

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

Իսունց Համլետ Արայիկի

Արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող մասնիկների փնջերի արտանցման
պատուհանների ստացման նոր տեխնոլոգիայի մշակում

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)

Hamlet Isunts

Development of a new technology for manufacturing particle beam output windows in accelerator
technology

SYNOPSIS

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

YEREVAN - 2026

տեննախառնության թեման հաստատված է ՔԵՆԴԼ պինքրոտրոնային հետազոտությունների
ստիտուտի գիտական խորհուրդում:

իտական ղեկավար

լին. գիտ. դոկտոր

աշտոնական ընդդիմախոսներ

լին. գիտ. դոկտոր

լին. գիտ. դոկտոր

տաջատար կազմակերպություն

տեննախառնության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. մայիս 7-ին ժամը 12:00-ին ԱԱԳԼ-

մ գործող ԲԿԳԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհուրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան

ղբայրների փ. 2):

տեննախառնությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:

Երմազիրն առաքված է 2026թ. ապրիլի 7-ին:

անագիտական խորհրդի գիտական բարտոլդար

իզ. մաթ. գիտ. դոկտոր

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

institute.

Scientific Supervisor:

ector of tech. sciences

Official Opponents:

ector of tech. sciences

ector of tech. sciences

Reading Organization:

he defence will take place on the 7th of May, 2026, at 12:00 during the "Physics" professional council's

ession of HESC 024 acting within AANL (2 Alikhanyan Brothers str., 0036, Yerevan).

he dissertation is available at the AANL library.

he synopsis is sent out on the 7th of April, 2026.

Scientific Secretary of the Special Council:

ector of ph-math. sciences

ԱՇԽԱՏԱՏՄԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Տարրական մասնիկների արագացուցիչների արտանցման պատուհանները առանցքային դեր ունեն արագացուցչային տեխնիկայում: Ժամանակակից արագացուցիչներում էլեկտրոնային փնջերի դուրս բերումը վակուումից դեպի մթնոլորտ կամ գազային միջավայր կատարվում է արտանցման պատուհանների միջոցով: Մոկորաբար արտանցման պատուհանները բարդացած են լինում մետաղաթաղանիթ, երկու իրարից տարբեր կցաշարքերից և խառաբ օղակից: Կարող են հանգուցում մասնակցել նաև այլ միջանցիկ դետալներ: Պարզեցնելով հանգուցը կարելի է առել որ այն իրենից ներկայացնում է բարակ թաղանթ ամրացված խողովակաշարքերին, և որի միջով անցնում է էլեկտրոնային փունջը: Այս հանգուցի նյութերը մեծ կարևորություն ունեն, քանի որ կախված հանգուցի կազմությունից և ընտրված նյութերից կարող են փոփոխվել ստացվելիք փնջի բնութագրերը և վակուումային հերմետիկության աստիճանը: Այսօր ավելի շատ օգտագործվում են տիտանի թաղանթից պատրաստված արտանցման պատուհանները, քանի որ այդ մետաղը ունի ավելի բարձր ամրություն և հուսալիություն, ինչպես նաև դիմացկունություն և թափանցելիություն էլեկտրոնային փնջերի նկատմամբ: Ինչպես նաև տիտանն մետաղաթաղանթը օժտված է բարձր էլեկտրաթափանցելիությամբ, համեմատած այլուրից և բերելիումի թիթեղների, որոնք տարածում են գտել արտանցման պատուհանների պատրաստման ժամանակ:

Տարրական մասնիկների արագացուցիչները հանդիսանում են բարդ սարքավորումներ և նրանք միավորում են գիտության և տեխնիկայի բազմալիք բնագավառներ. ռադիոհաճախական համակարգեր, մագնիսական համակարգեր, վակուումային համակարգեր, ջերմակարգավորման համակարգեր, ճառագայթային ախտորոշման տեխնոլոգիաներ և այլն: Բոլոր համակարգերի և ենթահամակարգերի միայն արդյունավետ համադրությունն է հնարավորություն տալիս կառավարել արագացուցիչը և ստանալ ցանկալի արդյունք: Հստ տարրական մասնիկների արագացուցիչների ենթոբյեկտների, արտանցման պատուհանների մետաղաթաղանթների բնութագրերը (կոմք, հաստություն, տրամագիծ և այլն) տարբեր են: Մասնավորապես ՔԵՆԴԼ ԱՇԽ-ում շահագործվող ԱՐԵԱԼ գծային էլեկտրոնային արագացուցիչը մինչև 5 ՄԷՎ էներգիայով արագացուցիչ է, որի համար առանցքային է արտանցման պատուհանի հանգուցը:

Առավել հատկանշական են մետաղաթաղանթի երկու բնութագրերը. հաստությունը և դիմացկունությունը գերբարձր վակուումին: Ինչպես բարակ է մետաղաթաղանթը, այնքան քիչ են իր միջով անցնող փնջի բնութագրերի կորուստները: Բայց ինչպան բարակ է մետաղաթաղանթը, այնքան մեծ է վերջինիս խզման

ՓՈՒՈՒՂԵՐ ԻՆՅՈՒՍԵՔՐԳ ԲՆՈՒՄ
ԵՌԱՅԵՐԿՈՒՄ ԳՐԱԿԱՆ
109/3 23.04.2026թ.

Hrachya Marukyan

պատան) հավանականությունը: Կարելի է ասել, որ այս երկու բնութագրերը զգալիորեն են:

Տրտան մետաղաթաղանթները և CF կցաշտրթային հանգույցները լայնորեն հիմնարկում են, սակայն դրանց վարքը մեխանիկական և վակուումային գրեթեությունների պայմաններում պահանջում է մանրակրկիտ ուսումնասիրություն: Բարանցման պատուհանի խափանումը կարող է հանգեցնել վակուումի կորստի և վակուումային ֆիհնասական կորուստների սարքավորումների կանգի պատճառով: Ենթադրյալ, արտանցման պատուհանների համակարգչային և փորձարարական ամակարգված հետազոտությունը չափազանց արդիական է արագացուցիչների ուսուսուսի և արդյունավետ շահագործումն ապահովելու համար:

Շտրթային նպատակ և խնդիրները

Շտրթային նպատակն է իրականացնել համակարգչային և փորձարարական հետազոտություններ արագացուցչային արտանցման պատուհանների համար: Հետազոտության արանցքային նպատակներն են.

