մմ), անկյունը ($\alpha = 70; 90^\circ$), պլանկ խտրաբար օղակի կուրթի վիճակը (25% մակերևութային ամրացված), ինչպես նաև հաստատուն արժեքներ $R = 0.2$ մմ և $\beta = 70^\circ$:



Նկ. 1. CF կցաշառիքների ռեֆորմացող եզրերի ցիկլերի երկու մոդելները՝ ա) $\alpha = 70^\circ$ ռեֆորմացող եզրով (Վիլերի մոդել), բ) $\alpha = 90^\circ$ ռեֆորմացող եզրով (CERN-ի մոդել) և գ) կցաշառիքի կտրված եռանյւթ տեսքը նշված ռեֆորմացող եզրի հատվածով

Կցաշառիքների ստանդարտ մոդելների հանգումների լարվածառեֆորմացիան ուսումնասիրելիս ստացվել է, որ CERN-ի երկրաչափությունը ենթարկվում է ինժանյուր, ռեֆորմացող եզրի որոշակի փոքր տեղափոխությանը դեպի վակուումի ինչպիսիք, իսկ Վիլերի մոդելը ենթարկվում է ոչ միայն տրոսման, այլ նաև պլաստիկ տրոսման, որի մասին փաստում են դրա ռեֆորմացող եզրի հիմքում առաջացած լարտակային բարձր լարումները: Ցույց է տրվել, որ CERN-ի երկրաչափության ռեֆորմացող եզրի հավելյալ 20° անկյունը հանդիսանում է որպես կոշտության կոդ, որն ասպեկտիկալ կարծրացում էր Վիլերի մոդելի համեմատ: Ցույց

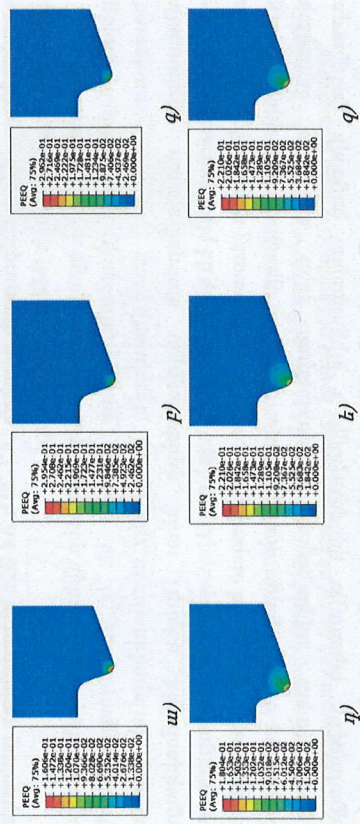
են տրվել նաև կցաշառիքների ռեֆորմացող եզրերի պլաստիկ ռեֆորմացիաների բաշխման գոտիները: Դրանք գնահատման արդյունքում մշակվել են տեխնիկական առաջարկներ, որոնք ներառում են CERN-ի մոդելի կիրառումը $r = 0.075 \dots 0.13$ մմ ռեֆորմացող եզրի ծայրի կլորացման շառավիղի միջակայքով: CERN-ի մոդելը ցանկալի է կիրառել թրծաբարված խտաբար օղակներով ռեֆորմացող եզրի հնարավորինս ցածր մնացորդային ռեֆորմացիաների առաջացման համար: Խորհուրդ է տրվել ընտրել փոքր կլորացման շառավիղեր, երբ անհրաժեշտ է ունենալ հնարավորինս բարձր հերմետիկացման մակարդակ: Եթե $0.5-1$ համակարգը ենթարկվելու է մի քանի հերմետիկացման-ապահերմետիկացման ցիկլերի, ապա ցանկալի են 0.1 մմ և դրանից ավելի, կլորացման շառավիղերի արժեքները:

Այնուհետև իրականացվել է հեղուկ-մանեկային միացության հաշվարկ, որի համար մոդելավորման տվյալներից դուրս է բերվել կցաշառիքների ձգման համար անհրաժեշտ ընդհանուր ուժը: Հեղուկների հաշվարկը կատարվել է օգտագործելով դասական հեղուկների հաշվարկման բանաձևեր, որտեղ հեղուկի նյութի թույլատրելի լարման փոխարեն ընտրվել է նյութի հոսունության սահմանի լարումը: Այս մոտեցումը հանդիսանում է որպես ավելի խիստ կիրառելի, որը ձգման ընթացքում կբացառի հեղուկների պլաստիկ ռեֆորմացիան: Ստացվել են հեղուկ-մանեկային միացության տեխնիկական հանձնարարականներ կցաշառիքների երկու ստանդարտ մոդելների, խտաբար օղակի կուրթի երկու վիճակների, երկու ամենատարածված կիրառվող հեղուկների ամրության դասերի (A2-70 և A4-80), հեղուկների քանակների (վեց և ութ) և տրամագծերի (M6 և M8) համար:

Իրականացվել են կցաշառիքների ձգման փորձեր մինչև չորս հերմետիկացման ցիկլերով: Այնուհետև փորձանմուշները կտրվել են և մետաղագրաֆիկական մանրադիտակի միջոցով ուսումնասիրվել են դրանց հերմետիկացման գոտիները համեմատելով մոդելավորման արդյունքների հետ: Որպես հերմետիկացման բնութագրեր հետազոտվել են ռեֆորմացող եզրի բարձրությունը (h), խտաբար օղակի վրա ռեֆորմացող եզրի շառավիղային ուղղությամբ թողած հետքի երկարությունը (P) և կցաշառիքների միջև բացակի: Փորձերի արդյունքները որակապես և քանակապես բավականին մոտ են եղել մոդելավորման տվյալներին: Հերմետիկացման բնութագրերի միջոցով սպասարկվել է կցաշառիքների պլաստիկ ռեֆորմացիայի առաջացումը, որը գրանցվել է հերմետիկացման ցիկլերի աճին զուգընթաց h -ի և P -ի աստիճանաբար նվազումը կցաշառիքների միջև բացակի զուգահեռ աճով: Ստացվել են խտաբար օղակների նյութի երկու վիճակների համար h պարամետրի ճկուն հաշվարկման մոդելային մոտեցիաներ, որոնք թույլ են տալիս առանց բարդ ու ժամանակատար մոդելավորումների և փորձերի իրականացման բավականին արագ հաշվարկել կցաշառիքների ռեֆորմացող եզրերի բարձրությունները կախված հերմետիկացման ցիկլերի քանակից: Էմպիրիկ ֆունկցիաները հաշվի են առնում նյութի պլաստիկ հատկությունները, առանց դրա

պլյատիկ քայքայման: Որպես ստանանափակում, տվյալ բանաձևերը նախատեսված են 304L մակնիշի չժանգոտվող պողպատի և DN35CF չափերի կցաշուրթերի առաջավարկման համար: Չնակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր գրականություններ:

Չորրորդ գլուխ: Բրականացվել է ստանդարտ կցաշուրթերի հերմետիկացման ուսումնասիրությունը բարձր ջերմային գրադիենտների միջավայրում: Մոդելավորման համար կուրթերի ֆիզիկամեխանիկական, առաճական և պլաստիկ հատկություններից գտա տրվել են դրանց ջերմային առաջավարկմանը սենյակային՝ 20°C-ից մինչև 300°C աճի դեպքում: Արդյունքում՝ հերմետիկացումը և ամրացված խտարար օղակների դեպքերում 20°C և 300°C ջերմաստիճանների ժամանակ Միզմի լարման առավելագույն արժեքների տարբերությունը ստացվել է համապատասխանաբար 134.9 և 20.4 ՄՊա: Այս երևույթը առաջատրվել է երեք հիմնական գործոններով: Ջերմային լարումներով, հավելյալ արումների աճով, որը պայմանավորված է կուրթերի ջերմային ընդարձակման նորմիկ խտարար օղակի մեջ դեֆորմացիոն կորերի ներկայության չափի մեծացումով: Առաջնային կցաշուրթերի մնացորդային դեֆորմացիաների բաշխման գոտիները (նկ. 2) սենյակային ջերմաստիճանում, 300°C-ում և մինչև 20°C սառեցումից հետո:



Նկ. 2. Ղեֆորմացիոն կորերի պլաստիկ դեֆորմացիայի բաշխման գոտիները թրծաթողված (ա, բ, գ) և ամրացված (դ, ե, զ) խտարար օղակների դեպքերում, սենյակային ջերմաստիճանում՝ 20°C (ա, դ), մինչև 300°C տաքացման (բ, ե) և մինչև 20°C սառեցման (գ, զ) ժամանակ:

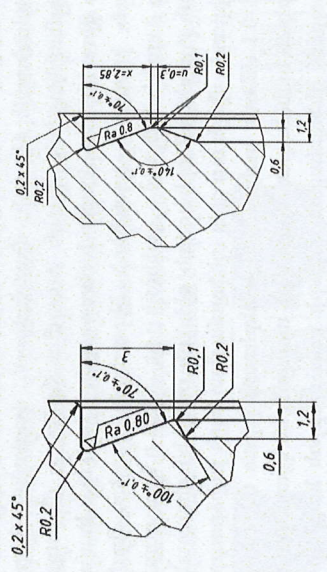
Ստացվել են, որ թրծաթողված խտարար օղակները բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտների պայմաններում կիրառելի նպատակահարմար չէ ամրացված խտարար օղակների համեմատ: Պատճառն այն է, որ վերջինիս դեպքում

ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց կուրթերի ջերմային ընդարձակման արդյունքում ոչ միայն մեծանում է դեֆորմացիոն կորերի ներկայության չափը խտարար օղակի մեջ, այլև, դրան համարակցաց, տեղի է ունենում խտարար օղակի մասնակի թրծաթողում: Արդյունքում, խտարար օղակը զուգահեռ փակվում է, և դեֆորմացիոն կորը ավելի քիչ է պլաստիկ դեֆորմացվում: Վերոնշյալ երևույթը բացակայում է լիարժեք թրծաթողված խտարար օղակների դեպքում:

Բրականացվել են կցաշուրթերի ձգման փորձեր ևս մինչև չորս հերմետիկացման ցիկլերով, ջերմաստիճանի աճը իրականացվել է ԳԲՎ համակարգերի համար նախատեսված հաստով տաքացնող ժապավենի միջոցով, որի ջերմաստիճանը բարձրացվել է լարման կարգավորիչով, իսկ ջերմաստիճանի վերահսկումը իրականացվել է K-տեսակի թերմոստատի և դրանց TPMT մակնիշի կառավարման բլոկի միջոցով: Փորձերն իրականացվել են հանգույցների 300°C-ում մեկ ժամ պահումով ջերմաստիճանի համաչափ բաշխման ապահովման համար, իսկ սառեցումն իրականացվել է օդի միջավայրում: Փորձանմուշները կտրվել են, այնուհետև հերմետիկացման գոտին ուսումնասիրվել է մետալագրաֆիկական մանրադիտակի վրա՝ հերմետիկացման բնութագրերի չափման համար: Ստացվել է, որ թրծաթողված խտարար օղակների կիրառումը բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտների պայմաններում ցանկալի չէ, եթե կցաշուրթերի հետագա հերմետիկացման-ապահերմետիկացման ցիկլերի քանակը գերազանցելու է չորսը: Կարելի է այն կիրառել մինչև ութ ցիկլ (դեֆորմացիոն կորի բարձրությունը նվազում է մտասվորապես 0.1 մմ-ով), սակայն գազի ներհոսքի խիստ վերահսկման դեպքում: Տվյալ տեխնիկական հանձնարարականները ստացվել են կցաշուրթերի մինչև 300°C տաքացման դեպքում դեֆորմացիոն կորերի բարձրության հաշվարկման էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիայի շնորհիվ: Վերջինս ստացվել է թրծաթողված խտարար օղակների համար, իսկ ամրացված խտարար օղակների դեպքում անհրաժեշտ են հետագա հավելյալ ուսումնասիրություններ: Չնակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր եզրակացություններ:

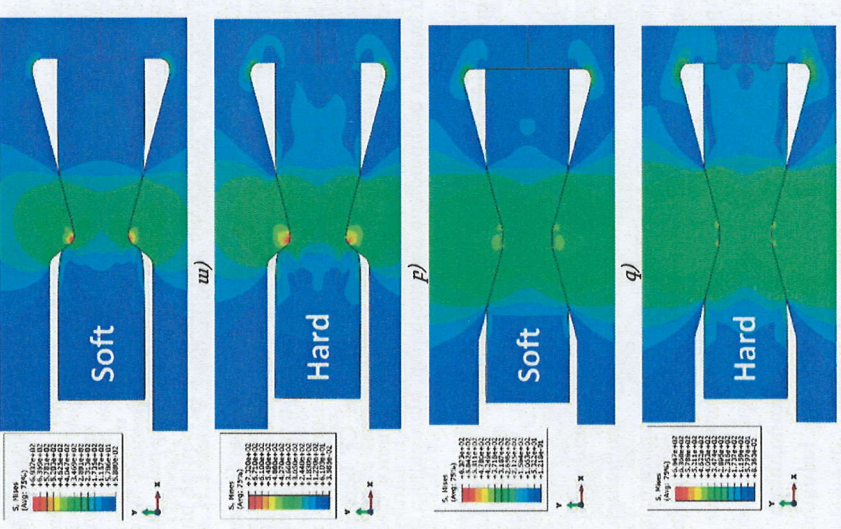
Հինգերորդ գլուխ: Բրականացվել են բազմաբանակ մոդելավորումներ, փոփոխելով առկա ստանդարտ երկրաչափության որոշ բնութագրեր ($\alpha = 90 \dots 140^\circ$, $\beta = 60 \dots 80^\circ$) հնարավոր օպտիմալ տարբերակը որոշելու համար: Որպես գնահատման կրիտերիա ընտրվել է դեֆորմացիոն կորերի առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիան: Չափահեռ մշակվել են դեֆորմացիոն կորերի նոր տեսակի երկրաչափություններ, առաջինը՝ այլիքան երկրաչափություն է, երկրորդը՝ CHE-մոդելը: Առաջին տարբերակը բացառվել է, որովհետև մոդելավորման արդյունքում ակնհայտ է դարձել, որ հերմետիկացման արդյունքում դեֆորմացիոն կորի և խտարար օղակի միջև փակ սին ծավալ է մնում, որը բացասաբար է ազդում վակուումի վրա: Երկրորդ CHE-մոդելը ստացվել է, որպես հինգ վերցնելով գայիկոնի երկրաչափությունը, որտեղ երկու կտրող կորերի միջև առկա է փոքր միջավայր, որն

առաջինն է շփվում մետաղի հետ կարման գործընթացում ճնկելով այն: Նման լուծում արվել է CHE-մոդելի դեֆորմացիոն դեֆորմացիոն եզրի երկու կողմերի միջև միջուկային ավելացնելով: Իրականացվել են մոդելավորումներ, որպեսզի գնահատվի մշակված մոդելի պիտանելիությունը և իրականացվի որոշ չափերի օպտիմալացում: Վերջինիս կարիքը նկատվում էր, որովհետև լարվածալեֆորմացիոն վիճակի ուսումնասիրության արդյունքում պարզ դարձավ, որ միջուկային երկու ծայրային գագաթների լարվածային վիճակները տարբերվում են: Վակուումի կողմում գտնվող գագաթում առկա էին ավելի բարձր կուտակային լարումներ, մեխուրտային ճնշման միջավայրի կողմում գտնվող գագաթի համեմատ: Արդյունքում մշակվել են երկու տեսակի նոր կցաշարիքների CANDLE-մոդելներ (նկ. 3), որոնցից առաջինը նոր օպտիմալացված CF երկրաչափությունն է ($\alpha = 100^\circ$, $\beta = 70^\circ$), իսկ երկրորդը CHE-մոդելը:



Նկ. 3. Մշակված կցաշարիքների CANDLE-մոդելների հերմետիկացման գոտիները Գ,Բ-վ հասակաբազերի համար, որտեղ ա) $\alpha = 100^\circ$, $\beta = 70^\circ$ նոր CF-մոդել, բ) CHE-մոդել

Իրականացվել է ճշգրտված CANDLE-մոդելների լարվածային վիճակի մոդելավորում (նկ. 4), հետագրտվել են մշակված մոդելների պլաստիկ դեֆորմացիաները 100% հերմետիկացման դեպքում: Կատարվել է հեղուկ-ամանկային միացության հաշվարկ, որի համար մոդելավորման տվյալներից որոշո են բերվել կցաշարիքների ձգման համար անհրաժեշտ բնօրինակ ուժերը: Հաշվարկների հիման վրա մշակվել են նոր մոդելները հեղուկ-ամանկային միացության տեխնիկական հանձնարարականներ:



Նկ. 4. Տոն Միզեի լարման բաշխման գոտիները կցաշարիքների CANDLE-մոդելներում 100% հերմետիկացման դեպքում, որտեղ ա, բ) $\alpha = 100^\circ$, $\beta = 70^\circ$ նոր CF-մոդելն է, իսկ գ, դ) CHE-մոդելը, երբ կիրառվում են թրծաթողված (ա, գ) և ամրացված (բ, դ) խտարար օղակներ

