

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

Դավթյան Ալբերտ Հարությունի

Con-Flat տեսակի կցաշուրթային միացման տեխնոլոգիայի մշակումը գերբարձր վակուումային
համակարգերում

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

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

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 ՔԵՆԴԼ սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտի գիտական խորհրդում:

Գիտական ղեկավար
Տեխն. գիտ. դոկտոր

Վարդան Շավարշի Ավագյան (ՔԵՆԴԼ, ՍՀԻ,
ԱԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ
Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու
Տեխն. գիտ. դոկտոր

Բագրատ Աշոտի Գրիգորյան (ՔԵՆԴԼ, ՍՀԻ)
Վահան Հենրիկի Ավետիսյան (ՌՀՀ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ

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

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:
Սեղմագիրն 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 HESC 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 վակուումային համակարգերի վրա, որտեղ գերբարձր վակուումային (ԳԲՎ) պայմանները (10^{-9} ... 10^{-11} մԲար) անհրաժեշտ են գազի փոխազդեցությունը արագացված մասնիկների հետ նվազագույնի հասցնելու և փորձի վերարտադրելի պայմաններ ապահովելու համար: ConFlat (CF) կցաշուրթային միացումները դեֆորմացնող եզրով և պղնձե խտարար օղակներով արդյունաբերական ստանդարտ են արագացուցիչների ԳԲՎ համակարգերում և փնջատարներում ԳԲՎ ապահովելու համար շնորհիվ չափազանց ցածր ներհոսքի աստիճանի հուսալի մետաղ-մետաղական միացում ստեղծելու ունակության:

CF կցաշուրթերի միացման մեխանիզմը հիմնված է դրանց դեֆորմացնող եզրերի միջև թրջվածնազրկված պղնձե խտարար օղակի պլաստիկ դեֆորմացման վրա, որը ապահովում է ԳԲՎ հերմետիկացում: Գոյություն ունեն Վիլերի և CERN-ի կողմից մշակված կցաշուրթերի դեֆորմացնող եզրերի երկրաչափություններ, որոնց կիրառումը ամենատարածվածն է: Այնուամենայնիվ, փնջի էներգիայի մեծացումը, կրիոգեն տեխնոլոգիայի օգտագործումը, էլեկտրոնային ճառագայթման տերահերցային տիրույթի անցումը, մեծ պահանջներ են դնում վակուումի կայունության և համակարգի ընդհանուր հերմետիկության վրա: Բացի այդ, CF կցաշուրթերի միացման հերմետիկացման գոտում առաջանում է զգալի մեխանիկական լարվածային վիճակ: Գոյություն ունեցող թվային և վերլուծական ուսումնասիրությունների մեծ մասում CF միացումներում կցաշուրթը ընտրվում է որպես բացարձակ պինդ (չդեֆորմացվող) մարմին, և լարվածադեֆորմացիոն վիճակի հաշվարկման ժամանակ հաշվի է առնվում միայն խտարար օղակի դեֆորմացիան: Այս պարզեցումը հիմնված է այն ենթադրության վրա, որ կցաշուրթերի դեֆորմացիան աննշան է, երբ համեմատվում է խտարար օղակի դեֆորմացիայի հետ: Այնուամենայնիվ, վերջին ուսումնասիրությունները ցույց են տալիս, որ լարումների կոնցենտրացիան դեֆորմացնող եզրում կարող է գերազանցել դրա նյութի հստակության 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 կցաշուրթերի հանգույցում մի քանի հավաքման-քանդման ցիկլերի ընթացքում:

Չնայած ԳԲՎ համակարգերում և առաջադեմ տեխնոլոգիաներում CF կցաշուրթերի գործնական կիրառելիությանը, բացակայում են համապարփակ թերմոմեխանիկական ուսումնասիրություններ, որոնք հաշվի կառնեն ինչպես խտարար օղակի նյութի, այնպես էլ կցաշուրթերի առաձգապլաստիկ հատկությունները: Նման ուսումնասիրությունների բացակայությունը հանգեցնում է CF կցաշուրթերի իրական լարվածադեֆորմացիոն վիճակի կանխատեսման անճշտությունների, նվազեցնում է գոյություն ունեցող մոդելների կանխատեսվող հուսալիությունը, դրանց բազմակի օգտագործման հնարավորությունը և կասկածի տեղիք է տալիս դրանց օպտիմալ կիրառման և ծառայության ժամկետների գնահատման համար: Այսպիսով՝ ստանդարտ CF մոդելների առավելություններն ու թերությունները դեռևս վերլուծված չեն, և դրանց օպտիմալ օգտագործման համար տեխնիկական հանձնարարականները, ներառյալ սահմանափակումները, սահմանված չեն:

Աշխատանքի նպատակը և խնդիրները

Աշխատանքի նպատակն է ԳԲՎ CF կցաշուրթերի միացումների ջերմամեխանիկական և առաձգապլաստիկ հատկությունների ուսումնասիրությունը սենյակային ջերմաստիճանի և բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտի պայմաններում՝ հաշվի առնելով ինչպես խտարար օղակի, այնպես էլ կցաշուրթերի նյութերի պլաստիկ դեֆորմացիաները, ինչպես նաև մշակել վերջինիս ճշգրիտ գնահատման բանաձևեր, տեխնիկական հանձնարարականներ և կցաշուրթերի կատարելագործված երկրաչափություն(ներ)՝ բարձր կայունությամբ և հնարավորինս նվազեցված մնացորդային դեֆորմացիաներով, հետևաբար նաև բազմակի օգտագործման ավելի լավ հատկություններով՝ համեմատած ստանդարտ մոդելների հետ:

Ատենախոսության խնդիրներն են.

- CF կցաշուրթերի միացումների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի ճշգրիտ թվային մոդելավորման իրականացումը՝ հաշվի առնելով նյութերի առաձգապլաստիկ հատկությունները,
- փորձերի անցկացումը՝ մոդելավորման արդյունքների հետ համեմատելու և կցաշուրթերի, ինչպես նաև խտարար օղակների պլաստիկ դեֆորմացիաները քանակականացնելու համար,
- իրական պայմաններում ամբողջական հերմետիկացման (100% ձգման) անհնարինության ապացուցումը և հեղուս-մանեկային միացության հաշվարկները,
- դեֆորմացնող եզրերի բարձրությունների որոշման էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաների մշակումը,

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

Գիտական նորույթը

Առաջին անգամ իրականացվել են CF կցաշուրթերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի ջերմամեխանիկական և առաձգապլաստիկ հետազոտություններ՝ գնահատելով կցաշուրթերի պլաստիկ դեֆորմացիաները, բազմակի օգտագործման հնարավորությունը և փորձնականորեն ցույց տրված ամբողջական հերմետիկացման հասնելու անհնարինությունը (100% ձգում): Առաջին անգամ մշակվել են Էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաներ, որոնք թույլ են տալիս ճկուն գնահատել կցաշուրթերի դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիան առանց բարդ ու ժամանակատար մոդելավորումների և փորձերի: Համակցված թվային մոդելավորման և փորձարարական հետազոտությունների հիման վրա առաջին անգամ ձևակերպվել են ստանդարտ CF կցաշուրթերի օպտիմալ շահագործման տեխնիկական հանձնարարականները: Այսպիսով, հետազոտությունների արդյունքում, մշակվել են կցաշուրթերի երկու նոր, բարելավված CANDLE-մոդելներ, որոնք ապահովում են ավելի բարձր կայունություն և հուսալիություն՝ համեմատած առկա ստանդարտ մոդելների հետ:

Կիրառական նշանակությունը

- Մտացված արդյունքները և մշակված տեխնիկական հանձնարարականները կարող են օգտագործվել տարբեր ցածր և բարձր էներգիաների արագացուցիչների ԳԲՎ համակարգերում, ինչպես սենյակային, այնպես էլ բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտների պայմաններում աշխատող:
- Աշխատանքում ներկայացված առաջարկությունները և նոր մշակված մոդելները կարող են օգտագործվել ՔԵՆՂԼ սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտում գործող ԱՐԵԱԼ զծային էլեկտրոնային արագացուցիչի հետագա արդիականացման համար:
- Դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիաները հաշվարկելու համար մշակված Էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաները թույլ են տալիս գնահատել արագացուցիչներում և ԳԲՎ այլ համակարգերում կցաշուրթերի երկարակեցությունը, ինչպես նաև առկա համակարգերում կցաշուրթերի ընթացիկ վիճակը:
- Նոր մշակված կցաշուրթերի CANDLE-մոդելները կարող են օգտագործվել ավելի հուսալի և կառուցվածքայինորեն կայուն ԳԲՎ 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 մթնոլորտային ճնշումը պահպանվում է ներսում:

Ատենախոսության հիմնական դրույթները

- Ստանդարտ կցաշուրթերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի տեսանկյունից CERN-ի մոդելը ավելի գերադասելի է, քան Վիլերի մոդելը, որը ենթակա է ոչ միայն տրոբման, այլ նաև պլաստիկ ծոման: Երկու ստանդարտ մոդելների օպտիմալ կիրառման համար կարելի է օգտվել մշակված տեխնիկական հանձնարարականներից:
- Ստացված էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաները կիրառելի է կցաշուրթերի (CERN-ի մոդելի) դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիայի ճկուն գնահատման համար, որը հաշվի է առնում նյութի ամրացման գործընթացը (նյութի պլաստիկ հասկությունները), առանց դրանց պլաստիկ քայքայման: Հիմնական սահմանափակումն է կցաշուրթի չափերի փոփոխությունը և այլ նյութի կիրառումը:
- Թրծաթողված խտարար օդակները խրոհուրդ չի տրվում կիրառել բարձր ջերմային գրադիենտների միջավայրում, եթե ակնկալվում է, որ կցաշուրթերը ենթարկվելու են ավելի քան 4 հերմետիկացման-ապահերմետիկացման ցիկլերի: Ցիկլերի քանակը կարելի է հասցնել մինչև 8-ի, սակայն միայն գազի ներհոսքի խիստ վերահսկման դեպքում:
- Կցաշուրթերի մշակված CANDLE-մոդելները ապահովում են երկրաչափության ավելի բարձր կայունություն, հուսալիություն և նպատակահարմար են բազմակի օգտագործման տեսանկյունից համեմատած ստանդարտ մոդելների:

Հրապարակումներ և գիտաժողովներ

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

պատկանող հանդեսներին: Հոդվածների 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. Բաունց, Վ.Ս. Դեխտյարով // «Արագացուցչային և սիեզերական տեխնոլոգիայում կիրառվող գերբարձր վակուումային CF կցաշուրթերի միացումների համակարգչային մոդելավորումը և փորձարարական վերլուծությունը», ՀԱՊՀ տարեկան գիտաժողով 2022, Երևան:
- 3) Ա.Հ. Դավթյան // «Վակուումային համակարգերի հերմետիկացման խնդիրները արագացուցչային տեխնիկայում», ՀԱՊՀ 90-ամյա հոբելյանին 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. Բաունց, Վ.Շ. Ավագյան // «Արագացուցչային CF կցաշուրթերի համակարգչային և փորձարարական վերլուծությունը տարբեր ջերմաստիճաններում», ՀԱՊՀ տարեկան գիտաժողով 2024, Երևան:

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

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 5 գլուխներից և 87 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 117 էջ, պարունակում է 54 նկար և 11 աղյուսակ: Ատենախոսության զլուխներն են.

Գլուխ 1. Գրականության ակնարկ

Գլուխ 2. Սարքավորումներ

Գլուխ 3. Արագացուցչային և տիեզերական տեխնիկայում կիրառվող գերբարձր վակուումային ConFlat-տեսակի կցաշուրթային միացումների վերլուծություն և փորձարարական հետազոտություն

Գլուխ 4. Մոդելավորման և փորձարարական մոտեցումներով մասնիկների արագացուցիչների CF կցաշուրթային միացումների ջերմամեխանիկական վիճակի գնահատում

Գլուխ 5. Մշակված նոր կցաշուրթերի CANDLE-մոդելները

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԱՄԱՌՈՏ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Ներածության մեջ հիմնավորված է ԳԲՎ համակարգերում օգտագործվող Վիլերի և CERN-ի կցաշուրթերի մոդելների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի և պլաստիկ դեֆորմացիայի ուսումնասիրության արդիականությունը, վերլուծված են առկա ուսումնասիրությունների սահմանափակումները և ձևակերպված է կցաշուրթերի նյութի պլաստիկ հատկությունների մասնակցությամբ, դրանց մոդելավորման անհրաժեշտությունը: Նման մոդելավորումները անհրաժեշտ են ԳԲՎ կցաշուրթերի բազմակի օգտագործման հնարավորության ճշգրիտ գնահատման համար: Այնուհետև ներկայացված են ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, նրա նպատակն ու խնդիրները, արդյունքների նորությունը և արդյունքների կիրառական նշանակությունը, որոնցից հետո ներկայացված է բոլոր 5 գլուխների հակիրճ բնութագրությունները:

Առաջին գլուխ: Ներկայացված է արագացուցիչներում օգտագործվող ԳԲՎ կցաշուրթերի համապարփակ վերլուծական ակնարկ: Ուսումնասիրված են ստանդարտ և ոչ ստանդարտ կցաշուրթերը, խտարար օղակները, դրանց նյութերը և հերմետիկացման մեթոդները: Հստակեցվել է նաև դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիայի խնդրի առկայությունը բազմակի օգտագործման տեսանկյունից: Ուսումնասիրությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետազոտության նպատակները, հետագա թվային և փորձարարական ուսումնասիրությունների հիմնավորումը և ուղղությունները:

Իրականացված վերլուծությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետևյալ խնդիրները.

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

- իրականացնել ջերմաստիճանային գրադիենտի ազդեցության պայմաններում դեֆորմացնող եզրի պլաստիկ դեֆորմացիայի և դրա բազմակի օգտագործման հնարավորության վերլուծություն, ինչպես նաև մշակել այդ պայմաններում դրանց օպտիմալ օգտագործման համար տեխնիկական հանձնարարականներ,
- մշակել կցաշտրթերի օպտիմալ երկրաչափություններ, որոնք ապահովում են դեֆորմացնող եզրի պլաստիկ դեֆորմացիայի հնարավորինս փոքր արժեք՝ պահպանելով համակարգի հերմետիկացման 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:

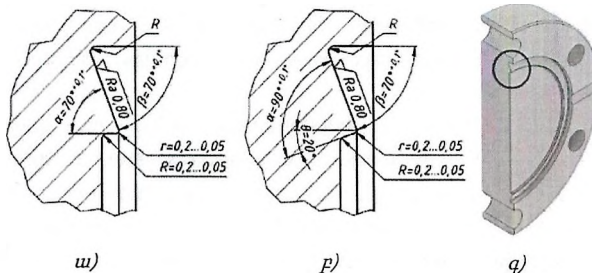
Մեխանիկական մշակումներն իրականացվել են HAAS ST-10 խառատային և HAAS TM-1P ուղղահայաց ֆրեզերային թվածրագրային կառավարման (ԹԾԿ) հաստոցների վրա: Իլի մեծ պտուտաթվերով HAAS ST-10 խառատային հաստոցը ապահովում է դետալի բարձր կրկնելիություն և ծավալային կայունություն ճշգրիտ խառատային մշակումներ կատարելիս: Դրա կոմպակտ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

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

Մշակված դետալների չափերի ստուգումն իրականացվել է HEXAGON Leitz Reference 5.4.3 կոորդինատային չափիչ մեքենայի (ԿՉՄ) միջոցով: Սյս բարձր ճշգրտության չափագիտական համակարգը հիմնված է իր յուրահատուկ կառուցվածքի վրա՝ գծային սենսորներով, որոնք ապահովում են շարժման գերազանց կայունություն և չափման սխալանքի փոքր արժեք: Սարքն իրականացնում է հպակային եղանակով չափման և սքանավորման 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:

Կցաշուրթերի կտրվածքների և հերմետիկացման բնութագրերի չափումներն իրականացվել է MMT-1600B մետաղագրաֆիկական մանրադիտակի միջոցով: Ներկայացված են մանրադիտակի ընդհանուր նկարագրությունը, կիրառման նպատակները, օպտիկական և մեխանիկական բնութագրերը, ինչպես նաև սահմանափակումները:

Երրորդ գլուխ: Իրականացվել են բազմաքանակ մոդելավորումներ և փորձարարական ուսումնասիրություններ՝ վերլուծելու CF կցաշուրթերի ամենատարածված երկու ստանդարտ մոդելների լարվածությամբ դեֆորմացիոն վիճակը, դրանց դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիանները և հերմետիկացման բնութագրերը բազմակի հավաքման-քանդման ցիկլերում: Այդ նպատակով, մոդելավորման ժամանակ ներմուծվել են նյութերի ոչ միայն ֆիզիկամեխանիկական և առաձգական, այլ նաև պլաստիկ հատկությունները: Մոդելավորման ճշտության բարձրացման նպատակով վերջավոր տարրերով բաժանման ցանցի հանգույցները ստեղծվել են բավականին խիտ: Վերլուծության փոփոխական պարամետրերն էին՝ դեֆորմացնող եզրի ծայրի կլորացման շառավիղը ($r = 0.05; 0.1; 0.2$ մմ), անկյունը ($\alpha = 70; 90^\circ$), պղնձե խտարար օղակի նյութի վիճակը (թրծաթողված և 25% մակերեսային ամրացված), ինչպես նաև հաստատուն արժեքներ՝ $R = 0.2$ մմ և $\beta = 70^\circ$:



Նկ. 1. CF կցաշուրթերի դեֆորմացնող եզրերի գլխավոր երկու մոդելները՝ ա) $\alpha = 70^\circ$ դեֆորմացնող եզրով (Վիլերի մոդել), բ) $\alpha = 90^\circ$ դեֆորմացնող եզրով (CERN-ի մոդել) և գ) կցաշուրթի կտրված եռաչափ տեսքը նշված դեֆորմացնող եզրի հատվածով

Կցաշուրթերի ստանդարտ մոդելների հանգույցների լարվածադեֆորմացիոն վիճակը ուսումնասիրելիս ստացվել է, որ CERN-ի երկրաչափությունը ենթարկվում է տրոսման, դեֆորմացնող եզրի որոշակի փոքր տեղափոխությամբ դեպի վակուումի միջավայր, իսկ Վիլերի մոդելը ենթարկվում է ոչ միայն տրոսման, այլ նաև պլաստիկ ծոման, որի մասին փաստում են դրա դեֆորմացնող եզրի հիմքում առաջացած կուտակային բարձր լարումները: Ցույց է տրվել, որ CERN-ի երկրաչափության դեֆորմացնող եզրի հավելյալ 20° անկյունը հանդիսանում է որպես կոշտության կոդ, որն ապահովում է դրա ավելի բարձր կայունությունը Վիլերի մոդելի համեմատ: Ցույց

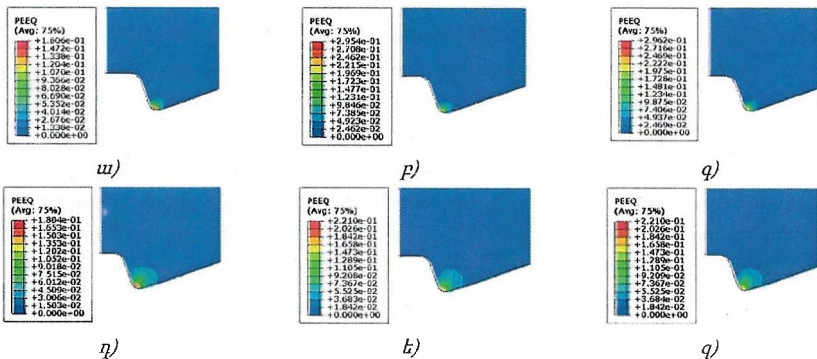
են տրվել նաև կցաշուրթերի դեֆորմացնող եզրերի պլաստիկ դեֆորմացիաների բաշխման գոտիները: Դրանց գնահատման արդյունքում մշակվել են տեխնիկական առաջարկներ, որոնք ներառում են CERN-ի մոդելի կիրառումը $r = 0.075 \dots 0.13$ մմ դեֆորմացնող եզրի ծայրի կլորացման շառավղերի միջակայքով: CERN-ի մոդելը ցանկալի է կիրառել թրծաթողված խտարար օղակներով՝ դեֆորմացնող եզրի հնարավորինս ցածր մնացորդային դեֆորմացիաների առաջացման համար: Խորհուրդ է տրվել ընտրել փոքր կլորացման շառավղեր, երբ անհրաժեշտ է ունենալ հնարավորինս բարձր հերմետիկացման մակարդակ: Եթե ԳԲՎ համակարգը ենթարկվելու է մի քանի հերմետիկացման-ապահերմետիկացման ցիկլերի, ապա ցանկալի են 0.1 մմ և դրանից ավելի, կլորացման շառավղերի արժեքները:

Այնուհետև իրականացվել է հեղուս-մանեկային միացության հաշվարկ, որի համար մոդելավորման տվյալներից դուրս է բերվել կցաշուրթերի ձգման համար անհրաժեշտ ընդհանուր ուժը: Հեղուսների հաշվարկը կատարվել է օգտագործելով դասական հեղուսների հաշվարկման բանաձևը, որտեղ հեղուսի նյութի թույլատրելի լարման փոխարեն ընտրվել է նյութի հոսունության սահմանի լարումը: Այս մոտեցումը հանդիսանում է որպես ավելի խիստ կրիտերիա, որը ձգման ընթացքում կբացառի հեղուսների պլաստիկ դեֆորմացիան: Ստացվել են հեղուս-մանեկային միացության տեխնիկական հանձնարարականներ կցաշուրթերի երկու ստանդարտ մոդելների, խտարար օղակի նյութի երկու վիճակների, երկու ամենատարածված կիրառվող հեղուսների ամրության դասերի (A2-70 և A4-80), հեղուսների քանակների (վեց և ութ) և տրամագծերի (M6 և M8) համար:

Իրականացվել են կցաշուրթերի 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 դեֆորմացնող եզրի բարձրությունը (h), խտարար օղակի վրա դեֆորմացնող եզրի շառավղային ուղղությամբ թողած հետքի երկարությունը (P) և կցաշուրթերի միջև բացակը: Փորձերի արդյունքները որակապես և քանակապես բավականին մոտ են եղել մոդելավորման տվյալներին: Հերմետիկացման բնութագրերի միջոցով ապացուցվել է կցաշուրթերի պլաստիկ դեֆորմացիայի առաջացումը, որը գրանցվել է հերմետիկացման ցիկլերի աճին զուգընթաց h -ի և P -ի աստիճանաբար նվազմամբ՝ կցաշուրթերի միջև բացակի զուգահեռ աճով: Ստացվել են խտարար օղակների նյութի երկու վիճակների համար h պարամետրի ճկուն հաշվարկման էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիաներ, որոնք թույլ են տալիս առանց բարդ ու ժամանակատար մոդելավորումների և փորձերի իրականացման բավականին արագ հաշվարկել կցաշուրթերի դեֆորմացնող եզրերի բարձրությունները կախված հերմետիկացման ցիկլերի քանակից: Էմպիրիկ ֆունկցիաները հաշվի են առնում նյութի պլաստիկ հասկությունները, առանց դրա

պլաստիկ քայքայման: Որպես սահմանափակում, տվյալ բանաձևերը նախատեսված են 304L մակնիշի շժանգոտվող պողպատի և DN35CF չափերի կցաշուրթերի հաշվարկման համար: Ձևակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր եզրակացություններ:

Չորրորդ գլուխ: Իրականացվել է ստանդարտ կցաշուրթերի հերմետիկացման ուսումնասիրությունը բարձր ջերմային գրադիենտների միջավայրում: Մոդելավորման համար նյութերի ֆիզիկամեխանիկական, առաձգական և պլաստիկ հատկություններից զտոտ տրվել են դրանց ջերմային հատկությունները: Ուսումնասիրվել է հերմետիկացման գոտու լարվածային վիճակի փոփոխությունը սենյակային 20°C -ից մինչև 300°C աճի դեպքում: Արդյունքում թրծաթողված և ամրացված խտարար օղակների դեպքերում 20°C և 300°C ջերմաստիճանների ժամանակ Միզեսի լարման առավելագույն արժեքների տարբերությունը ստացվել է համապատասխանաբար 134.9 և 20.4 ՄՊա: Այս երևույթը բացատրվել է երեք հիմնական գործոններով. ջերմային լարումներով, հավելյալ լարումների աճով, որը պայմանավորված է նյութերի ջերմային ընդարձակման շնորհիվ խտարար օղակի մեջ դեֆորմացնող եզրերի ներխուրման չափի մեծացմամբ և հանգույցի տաքացման արդյունքում հնարավոր լարումների ռելաքսացիայով: Ստացվել են կցաշուրթերի մնացորդային դեֆորմացիաների բաշխման գոտիները (նկ. 2) սենյակային ջերմաստիճանում, 300°C -ում և մինչև 20°C սառեցումից հետո:



Նկ. 2. Դեֆորմացնող եզրերի 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

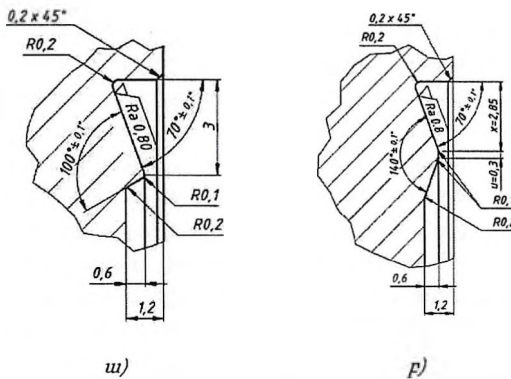
Ստացվել են, որ թրծաթողված խտարար օղակները բարձր ջերմաստիճանային գրադիենտների պայմաններում կիրառելը նպատակահարմար չէ ամրացված խտարար օղակների համեմատ: Պատճառն այն է, որ վերջինիս դեպքում

ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց նյութերի ջերմային ընդարձակման արդյունքում ոչ միայն մեծանում է դեֆորմացնող եզրերի ներխրման չափը խտարար օղակի մեջ, այլև, դրան համընթաց, տեղի է ունենում խտարար օղակի մասնակի թրծաթողում: Արդյունքում, խտարար օղակը զուգահեռ փափկում է, և դեֆորմացնող եզրը ավելի քիչ է պլաստիկ դեֆորմացվում: Վերոնշյալ երևույթը բացակայում է լիարժեք թրծաթողված խտարար օղակների դեպքում:

Իրականացվել են կցաշուրթերի ձգման փորձեր ևս մինչև չորս հերմետիկացման ցիկլերով, ջերմաստիճանի աճը իրականացվել է ԳԲՎ համակարգերի համար նախատեսված հատուկ տաքացնող ժապավենի միջոցով, որի ջերմաստիճանը բարձրացվել է լարման կարգավորիչով, իսկ ջերմաստիճանի վերահսկումը իրականացվել է K-տեսակի թերմոզույգերի և դրանց TPM1 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 մետաղագրաֆիկական 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 (դեֆորմացնող եզրի բարձրությունը նվազում է մոտավորապես 0.1 մմ-ով), սակայն զագի ներհոսքի խիստ վերահսկման դեպքում: Տվյալ տեխնիկական հանձնարարականները ստացվել են կցաշուրթերի՝ մինչև 300°C տաքացման դեպքում դեֆորմացնող եզրերի բարձրության հաշվարկման էմպիրիկ մոտարկված ֆունկցիայի շտրիհով: Վերջինս ստացվել է թրծաթողված խտարար օղակների համար, իսկ ամրացված խտարար օղակների դեպքում անհրաժեշտ են հետագա հավելյալ ուսումնասիրություններ: Ձևակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր եզրակացություններ:

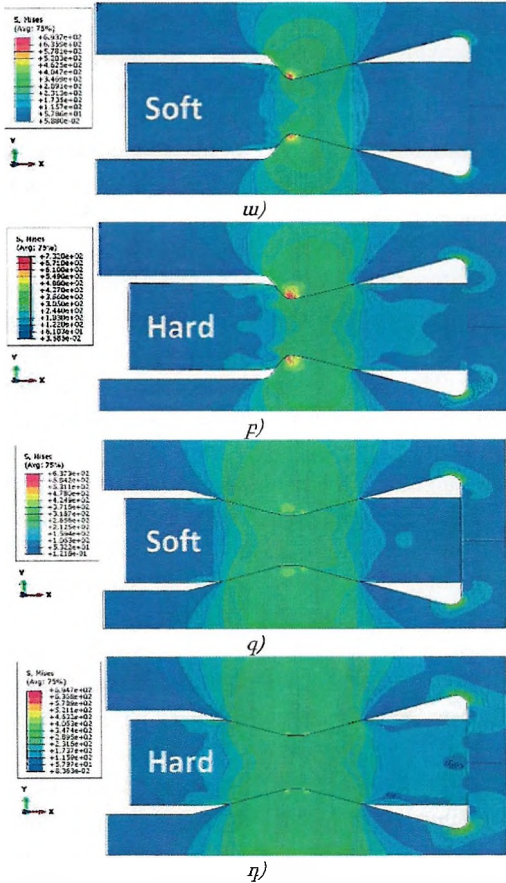
Հինգերորդ գլուխ: Իրականացվել են բազմաքանակ մոդելավորումներ, փոփոխելով առկա ստանդարտ երկրաչափության որոշ բնութագրեր ($\alpha = 90 \dots 140^\circ$; $\beta = 60 \dots 80^\circ$)՝ հնարավոր օպտիմալ տարբերակը որոշելու համար: Որպես գնահատման կրիտերիա ընտրվել է դեֆորմացնող եզրերի առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիան: Ձուգահեռ մշակվել են դեֆորմացնող եզրերի նոր տեսակի երկրաչափություններ, առաջինը՝ արիքաձև երկրաչափությունն է, երկրորդը՝ CHE-մոդելը: Առաջին տարբերակը բացառվել է, որովհետև մոդելավորման արդյունքում ակնհայտ է դարձել, որ հերմետիկացման արդյունքում դեֆորմացնող եզրի և խտարար օղակի միջև փակ սին ծավալ է մնում, որը բացասաբար է ազդում վակուումի վրա: Երկրորդ CHE-մոդելը ստացվել է, որպես հիմք վերցնելով գայլիկոնի երկրաչափությունը, որտեղ երկու կտրող եզրերի միջև առկա է փոքր միջակապ, որն