- ուսումնասիրել արագացուցիչներում կիրառվող արտանցման պատուհանները, դրանց բաղկացուցիչ մասերը, կիրառվող նյութերը և երկրաչափությունները,
- համակարգչային մեթոդով հետազոտել արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի նյութը և հաստությունը,
- հետազոտել մետաղաթաղանթի խտարար օդակից առաջ և հետո տեղակայման տարբերակները,
- ըստ ընտրված նախնական տվյալների իրականացնել արտանցման պատուհանի հանգույցի համակարգչային մոդելավորումներ, հաշվի առնելով հանգույցի և հերմետիկացման, և պոմպահանման գործընթացները: Մոդելավորումներն իրականացնել հանգույցի բոլոր մասերը ընդունելով որպես դեֆորմացվող,
- համակարգչային հետազոտությունների հիման վրա փորձարարական եղանակով իրականացնել առավել նախընտրելի արտանցման պատուհանի հանգույցի փորձարկումներ,
- ուսումնասիրել փորձարկումից առաջ, ընթացքում և հետո, հանգույցի դետալները:

Խնդիրները

Շտրթային իր բնույթով լուծում է արագացուցչային և, առհասարակ, վակուումային տեխնիկայում ծառայած մի շարք խնդիրներ: Համակարգչային և փորձարարական մեթոդով առաջին անգամ

- վերլուծվել և հաստատվել է արագացուցչային արտանցման պատուհանների բաղկացուցիչ մասերը, վերջիններիս երկրաչափությունները, նյութը և ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները: Կազմվել է արագացուցիչներում կիրառվող մետաղաթաղանթների ընդհանուր բնութագրերի արդյունակ, որի միջոցով հաստատվել են ինչ-ինչ բնութագրերի բացակայությունը,
- ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի հանգույցը լարվածադեֆորմացիոն վիճակի (ԼԴԿ) տեսանկյունից,
- CAE ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (UOՄ) մոդելավորվել է տարբեր հաստությամբ տիտանի առաջին և երկրորդ դասի մետաղաթաղանթների ԼԴԿ-ը:
- CAE ՄՕՄ-ում հանգույցի բոլոր դետալները դիտարկվել են որպես դեֆորմացվող, ՄՕՄ-ում մոդելավորվել է արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը,
- տարբերակվել է մետաղաթաղանթի երկու դիրքով տեղակայված արտանցման պատուհանները,
- համակարգչային և փորձարարական մեթոդներով հետազոտվել են արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի երկու դիրքերը (խտարար օդակից առաջ և հետո),
- գերձգրիտ չափումների միջոցով ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթի վարքը հերմետիկացման և պոմպահանման գործընթացներում,
- իրականացվել է համակարգչային և փորձարարական հետազոտությունների համեմատական վերլուծություն,
- գերձգրիտ սարքավորման միջոցով սքանավորվել է հանգույցում մասնակցող չորս դեֆորմացող եզրերը,
- մշակվել է նոր և պարզ երկրաչափությամբ կցաշտրթ արտանցման պատուհանի համար:

Կիրառական նշանակությունը

Ատենախոսական աշխատանքում ներկայացված վերլուծական, համակարգչային և փորձարարական արդյունքներն ունեն բավականին լայն կիրառական բնույթ: Ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել արագացուցչային տեխնիկայում, վակուումային համակարգերում, ցանկացած բնագավառում, որտեղ կիրառվում են բարակ թաղանթներ և այլն: Մասնավորապես՝

- ստացված արդյունքները կարող են կիրառվել ՄԷՎ-երի տիրույթի (փոքր եներգիաների) արագացուցիչներում,
- ատենախոսության մեջ ներկայացված արդյունքները կարող են կիրառվել ՔԵՆՂԼ ՄՀԻ-ում գործող ԱՐԵԱԼ գծային էլեկտրոնային արագացուցիչի վրա,

- առաջին գլխի հետազոտությունների հիման վրա կարելի է հստակ արտանցման պատուհաններ կազմել ավելի լայն տիրույթով էներգիաների արագացուցիչների համար,
- առաջին և երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթների վերլուծությունները արված են այնպիսի ձևաչափով, որ ստացված արդյունքները կարելի է կիրառել ինչպես արագացուցչային տեխնիկայում, այնպես էլ այլ բնագավառներում, որտեղ օգտագործվում են տիտանե բարակ մետաղաթաղանթներ:

Ատենախառնության հիմնական դրույթները

Հիմնական դրույթներն են.

1. Ժամանակակից ՄԻՎ-երի հասնող արագացուցիչներում որպես արտանցման պատուհանի մոդել նախընտրելի է 50 մկմ հաստությամբ, երկրորդ դասի տիտանի մետաղաթաղանթով, CF կցաշտրթ(եր)ով (ATLAS-ի փոխարեն), և ¼ ամրացված թթվածնազրկված պրինձից խտարար օղակով հանգույցը:
2. Նոր մշակված մոդելների դեպքում հանգույցին մասնակցող լրացուցիչ մեքենանստերը հենարան-ցանց, 2-րդ մետաղաթաղանթ, 2-րդ խտարար օղակ և հովացման համակարգ, անհրաժեշտ չեն:
3. Խտարար օղակից հետո տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում հանգույցը առավել կայուն է: Խտարար օղակից առաջ տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում CF կցաշտրթով հերմետիկացումը չի ապահովում անհրաժեշտ կայունություն:
4. Խտարար օղակից առաջ տեղակայված մետաղաթաղանթի դեպքում անհրաժեշտ է նոր կերկրաչափությամբ դեֆորմացնող եզրով կցաշտրթ:

Դրապարակումներ և գիտաժողովներ

Ատենախառնությունը հիմնված է հինգ հրապարակումների վրա, որոնցից երկուսը «Scimago Journal & Country Ranking (SJR)» պարբերականից են, ընդգրկված մտնում են «Scopus» և «Web of Science» միջազգային գիտական հանդեսների ցուցակում): Դրապարակումներից երկուսը պատկանում են ՀՀ ԲՈՒԿ-ի ցանկին պատկանող ռոպվածների ժողովածուներում: Վերջին հրապարակումը սպագրվել է գիտաժողովի խմբով: Հարվածների ցանկը ավելի մանրամասն ներկայացված է վերջում:

Ստորև ներկայացված են ատենախառնությանը նվիրված գիտաժողովների վեց ասանկցությունները, որոնցից երկուսը միջազգային են:

1. Հ.Ս. Բումնց, Ա.Հ. Դավթյան, Վ.Շ. Ավագյան // Արագացուցչի ելքային պատուհանի առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթի ամրության

գնահատումը / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2022

2. Հ. Բումնց // Արտանցման պատուհանների բաղադրիչներին տրվող պահանջները արագացուցչային տեխնիկայում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան 90-ամյա հոբելյանին նվիրված տարեկան գիտաժողով / 2023

