

«Քենդլ» ՍԻՆԹԵՐՆԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Վահե Դանիելյան Ալեքսանդրի

Բարձր էֆեկտիվությամբ արագացնող կառուցվածքների
ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը

Ատենախոսություն

Ա.04.20 «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ

Տեխնիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի համար

Գիտական ղեկավար՝

Տեխնիկական գիտությունների դոկտոր Վարդան Շ. Ավագյան

Երևան 2017

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ	4
ԳԼՈՒԽ 1. ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԱԿՆԱՐԿ.....	10
1.1 AREAL էլեկտրոնների գծային արագացուցիչ	11
1.2 Պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման եղանակներ	19
1.3 Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման չափանիշները և մեթոդները.....	23
1.4 Հետազոտության խնդրի ձևակերպում.....	27
ԳԼՈՒԽ 2. ՆՅՈՒԹԵՐ և ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐ	29
2.1 Հետազոտությունների համար օգտագործվող մետաղների բնութագրերը	29
2.2 Հետազոտվող նյութերի մշակման տեխնոլոգիաները.....	38
2.3 Նյութերի կառուցվածքների հետազոտման մեթոդները	46
2.4 Հետազոտությունների կատարման համար օգտագործվող սարքավորումները....	49
ԳԼՈՒԽ 3. ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ և ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ.....	64
3.1 Հեղուկ ֆազայում միացումների ստացման հետազոտություններ	64
3.2 Cu-Ag միացման զոնայի միկրոստրուկտուրային հետազոտություններ.....	74
3.3 Փորձարարական հետազոտությունների գնահատականը չժանգոտվող պողպատի և պղնձի զոդման ժամանակ.....	81
3.4 Արագացուցչային տեխնիկայում ճշգրիտ դետալների դիրքավորման խնդիրները	86
ԳԼՈՒԽ 4. ԱՐԱԳԱՑՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՊԱՏՐԱՍՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ԱՆՀՐԱԺԵՇՏ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ և ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ, ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ՈՒ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒՄ	90

4.1 Ջերմային դաշտի փոխանցման հաշվարկն ու մոդելավորումն արագացնող կառուցվածքների տաքացման ժամանակ.....	90
4.2 Արագացնող կառուցվածքների վակուումային ինդուկցիոն զոդում.....	95
4.3 Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման որակի վերահսկում.....	104
4.4 Միամոդային երկշերտ (պղինձ-գերմանիում) արագացնող կառուցվածքի փորձարարական հետազոտություններ	115
ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ	123
ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ.....	125

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Լիցքավորված մասնիկների փունջ ստանալու համար օգտագործում են հատուկ սարքավորումներ, որոնք կոչվում են արագացուցիչներ: Մասնիկների կինետիկ էներգիայի մեծացումը արագացուցիչում տեղի է ունենում նրանց վրա էլեկտրական դաշտերի ազդեցության արդյունքում: Դրա համար արագացվել կարող են միայն լիցքավորված մասնիկները: Արագացուցչային տեխնիկայում, որպես լիցքավորված մասնիկների էներգիայի չափման միավոր օգտագործում են միջազգային՝ էլեկտրոն վոլտ (էՎ) միավորը: Հիմնականում, արագացնում են էլեկտրոնները, պրոտոնները, դեյտրոնները, α -մասնիկները և ծանր իոնները:

Լիցքավորված մասնիկների ճշգրիտ փնջերի ստացումը ժամանակակից արարագացուցիչներում, ֆիզիկայի հիմնարար և կիրառական հերազոտությունների համար համարվում է կարևոր և արդիական ուղղություն [1,2]: Լիցքավորված մասնիկների նախագծային պարամետրերին (մասնիկի էներգիա, փնջի փուլային ծավալ, փնջի կայունության և այլն) հասնելու համար արագացուցիչներում պահանջվում են նոր կոնստրուկտիվ և տեխնոլոգիական լուծումներ՝ նաև նրանց տարբեր հանգույցների պատրաստման համար (արագացվող կառուցվածք, վակուումային խցիկ փնջերի տեղափոխման համար և այլն): Նշված հանգույցների պատրաստմանը ներկայացվում են բարձր պահանջներ՝ մեխանիկական ամրություն, մակերևույթի մաքրություն, վակուումային հերմետիկություն, էլեկտրահաղորդականություն, ջերմակայունություն և այլն:

Լիցքավորված մասնիկների արագացուցիչները օգտագործվում են նաև որպես հզոր ճառագայթման աղբյուրներ [3]: Դրա համար ցանկացած տիպի արագացուցչի նախագծման ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել ճառագայթման անվտանգությունը, ինչպես տվյալ սարքավորումը սպասարկող անձնակազմի համար, այնպես էլ այդ սարքավորումը ընդգրկող փորձարարական սարքավորումների համար, որոնց նորմալ աշխատանքը խախտվում է ռենտգենյան ճառագայթման ազդեցությունից: Ռենտգենյան ճառագայթների ազդեցություններից խուսափելու համար, որպես պաշտպանիչներ օգտագործում են բետոն, կապար, ավազ և այլ հատուկ տեսակի մեկուսիչ նյութեր: Պաշտպանիչ շերտերի հաստությունը կախված է

արագացվող փնջի էներգիայից և ինտենսիվությունից, և դրանց մեծացումից մեծանում է նաև այդ պաշտպանիչ շերտերի հաստությունը [4]: Մեծ բարդություն է իրենից ներկայացնում բարձր էներգիայով արագացուցիչների ճառագայթումից պաշտպանությունը: Դրա համար մեծ էներգիայով արագացուցիչները տեղադրում են գետնի մակերևույթից ցածր՝ թունելների մեջ:

Լիցքավորված մասնիկների արագացուցիչները տարբերում են ըստ իրենց կոնստրուկցիաների, նշանակության, լիցքավորված մասնիկների տեսակների, նրանց մաքսիմալ էներգիայի և այլ բնութագրերի: Պայմանականորեն լիցքավորված մասնիկների արագացուցիչները տարաբաժանում են ըստ լիցքավորված մասնիկների հետազդերի ձևի և արագացման սկզբունքի:

Ըստ լիցքավորված մասնիկների հետազդի ձևի արագացուցիչները բաժանում են գծային և ցիկլիկ արագացուցիչների: Գծային արագացուցիչների դեպքում լիցքավորված մասնիկների հետազդերը մաքսիմալ մոտեցված են ուղիղ գծի: Ցիկլիկ արագացուցիչների դեպքում լիցքավորված մասնիկները լայնակի մագնիսական դաշտերի (որոնք ժամանակի ընթացքում կարող են լինել հաստատուն, կամ, փոփոխական) ազդեցության ներքո շարժվում են ուղեծրով, որը մոտ է շրջանագծին:

Ըստ արագացման սկզբունքի և արագացվող էլեկտրական դաշտի բնութագրի արագացուցիչները ենթաբաժանվում են բարձրվոլտային, ինդուկցիոն, ռեզոնանսային արագացուցիչների:

Լիցքավորված մասնիկները, անցնելով արագացնող կառուցվածքներով, բարձր լարվածության ազդեցության պայմաններում ստանում են մեծ էներգիա: Որպեսզի փնջի մասնիկների և էներգիայի կորուստ տեղի չունենա, անհրաժեշտ է, որ արագացնող կառուցվածքներում առկա լինի գերբարձր վակուում: Կախված արագացուցիչի էներգիայից, ինչպես նաև լիցքավորված մասնիկների տեսակից, տարբեր պահանջներ են ներկայացվում խցիկներում վակուումի մակարդակին: Որքան արագացուցչի էներգիան բարձր է, այնքան բարձր վակուում է պահանջվում ստանալ արագացնող կառուցվածքներում [5]:

Ներկայումս նկատվում է արագացուցչային տեխնիկայի բուռն զարգացում, որի

արդյունքում նախագծվում և պատրաստվում են ցածր էներգիայով էլեկտրոնների արագացուցիչներ: Վերջիններս լայնորեն կիրառվում են գերարագ պրոցեսների հետազոտության համար, և նրանք հիմնականում աշխատում են ֆոտոկաթոդի միջոցով՝ լազերային գրգռման եղանակով: Բավական է նշել այդ արագացուցիչներից մի քանիսը՝