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



Նկ. 3. Մշակված կցաշուրթերի CANDLE-մոդելների հերմետիկացման գոտիները ԳԲՎ համակարգերի 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), հետազոտվել են մշակված մոդելների պլաստիկ դեֆորմացիաները 100% հերմետիկացման դեպքում: Կատարվել է հեղուկ-մանեկային միացության հաշվարկ, որի համար մոդելավորման տվյալներից դուրս են բերվել կցաշուրթերի ձգման համար անհրաժեշտ ընդհանուր ուժերը: Հաշվարկների հիման վրա մշակվել են նոր մոդելների հեղուկ-մանեկային միացության տեխնիկական հանձնարարականներ:



Նկ. 4. Տոն Միգելսի լարման բաշխման գոտիները կցաշուրթերի CANDLE-մոդելներում 100% հերմետիկացման դեպքում, որտեղ a , b) $\alpha = 100^\circ$; $\beta = 70^\circ$ նոր CF մոդելն է, իսկ g , d) CHE-մոդելը, երբ կիրառվում են թրծաթողված (a , g) և ամրացված (b , d) խտարար օղակներ

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

համար, որի շնորհիվ ստացվել են նոր կցաշուրթերի փաստացի առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիաները: Մոդելավորման միջոցով ուսումնասիրվել են նաև խտարար օղակների հերմետիկացման հատվածում առաջացող առավելագույն Միգեսի լարումները, որոնք համեմատվել են ստանդարտ կցաշուրթերի մոդելավորման արդյունքների հետ՝ ԳԲՎ հերմետիկության ստուգման համար: Ստացված լարվածային վիճակը լիովին ապացուցել է մշակված նոր մոդելների ԳԲՎ հերմետիկացման ապահովումը:

Ստանդարտ CF և նոր CANDLE-մոդելների զագանցիկության գնահատման համար մետաղազրաֆիկական մանրադիտակով ուսումնասիրվել են դրանց *P* բնութագրերը, որի արդյունքում նոր մշակած CANDLE-մոդելները ապահովել են *P*-ի բավականին բարձր արժեք, համեմատած ստանդարտ CF կցաշուրթերի հետ: *P*-ի ավելի բարձր արժեքը մեծացնում է հերմետիկացման գոտում մթնոլորտային գազի զագանցիկության համար անհրաժեշտ ճանապարհը, հետևաբար ստացվում է ավելի ցածր զագանցիկություն:

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 °C, իսկ չափող գլխույկի ճշտությունը՝ 0.2 մկմ: ԿՉՄ-ի միջոցով սքանավորվել են կցաշուրթերի 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 ± 0.2 մկմ: Նոր CF երկրաչափության դեպքում համապատասխան տարբերությունը կազմում է $0.312 \pm 0.033\%$, այսինքն մոտ 1.87 ± 0.2 մկմ: Այսպիսով՝ ապացուցվել է նոր մշակված CANDLE-մոդելների երկրաչափությունների ավելի բարձր կայունությունը, հուսալիությունն ու երկարակեցությունը համեմատած ստանդարտ CF կցաշուրթերի հետ: Ձևակերպվել են գլխի վերաբերյալ ընդհանուր եզրակացություններ:

ՀՐԱՏԱՐԱԿԿԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

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>.

Albert Davtyan

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 $\frac{1}{4}$ 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, $\frac{1}{4}$ 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.

Давтян Альберт Арутюнович

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 SHE-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.