3. H. A. Isunts, V. Sh. Avagyan, A. I. Azizov, A. H. Grigoryan, A. S. Vardanyan, A. H. Davtyan // Stress-strain state analysis of the first-grade titanium foil of the accelerator output window in a static state / 15th international particle accelerator conference (IPAC'24) / 2024

4. Hamlet Isunts // Stress-strain research of the accelerator output windows with mechanical connection / The 4th International Workshop on "Ultrafast Beams and Applications" / 2024

5. Հ.Ս. Բումնց, Ա.Հ. Դավթյան, Վ.Շ. Ավագյան // Մեխանիկական միացմամբ արագացուցչային արտանցման պատուհանների փորձարկումը CAE ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2024

6. Հ. Բումնց, Վ.Եփրեմյան, Ա. Դավթյան // Արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող Ti Gr2 մետաղաթաղանթի ամրության գնահատումը ABAQUS ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում / Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան տարեկան գիտաժողով / 2025

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՄՍ նախարարության Բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի աջակցությամբ (գիտական նախագիծ № 23AA-ZD015): Թեմայի շրջանակներում ստացված արդյունքները ներկայացվել և քննարկվել են Գերմանիայի Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY հետազոտական կենտրոնի վակուումային և ինժեներական խմբերի ղեկավարների հետ, 15-օրյա գործուղման ընթացքում: Արդյունքները ներկայացվել են «Հայ-գերմանական ուսանողական դապրնթացներ 2025»-ի և «Հայ-գերմանական ուսանողական դապրնթացներ 2025»-ի ուսանողներին, «Վակուումային տեխնոլոգիաներն արագացուցիչներում» դասընթացների շրջանակներում:

Ատենախառնության կառուցվածքը և ծավալը

Ատենախառնությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլուխներից և 111 ամուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 116 էջ, պարունակում է 46 նկար և 4 աղյուսակ: Ատենախառնության գլուխներն են.

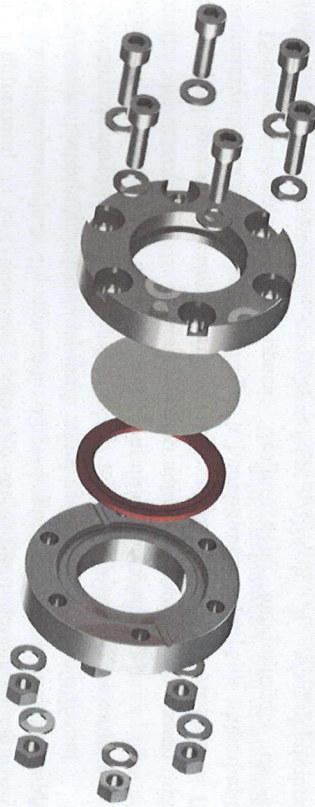
- Գլուխ 1.** Արագացուցչային արտանցման պատուհանները, նրանց դետալները և նախընտրելի նյութերը

- Գլուխ 2. Առաջին և երկրորդ դասի տիտանե մետաղաթաղանթներ
- Գլուխ 3. Սարքավորումներ և մեքենաներ
- Գլուխ 4. «Նստարար օղակից հետո և առաջ» տեղակայմամբ արտանցման պատուհաններ

Աշխատանքի համառոտ բովանդակություն

Ներածության մեջ ներկայացված է արտանցման պատուհանը, նրա սազմությունը և առավել վտանգավոր գոտիները: Որպես օրինակ բերվում է «ԱՐՇԱՒ» ծային էլեկտրոնային արագացուցիչը և վերջինում արտանցման պատուհանի դերը: Կլնուհետև ներկայացված է ատենախոսության թեմայի արդիականությունը, նրա պատակն ու խնդիրները, արդյունքների նորությունը և արդյունքների կիրառական շահանկությունը: Հաջորդիվ ներկայացված է բոլոր 4 գլուխերի հակիրճ նութագրությունները:

Առաջին գլուխ: Վերլուծվում է արագացուցչային արտանցման պատուհանի անգույցի առանձին դետալները, քննարկվում դետալների հավանական սարքերակները, նյութերը և երկրաչափությունները: Այ. 1-ում պատկերված է արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը:



Այ. 1. Արագացուցչային արտանցման պատուհանի հանգույցը

Ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի հավաքման եղանակները, բանդվող և չբանդվող միացությունների ձևով): Դիտարկվել է մետաղաթաղանթի ստարար օղակից առաջ և հետո տեղադրման դեպքերը: Այս գլուխը իր մեջ ներառում ուսումնասիրություններ տարբեր արտանցման պատուհանների վերաբերյալ, որոնք ինչ այսօր կան գրականության մեջ: Մշակվել է բնդիանուր աղյուսակ, որը երկայացնում է արտանցման պատուհանում կիրառվող մետաղաթաղանթի

ներկայիս վեճակը չարփերը, հենարան ցանցի առկայությունը (առկայության դեպքում նյութը), փնջի ենթեղման և ենթեղման կորուստը:

Քննարկվել է վակուումային հերմետիկության ապահովումը: Քսնի որ պատուհանի հանգույցները կարող են հավաքվել տարբեր տեխնոլոգիաներով՝ մեխանիկական հերմետիկացում, վակուումային դիֆուզիոն միացում կամ գոռում, յուրաքանչյուր մեթոդ պետք է նախագծվի այնպես, որ ապահովի վակուումային վիճակ՝ հաշվի առնելով տվյալ տեխնոլոգիայի մեխանիկական և ջերմային սահմանափակումները:

Կատարված վերլուծությունների հիման վրա ձևակերպվել են հետևյալ եզրակացությունները:

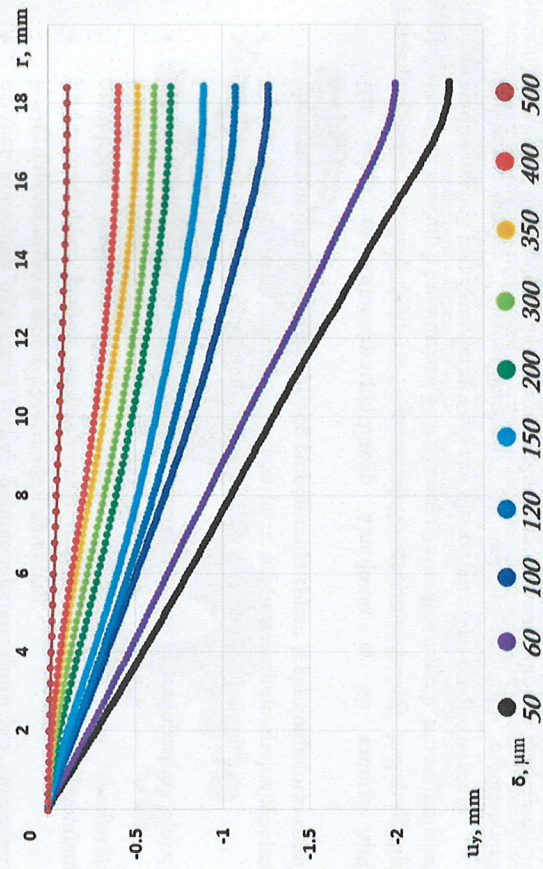
- KF տիպի կցաշարքերը չեն ապահովում անհրաժեշտ վակուումային խտություն, նախընտրելի են CF տիպի կցաշարքերը, բացառությամբ մշտական բարձր ջերմաստիճանային միացումների դեպքերի,
- տիտանի կիրառումը կցաշարքերի պատրաստման համար տնտեսապես նպատակահարմար չէ,
- 304 և 304L տեսակի չժանգոտվող պողպատները տնտեսապես շահավետ են, թեև մեխանիկական առումով զիջում են 316 կամ 316L տեսակներին,
- ռետինե խտարար օղակները բարձր ջերմաստիճաններում չեն կատարում իրենց գործառույթը և պետք է խուսափել դրանցից,
- թթվածնազրկված բարձր հարորունակությամբ պրնձե (OFHC) խտարար օղակները նախընտրելի են, սակայն պահանջում են լրացուցիչ փորձարկումներ,
- պետք է ուսումնասիրվեն ինչպես փափուկ, այնպես էլ սովորական պրնձե խտարար օղակները,
- 1-ին դասի տիտանը կիրառելի է միայն ցածր ենթեղման դեպքում,
- 2-րդ և 5-րդ դասերի տիտանը խորհուրդ է տրվում բարձր պահանջներով կիրառությունների համար իրենց բարձր ամրության և ջերմակայունության շնորհիվ:

Այս գլխի ուսումնասիրությունները ձևակերպել է են ամուր հիմք արագացուցչային համակարգերում արտանցման պատուհանների հանգույցների օպտիմալացման համար և նպաստում են ծախսարդյունավետության, հուսալիության և արդյունավետության բարձրացմանը տարբեր միացման տեխնոլոգիաներում:

Երկրորդ գլուխ: Ուսումնասիրվել են արագացուցչային արտանցման պատուհաններում կիրառվող մետաղաթաղանթի ամրության գնահատման ամրության առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթի ամրության գնահատման համար, փոփոխական բնութագիր ընտրելով մետաղաթաղանթի հաստությունը: Վերջինիցս կախված կատարվել է մոդելավորումներ ABAQUS UOՄ-ում վերջավոր տարրերի մեթոդով (ԿՏՄ): Ստատիկ վիճակում ուսումնասիրվել են 50...500 մլմ

իջակալարի 10 հաստությունների մետաղաթաղանթների ճնշման սարքերությունից առաջացած գոգավորության պլաստիկ դեֆորմացիաների, շառավղային և շրջանային արտումների բաշխվածությունները, տեղափոխությունները: Ներմուծվել են տիտանի մետաղաթաղանթի հիմնական չափերը՝ հաստությունը, արտմագիծը: Որպես նշումն ընդունվել է գրու: Մետաղաթաղանթները բաժանվել են մեծ թվով անգույնների, որով ապահովվել են մոդելավորումների մեծ ճշտությունները: Ընդլայնվածությունների արդյունքում կառուցվել են Y առանցքի նկատմամբ էտաղաթաղանթի ընտրված կետերի տեղափոխությունների գրաֆիկները՝ կախված առավելի մեծություններից, և մետաղաթաղանթի դեֆորմացիաների ինտենսիվության աշխատան կորերը, որոնք ևս վերլուծվել են:

ՎՏՄ-ով վերլուծությունից ստացված մոդելավորման արդյունքները երկայացվել են թաղանթի ամրացված հատվածից մինչև կենտրոնական գոտին: Քանի որ թաղանթը գոգավորություն է ստանում դեպի վակուումի կողմը, և այդ կողմի անգույններն ունեն առավելագույն տեղաշարժեր, նպատակահարմար է լարվածա-դեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների արժեքները դիտարկել հենց այդ կողմից: Վերը շված հանգույցների համար ստացվել են հետևյալ արդյունքները (նկ. 2):



Նկ. 2. Ընտրված հանգույցների տեղափոխությունները Y առանցքի նկատմամբ՝ կախված շառավղի արժեքներից

Արտանցման պատուհանի մետաղաթաղանթն ուսումնասիրվել է այնպես, որ մոդելավորումների արդյունքները կիրառելի լինեն արտանցման պատուհանների և՛ մեխանիկական միացման, և՛ դիֆուզիոն միացման դեպքերում:

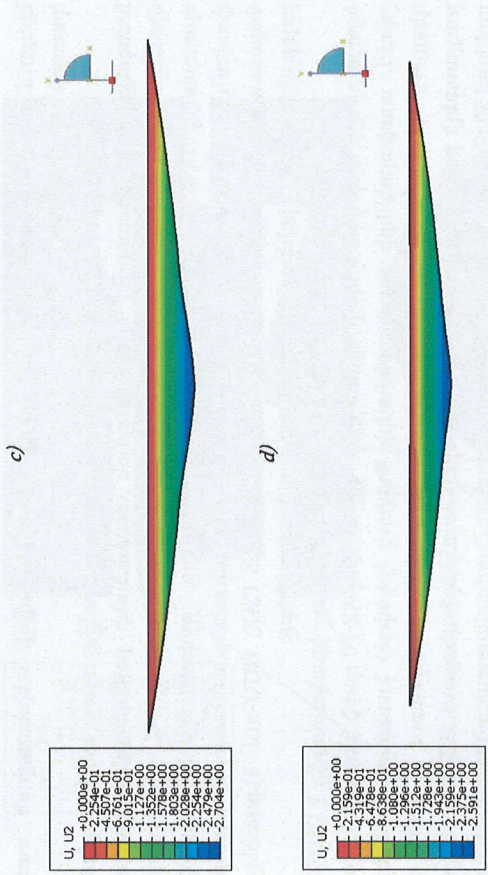
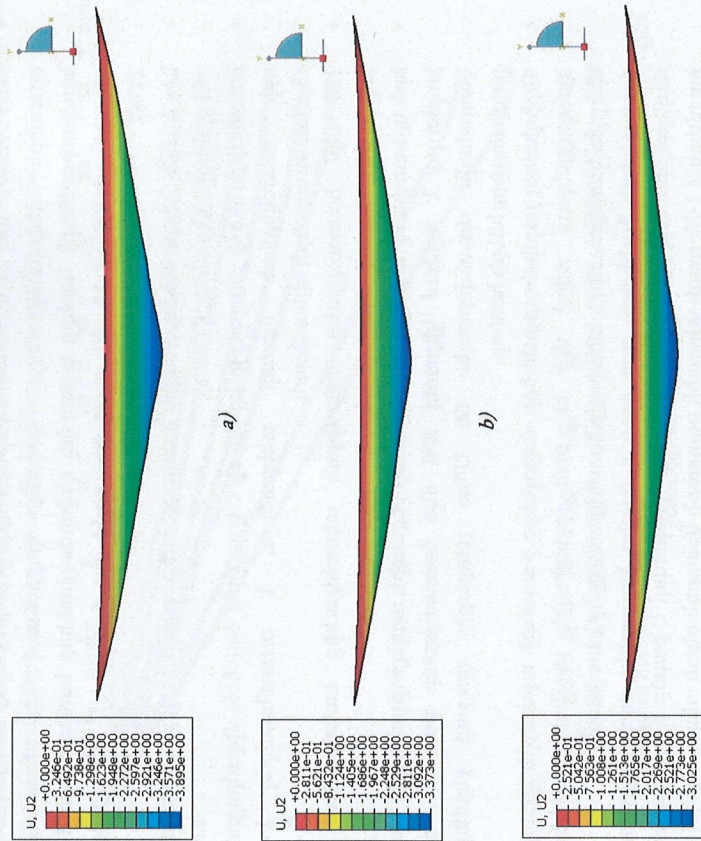
Արդյունքների հիման վրա ստացվել է ֆունկցիա, որը հնարավորություն է տալիս ճշգրիտ հաշվարկել 1-ին դասի տիտանե թաղանթի կենտրոնի տեղաշարժը՝ կախված դրա հաստությունից:

Ուսումնասիրելով արագացուցչային արտանցման պատուհանների առաջին դասի տիտանե մետաղաթաղանթների լարվածադեֆորմացիոն վիճակը ստացվել են.

- 50...500 մկմ հաստությունների դեպքում դեֆորմացված վիճակներում մետաղաթաղանթների հաստությունների ձևերը, որպես դրանց հանգույցների տեղափոխության կորեր,
- 60...100 մկմ միջակայքում գոյություն ունի մետաղաթաղանթի հաստության մի ճա արժեք, որից սկսած, վակուումի կողմից, σ : և σ լարումները ընդունում են բացասական արժեքներ, այսինքն $\delta > \delta_x$ դեպքում մետաղաթաղանթը հենարանում ենթարկվում է ծռման,
- δ_x հաստությունից սկսված մետաղաթաղանթի կենտրոնական հանգույցների պլաստիկ դեֆորմացիաները կարող փաթրանում են, իսկ $\delta < \delta_x$ հաստությունների համար պլաստիկ դեֆորմացիաները համեմատած $\delta > \delta_x$ դեպքին, ընդունում են մեծ արժեքներ (օրինակ՝ $(\epsilon_i^{100 \text{ մկմ}} / \epsilon_i^{60 \text{ մկմ}}) \cdot 100\% \approx 27\%$),
- երբ $\delta \leq \delta_x$, այս հենարանային հանգույցներում առկա են չնչին պլաստիկ դեֆորմացիաներ (0,56...0,001%),
- հաստությունների ընտրությունը պետք է կատարել $\delta_{\text{min}} < \delta < \delta_x$ միջակայքում, որի հստակեցման համար անհրաժեշտ է ուսումնասիրել նաև մետաղաթաղանթի դինամիկան,
- 150 մկմ հաստությունը ամրության տեսանկյունից հանդիսանում է նպատակահարմար ընտրություն,
- եթե պատուհանը ենթարկվելու է բարձր ջերմային ազդեցությունների, ապա խորհուրդ է տրվում կիրառել 300 մկմ հաստությամբ թաղանթ, որը կապահովի մոտավորապես 66 ՄՊա լրացուցիչ պաշար ջերմային լարվածությունների համար,
- մերիդիոնալ լարվածությունների մոդուլները թաղանթի արտաքին եզրային հանգույցներում ավելի մեծ են, քան շրջագծային լարվածությունները, մինչդեռ կենտրոնական հանգույցներում դրանք գրեթե հավասար են,
- մոտարկված ֆունկցիա, որը թույլ է տալիս խուսափել ժամանակատար մոդելավորումներից: Դրա օգնությամբ հնարավոր է բարձր ճշգրտությամբ հաշվարկել 1-ին դասի տիտանե թաղանթի կենտրոնական տեղաշարժը (մմ-երով) տարբեր հաստությունների (մկմ-ներով) դեպքում:

Այս գլխում նաև ուսումնասիրություններ են կատարվել արագացուցչային արտանման պատմահաններում կիրառվող բարակ Ti Gr-2 տիտանե թաղանթների արքի հետազոտությանը՝ ABAQUS UOՍ-ում իրականացված ՎՏՍ-ի միջոցով: Աերուծվել են 20-ից 50 մկմ հաստությամբ թաղանթներ՝ մթադրտային ճնշման ազդեցությամբ, երբ հակառակ կողմում վակուում է: Մոդելավորման ընթացքում նախատվել են համարժեք պլաստիկ դեֆորմացիաները, լարվածությունների աղադրիչները և γ առանցքով տեղաշարժերը: Արդյունքները ցույց են տվել, որ առավելագույն պլաստիկ դեֆորմացիան առաջանում է թաղանթի կենտրոնական առավածում, մինչդեռ ամրացման գոտում դիտվում են դեպի կենտրոն կողմի ուղղությամբ: Եղաշարժերը մեծանում են դեպի կենտրոն՝ վակուումային կողմի ուղղությամբ: Նապցված բաշխումների հիման վրա որոշվել են կրիտիկական հաստություններ, որոնք կանխում են թաղանթի խզումը և ապահովում են հուսալի մեխանիկական շշխատանք միաժամանակ պահպանելով փնջի օպտիմալ բնութագրերը:

Այլ 3-ում ներկայացված են Y առանցքի նկատմամբ երկրորդ դասի տիտանե ետաղաթաղանթի տեղափոխությունների բաշխման գոտիները ($u_y = UZ$):



Այլ 3. Տեղափոխությունը Y առանցքի ուղղությամբ երբ մետաղաթաղանթ ունի 30 մկմ (a), 36 մկմ (b), 40 մկմ (c), 46 մկմ (d) և 50 մկմ (e) հաստություններ

Ելքային գույն: Ներկայացվել են հիմնական գործիքակազմը և սարքավորումները, որոնց միջոցով իրականացվել է հետազոտության փորձարարական մասը: Ներկայացվել են սարքավորումների առանցքային բնութագրերը:

Սարքավորումներն են՝ Hexagon Leitz Reference 5.4.3 չափումների մեքենան, տուրք-մոլեկուլային պոմպ կայանքը և IMG-300 ԳԲՎ ինվերտորային մագնետրոնային տվիչը իր կառավարման բլոկով:

Hexagon Leitz Reference 5.4.3 վերահսկիչ-չափիչ մեքենան նախատեսված է դետալի կամ հանգույցի վերաբերյալ երկրաչափական տեղեկություններ ստանալու համար: Մեքենան թույլ է տալիս իրականացնել տարբեր բարդության սարքերի երկրաչափական բնութագրերի օպերատիվ և գերճշգրիտ չափումներ: Մարքը ունի նաև սքանավորման հնարավորություն:

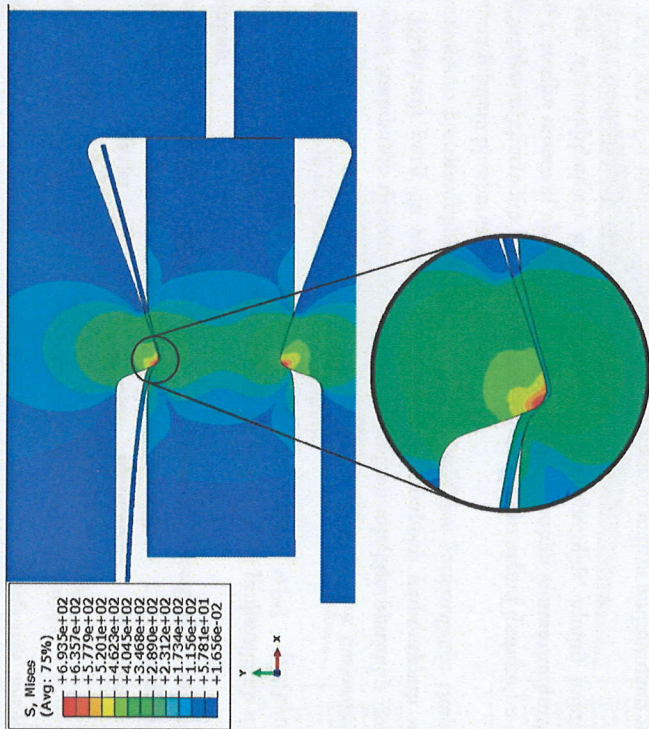
Տարբերակուլային պոմպ կայանքը իր գաբարիտներով կոնպակտ պոմպ է, որը թույլ է տալիս ստանալ մինչև 10^{-9} մԲար ճնշում: Կայանքը պատունակում է երկու տիպի՝ չոր մեխանիկական և տուրբոմոլեկուլային պոմպեր, որոնց համադրումը ապահովում է հստակագրի՝ մինչև գերբարձր վակուումը:

IMG-300 ԳԲՎ ինվերտորային մագնետրոնային տվիչը սովորաբար չափում է մետաղապայես 10^{-2} -ից մինչև 10^{-10} - 10^{-11} մԲար տիրույթի ճնշում: Մարքի աշխատանքի

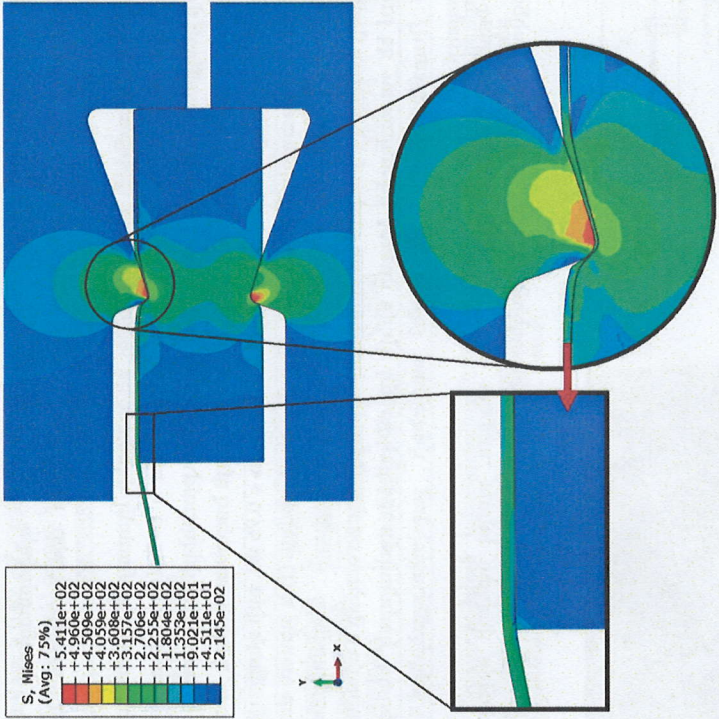
հիմքում ընկած է ինվերտորային մագնետրոնային սովիչի սեկնարդիցան՝ սառը կատոդի իսկիզագիսն:

Չորրորդ գլուխ: Հիմք ընդունելով «խտարար օդակից հետո» տեղակայմամբ հանգույցը ուսումնասիրվել է արտանցման պատուհանի լարվածային-ֆորմացիոն վիճակը: Որպես հիմնական դետալներ հանդես են եկել՝ SS 304L չմանցուվող պողպատից DN35CF մակնիշի երկու կցաշարերը, թվածանգրկված պղնձից փափուկ և 1/4 կոշտ խտարար օդակները և երկրորդ դասի տիտան մետաղաթաղակները: Փորձերն իրականացվել են SIMULLA 2019 (ABAQUS CAE) ՍՄՍ-ում՝ ներմուծելով բոլոր դետալների ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները:

Մոդելավորման առաջին (հերմետիկացման) փուլը իրականացվել է DN35CF կցաշարերի սեղմման փորձի հիման վրա՝ կիրառելով A2-70 դասի հեղուսներ (չոր շփում, տափօդակների օգտագործմամբ): Փափուկ (թրծված) խտարար օդակների դեպքում սեղմման արդյունքում կցաշարերի միջև առաջանում է 0.295 մմ թույլատրելի բացվածք, իսկ 1/4-կոշտ խտարար օդակների դեպքում՝ 0.344 մմ: Հաշվի առնելով 50 մկմ հաստությամբ մետաղաթաղանթը, համապատասխան բացվածքները կազմում են համապատասխանաբար 0.345 մմ և 0.394 մմ:



ա)



բ)

Նկ. 4. Միգձեմ լարումների բաշխվածության գոտիները 1/4 կոշտ խտարար օդակի դեպքում առաջին (ա) և երկրորդ (բ) փուլերում