ԹՕՄ հաստոցների վրա մշակվել են նոր կցաշարիքների CANDLE-մոդելները: Մեխանիկական բնագրքում որոշվել են օպտիմալ կարման ռեժիմները մակերևույթների համապատասխան ճշտությունների և որակի ստացման համար: Ստացված մոդելներով իրականացվել են փորձեր, որի արդյունքում որոշվել են կցաշարիքների փաստացի հերմետիկացման աստիճանները (կցաշարիքների միջև փաստացի բացակները արտահայտված տոկոսներով): Վերջիններս կիրառվել են մոդելավորման միջավայրում համապատասխան հերմետիկացման քայլի որոշման

ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱՎ

1. A.H. Davtyan, H.A. Isunts, V.S. Dekhtiarov, Computer simulation and experimental analysis of ultrahigh vacuum CF flange joints applied in the accelerator and space technology // Proceedings of NPUA. Mechanics, Machine Science, Machine-building.- Yerevan, 2022.- №1.- p. 41-53, DOI: 10.53297/18293387-2022.1-41.
2. A. Davtyan, H. Isunts, V. Dekhtiarov, A. Vardanyan, V. Avagyan and T. Mkrtchyan, The analysis and experimental research of ultrahigh vacuum ConFlat-type flange joints applied in accelerator and space technology, 2023 JINST 18 P03013, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/03/P03013>.
3. A. Davtyan, H. Isunts, A. Vardanyan, A. Azizov and V. Avagyan, The combined research of ultra-high vacuum CF flange joints' sealing parameters considering plastic properties of materials, 2023 JINST 18 P12010, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/12/P12010>.
4. А.А. Давтян, Проблемы герметизации вакуумных систем в ускорительной технике // Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение.- Ереван, 2024.- №1.- С. 29-48, DOI: 10.53297/18293387-2024.1-28.
5. A. Davtyan, H. Isunts, A. Azizov and V. Avagyan, Comprehensive overview of materials, sealing methods and vulnerabilities of UHV systems for particle accelerators, 2025 JINST 20 T03002, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/03/T03002>.

համար, որի շնորհիվ ստացվել են նոր կցաշարերի փաստացի առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիաները: Մոդելավորման միջոցով ուսումնասիրվել են նաև խտարար օդակների հերմետիկացման հատվածում առաջացող առավելագույն Միգլեսի լարումները, որոնք համեմատվել են ստանդարտ կցաշարերի մոդելավորման արդյունքների հետ՝ ԳԲՎ հերմետիկության ստուգման համար: Ստացված լարվածային միճակը լիովին ապացուցել է սշակված նոր մոդելների ԳԲՎ հերմետիկացման ապահովումը:

Մտանդարտ CF և նոր CANDLE-մոդելների գազանցիկության գնահատման համար մետաղագրաֆիկական մանրադիտակով ուսումնասիրվել են դրանց P բնութագրերը, որի արդյունքում նոր մշակած CANDLE-մոդելները ապահովել են P -ի բավականին բարձր արժեք, համեմատած ստանդարտ CF կցաշարերի հետ: P -ի ավելի բարձր արժեքը մեծացնում է հերմետիկացման գոտում մթնոլորտային գազի գազանցիկության համար անհրաժեշտ ճանապարհը, հետևաբար ստացվում է ավելի ցածր գազանցիկություն:

Վերջնական չափումներն իրականացվել են HEXAGON Leitz Reference 5.4.3 ԿՉՄ-ի միջոցով: Մեքենան նախապես վերալարվել է համաձայն ISO 10360 ստանդարտի, որի ժամանակ ջերմաստիճանն կազմել է $20.7120\text{ }^{\circ}\text{C}$, իսկ չափող գլխույի ճշտությունը $0.2\text{ }\mu\text{m}$: ԿՉՄ-ի միջոցով սքանավորվել են կցաշարերի դեֆորմացնող եզրերը, որի արդյունքում CHE-մոդելի փաստացի միջին պլաստիկ դեֆորմացիան կազմել է $6.233 \pm 0.033\%$, որի տարբերությունը մոդելավորման արդյունքներից կազմում է մոտ $0.353 \pm 0.033\%$, այսինքն մոտավորապես $2.12 \pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$: Նոր CF երկրաչափության դեպքում համապատասխան տարբերությունը կազմում է $0.312 \pm 0.033\%$, այսինքն մոտ $1.87 \pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$: Այսպիսով ապացուցվել է նոր մշակված CANDLE-մոդելների երկրաչափությունների ավելի բարձր կայունությունը, հուսալիությունն ու երկարակեցությունը համեմատած ստանդարտ CF կցաշարերի հետ: Ձևակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր եզրակացություններ:

Development of ConFlat-type flange joint technology in ultra-high vacuum systems

SUMMARY

This thesis presents a comprehensive numerical and experimental investigation of the stress-strain state of ultra-high vacuum CF flange joints during tightening, with explicit consideration of plastic deformation of the flange knife edge. For the first time, the tightening process is analyzed in a fully elastoplastic formulation for both flange and gasket materials, enabling a consistent assessment of sealing behavior, structural stability, and reusability.

Simulations were performed for the two most widely used knife-edge geometries – Wheeler's and CERN's models – combined with two gasket material conditions (annealed and ¼ hard copper). Wheeler's model exhibits substantial plastic bending of the knife edge in all cases under full tightening. In contrast, the CERN model shows significantly improved mechanical stability.

The behavior of CF flange joints under repeated use was studied for up to four tightening cycles through combined numerical simulations and controlled experimental measurements. Excellent qualitative and quantitative agreement was achieved, validating the numerical approach for practical engineering applications. Empirical functions describing the evolution of knife-edge height as a function of tightening cycles were derived.

Under elevated thermal loads, ¼ hard gaskets provide superior stability and reduced knife-edge deformation in the case of its repeated use. In contrast, annealed gaskets are not recommended for applications exceeding approximately four tightening cycles, unless strict leak monitoring is employed.

Based on the obtained numerical and experimental evidence, two new CANDLE-design flange concepts have been developed for ultra-high vacuum systems: a modified CF-type design ($\alpha = 100^\circ$; $\beta = 70^\circ$) and the CHE design. These geometries demonstrate substantially reduced plastic strain and enhanced geometric stability compared to the standard CF solution. Consequently, CANDLE-design flanges offer improved reliability and extended service life for ultra-high vacuum applications, particularly in accelerator technology, where repeated assembly, high thermal loads, and long-term vacuum tightness are critical.

Разработка технологии фланцевых соединений типа ConFlat в системах сверхвысокого вакуума

РЕЗЮМЕ

В диссертации представлено комплексное численное и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния сверхвысоковакуумных CF фланцевых соединений при затяжке с явным учетом пластической деформации деформирующей кромки фланца. Впервые процесс затяжки рассмотрен в полной упругопластической постановке как для материала фланца, так и для прокладки, что позволило корректно оценить герметичность, структурную устойчивость и возможность многократного использования соединения.

Численное моделирование выполнено для двух наиболее распространенных геометрий режущей кромки – моделей Уилера и CERN-а – в сочетании с двумя состояниями медных уплотнительных колец (отожженная и упрочненная). Модель Уилера демонстрирует значительный пластический изгиб кромки во всех случаях полной затяжки. Модель CERN-а характеризуется существенно большей механической стабильностью.

Поведение соединений при повторном использовании исследовано до четырех циклов затяжки с применением численного анализа и контролируемых экспериментальных измерений. Получено хорошее качественное и количественное согласие результатов, подтверждающее достоверность модели. Выведены эмпирические зависимости изменения высоты деформирующей кромки от числа циклов затяжки.

При повышенных тепловых нагрузках упрочненные уплотнительные кольца обеспечивают лучшую стабильность и меньшую деформацию кромки при ее многократном использовании. Отожженные уплотнительные кольца не рекомендуются для применения более чем в четырех циклах затяжки без строгого контроля герметичности.

На основании полученных результатов разработаны две новые CANDLE-модели фланцев для сверхвысоковакуумных систем: модифицированная CF-геометрия ($\alpha = 100^\circ$; $\beta = 70^\circ$) и CHE-модель. Эти решения характеризуются сниженной пластической деформацией и повышенной геометрической стабильностью по сравнению со стандартным CF фланцем, обеспечивая повышенную надежность и увеличенный срок службы в ускорительной технике и других сверхвысоковакуумных применениях.