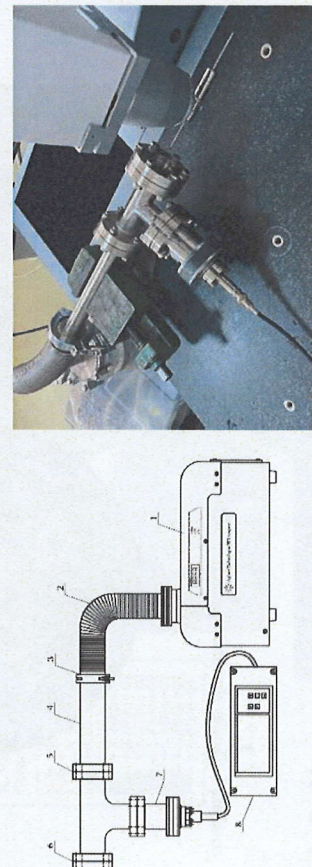
Երկրորդ (պունյահանման) փուլն իրականացվել է մթնոլորտային ճնշման (մոտավորապես 0.101325 ՄՊա) պայմաններում, որն ազդել է մետաղաթաղանթի մի կողմում, իսկ մյուս կողմում (վակուումի կողմ) ճնշումը ընդունվել է 0 ՄՊա: Դիտարկելով, որ արագացուցչային վակուումային համակարգերում պահանջվում է գերբարձր վակուումի պայմաններ (մոտավորապես 10^{-10} մԲար/լ), դիտարկվել է 0 ՄՊա: Այս երկու փուլերը մոդելավորումների տեսքով ներկայացված է նկ. 4-ում, որտեղ նկ. 4ա-ն հերմետիկացման փուլն է, նկ. 4բ-ն՝ պունյահանման:

Մոդելավորման ընթացքում պարզվել է, որ կցաշարերի սեղմման փուլում հերմետիկացման գոտում Միգձեմ լարվածությունները բաշխմամբ և մեծությամբ գրեթե նման են: Մակայն վակուումային պունյահանումից հետո թաղանթի հերմետիկացման գոտում տեղի է ունենում լարվածությունների եսկան թուլացում, և

լարվածությունների բաշխումը տարբերվում է «դեֆորմացնող եզր – մետաղաթաղանթ» և «դեֆորմացնող եզր – խտաբար օղակ» փոխադրեցության գոտիներում:

Մոելավորումներն իրականացվել են տարբեր կտրացման շառավիղեր ($r_1=0$ մմ, $r_2=0.25$ մմ, $r_3=0.5$ մմ, $r_4=0.75$ մմ, $r_5=1$ մմ, $r_6=1.5$ մմ և $r_7=2$ մմ) ունեցող խտաբար օղակների դեպքում: Պարզվել է, որ Միզեպի լարվածությունների բաշխման պատկերը ընդհանուր առմամբ նման է բոլոր դեպքերում: Մակայն հայտնաբերվել է շառավղերի միջակայք $r = r_6 - r_7$, որտեղ $0 < r_6 \leq 0.25$ մմ և 0.5 մմ $\leq r_7 < 0.75$ մմ, որի դեպքում տեղի է ունենում մետաղաթաղանթի խզում: Այդ միջակայքում շփման (f) և շփման մակերեսի (S) հավասարակշռությունը, ինչպես նաև դեֆորմացիայի սկզբնական փոքր տրամագիծը սահմանափակում են մետաղաթաղանթի ազատ ծռումը և միաժամանակ մեծացնում են շառավղային ձգումը մինչև կրիտիկական մակարդակ՝ հանձնելով խզման: Ուսումնասիրվել են նաև թաղանթի լարվածությունները խզման գործընթացում:

Փորձերն իրականացվել են հինք անգամ, պարզ ստենդի միջոցով, որը ներկայացված է նկ. 5-ում: Որպես էլակետային կտրացման շառավղի ընտրվել է $r_1=0$ մմ-ը:



Նկ. 5. Փորձարարական ստենդի սխեմատիկ և ռեալ տեսքը

Փորձարարական արդյունքները, ստացված չափումների մեքենայի սկանավորմամբ, ցույց են տվել, որ նույնիսկ տասը պրոնիսանման ցիկլերից հետո թաղանթի պրոֆիլում էական շեղումներ չեն արձանագրվել. առավելագույն տարբերությունը կազմել է ընդամենը 3 մկմ: Այս կայունությունը հաստատում է թաղանթի ամրությունն ու հուսալիությունը: Թաղանթի կենտրոնական միջին տեղաշարժը կազմել է մտասվորապես 0.9859 ± 0.0002 մմ:

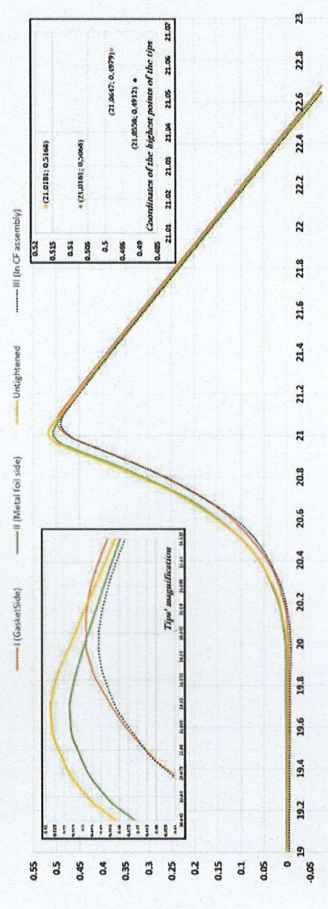
Բացի այդ, մոդելավորման և փորձարարական արդյունքների համեմատության հիման վրա որոշվել է, որ շփման գործակիցները պետք է գտնվեն $0.48 < f < 0.6$ միջակայքում «մետաղաթաղանթ – դեֆորմացնող եզր» (Ti Gr 2 և SS 304L)

զույգի համար և $0.62 < f < 0.8$ միջակայքում «մետաղաթաղանթ – խտաբար օղակ» (Ti Gr 2 և OFHC պրինձ) զույգի համար:

Նկ. 1. Կցաշարքերի մակերևույթների չափված երկրաչափական բնութագրերը

Կցաշարքի տեսակը	Ներքին մակերևույթ		Գլանական մակերևույթ	
	Խտաբար օղակի կտրվ	Շերտմը հարթությունից (մմ)	Տրամագիծ (մմ)	Չկը (մմ)
Չձգված		0.0009	48.3108	0.0016
I	Արտանցման պատուհանի հանգույց	0.0203	48.4018	0.0099
II	Մետաղաթաղանթի կտրվ	0.0028	30.1574	0.0006
III	CF հանգույց	0.0153	23.9050	0.0047

Օգտագործված կցաշարքերը նոր նշանակմամբ իրենց մակերևույթների բնութագրերով ներկայացված են աղ. 1-ում, իսկ դեֆորմացնող եզրերի պրոնիսությունները ներկայացված են նկ. 6-ում:



Նկ. 6. Դեֆորմացնող եզրի սրանավորումները I, II, III և չձգված կցաշարքերի դեպքում

Ուսումնասիրվել է նաև «խտաբար օղակից առաջ» տեղակայմամբ հանգույցը, որի դեպքում սշակվել են հինք երկրաչափություններ կցաշարքի այն գոտու համար, որտեղ հեկվում է մետաղաթաղանթը: Վերջավոր տարրերի մոդելավորումները ցույց են տվել, որ առանցքային կցաշարքերի երկրաչափությունների կիրառումը հանգեցնում է տիտան թաղանթի խզման, ընդ որում խզումը սկսվում է վակուումի կողմից: Այս խնդիրը լուծելու նպատակով սշակվել և վերածվել են վակուումային կողմի կցաշարքերի մի շարք փոփոխված երկրաչափություններ: Ուսումնասիրված տարբերակները G3 (Նկ. 7) երկրաչափությունը՝ կլորացված դանակային եզրով և

առանց հենման գոտու, ցուցաբերել է առավել նպաստավոր լարվածությունների բաշխում: Այդ երկրաչափությունը զգալիորեն նվազեցրել է Միզեպի լարումները դեֆորմացիոն եզրի շրջանում՝ համեմատած ստանդարտ կցաշտրթերի հետ, սահմանափակել է կցաշտրթի պլաստիկ դեֆորմացիան և նվազեցրել է թաղանթի կենտրոնական տեղաշարժը:

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

1. Г.А. Исунц // Выходные окна в ускорительной технологии / Вестник НПУА Механика, Машиноведение, Машиностроение, 2024, 1, 9-28.
2. H. Isunts, A. Davtyan, V. Avagyan // Overview of accelerator output windows, their parts and preferred materials / Journal of Instrumentation, 2025, 20 (09), T09002.
3. H. ISUNTS, A. DAVTYAN, V. AVAGYAN // Deformed state's simulation of the first-grade titanium foil of the accelerator output window / Proceedings of the RA NAS and NPUA, 2023, 76, 269-278.
4. H. Isunts, V. Avagyan, A. Azizov, A. Grigoryan, A. Vardanyan, A. Davtyan // Stress-strain state analysis of the first-grade titanium foil of the accelerator output window in a static state / 15th International Particle Accelerator Conference (IPAC'24), 2024, 1538-1541.
5. H. Isunts, A. Davtyan, V. Yepremyan, A. Hovhannisyanyan, A. Grigoryan, A. Vardanyan, V. Avagyan // The analysis and experimental research of the output windows with foil above-gasket positioning in accelerator technology / Vacuum, 2025, 243, 114830.

Development of a new technology for manufacturing particle beam output windows in accelerator technology

SUMMARY

This work presents a comprehensive and systematic investigation of titanium foil accelerator output windows and their implementation in ConFlat (CF) flange assemblies, combining advanced finite element modeling with targeted experimental validation. The primary focus of the research was to understand the stress-strain state, deformation behavior, and sealing performance of first and second-grade titanium foils subjected to mechanical loading during flange tightening and vacuum pumping, as well as to identify design parameters that ensure reliable long-term operation in accelerator and ultra-high-vacuum (UHV) systems.

The sealing behavior of titanium foils in CF flange assemblies was investigated using a combined experimental-numerical approach that accounted for flange tightening, vacuum pumping, and frictional interactions. The results demonstrated that although stress distributions during flange tightening are relatively similar across the sealing zone, vacuum pumping leads to substantial stress relaxation and redistribution, particularly in the regions of contact between the knife edge, foil, and gasket.

Experimental measurements, including high-precision coordinate measurements of flange flatness and foil deflection profiles, confirmed the validity of the numerical models. The results showed excellent repeatability and stability of the foil deformation behavior, even after multiple vacuum pumping cycles, thereby demonstrating the mechanical durability and reliability of the proposed designs. The comparison between simulations and experiments also enabled the identification of realistic friction coefficient ranges for the relevant material pairs, improving the accuracy and predictive capability of the numerical models.

Overall, the results obtained in this dissertation establish a solid scientific and engineering basis for the design of titanium foil accelerator output windows and CF flange assemblies. The findings offer practical design guidelines and validated modeling approaches that can be directly applied to future upgrades of the AREAL linear accelerator and extended to similar accelerator and vacuum systems at other research facilities.

Разработка новой технологии изготовления выходных окон пучка частиц в ускорительной технике

РЕЗЮМЕ

В работе представлено всестороннее и систематическое исследование ускорительных выходных окон с титановыми фольгами и их применения в узлах с фланцами типа ConFlat (CF) с использованием современных методов конечных элементов и целенаправленной экспериментальной валидации. Основное внимание уделено изучению напряжённо-деформированного состояния, деформационного поведения и герметизирующих свойств титановых фольг 1-го и 2-го классов при механических нагрузках, возникающих при затяжке фланцев и вакуумной откачке, а также определению конструктивных параметров, обеспечивающих надёжную и долговременную эксплуатацию в ускорительных и сверхвысоковакуумных системах.

Герметизирующее поведение титановых фольг в узлах с CF-фланцами исследовано с использованием комбинированного экспериментально-численного подхода с учётом затяжки фланцев, вакуумной откачки и трения в контактных зонах. Показано, что хотя распределение напряжений в зоне герметизации при затяжке фланцев является относительно схожим, вакуумная откачка приводит к существенной релаксации и перераспределению напряжений, особенно в областях контакта «режущая кромка – фольга» и «режущая кромка – уплотнительное кольцо».

Экспериментальные измерения, включая высокоточные координатные измерения плоскостности фланцев и профилей прогиба фольги, подтвердили достоверность численных моделей. Результаты продемонстрировали высокую воспроизводимость и стабильность деформационного поведения фольги даже после многократных циклов вакуумной откачки, что свидетельствует о механической прочности и надёжности предложенных конструкций. Сравнение расчётных и экспериментальных данных позволило определить реалистичные диапазоны коэффициентов трения для соответствующих пар материалов, повысив точность и прогностические возможности численных моделей.

В целом полученные в диссертации результаты формируют прочную научную и инженерную основу для проектирования ускорительных выходных окон с титановыми фольгами и CF-фланцевых узлов. Представленные выводы и методики могут быть непосредственно использованы при модернизации линейного ускорителя AREAL, а также применены в аналогичных ускорительных и вакуумных системах других научно-исследовательских центров.