- REAGAE գծային արագացուցիչ՝ պատրաստված DESY գերմանական ինստիտուտի շրջանակներում [6], որը ծառայում է որպես էլեկտրոնների աղբյուր 2-5 ՄԷՎ էներգիայով, գերարագ էլեկտրոնային դիֆրակցիայի հետազոտություններում:
- VELA(Versatile Electron linear Accelerator), որը որոշ ժամանակ առաջ հայտնի է եղել որպես EBTF(Electron Beam Test Facility), և որն էլ գտվում է Անգլիայի STFC լաբորատորիայում: Նշված արագացուցիչ էլեկտրոնները գեներացվում են Ti-Sapph լազերով, իսկ նրա էներգիան հավասար է 6 ՄԷՎ-ի, և այն հիմնականում օգտագործվում է երկու հետազոտական կայաններում՝ գիտական և արտադրական [7]:
- AREAL(Advanced Research Electron Accelerator Laboratory) գծային արագացուցիչը, որն աշխատում է ԳԲՀ թնդանոթով և էլեկտրոնների գեներացիան տեղի է ունենում լազերային գրգռման միջոցով: Այս արագացուցիչի միջոցով հնարավոր է ստանալ 2-5 ՄԷՎ էներգիայով էլեկտրոնային փունջ: Այս գծային արագացուցիչը նախատեսված է կենսաբանության և նյութագիտության բնագավառներում կիրառելու համար: Ինչպես նաև հարկ է նշել, որ այս արագացուցիչի էներգիան մոտ ապագայում պետք է բարձրացվի մինչև 50 ՄԷՎ [8,9]:

Ժամանակակից հետազոտություններում կան բազմաթիվ խնդիրներ, որոնց հետազոտության և լուծման համար ցածր էներգիաներով արագացուցիչների պահանջարկը բավականին մեծ է: Արդյունքում անհրաժեշտություն կա նաև այդ արագացուցիչների տարատեսակ հանգույցների պատրաստման ժամանակակից տեխնոլոգիական լուծումներ՝ մասնավորապես, հետազոտությունների բավականին լայն շրջանակ կա պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման ոլորտում:

Դասական պղնձե արագացնող կառուցվածքների հետ մեկտեղ ներկայումս բուռն զարգացում է ապրում նոր տիպի արագացնող կառուցվածքների ստեղծումը: Նրանց շարքին է դասվում «CANDLE» գիտահետազոտական ինստիտուտում նախագծված մետաղական երկշերտ կլոր արագացնող կառուցվածքը: Այս արագացնող կառուցվածքը իրենից ներկայացնում է պղնձե կլոր ալիքատար, որի ներքին մակերևույթին պետք է նստեցված լինի գերմանիումի բարակ շերտ: Արդյունքում, բավականին լուրջ հետազոտությունների շրջանակ է բացվում վերը նշված պղնձե ալիքատարի ներքին մակերևույթին գերմանիումի մոտ 1մկմ հաստությամբ համասեռ շերտի ստացման տեխնոլոգիայի մշակման, ինչպես նաև համապատասխան սարքավորումների նախագծման և պատրաստման համար [10,11]:

Վերը նշված խնդիրների լուծումը պահանջում է պղնձե դետալների միացման նոր մոտեցումներ, որոնք կօգտագործվեն արագացնող կառուցվածքների պատրաստման տեխնոլոգիաների մշակման համար: Ինչպես նաև հարկ է նշել, որ ժամանակակից արագացուցչային տեխնիկայի զարգացմանը համընթաց խստանում են նրա հանգույցների նախագծման և պատրաստման տեխնոլոգիաների պահանջները: Նախկինում մշակված վակուումային զոդման և եռակցման մեթոդները չեն կարող ամբողջությամբ ապահովել այդ պահանջները: Անհրաժեշտություն է առաջացել ուսումնասիրել զոդման եղանակ, որը կբարելավի միացման որակը հանգույցներում:

Աշխատանքի նպատակը.

Պղնձե և միամոդային երկշերտ(պղինձ-գերմանիում) արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար անհրաժեշտ տեխնոլոգիաների մշակումը և համապատասխան սարքավորումների նախագծումն ու պատրաստումը:

Ատենախոսական աշխատանքի հիմնական խնդիրները

1. Արագացնող կառուցվածքների պղնձե դետալների ճշգրիտ մշակման տեխնոլոգիայի կազմումը, ապահովելով այդ դետալների արդյունավետ հովացում և տաշեղների հեռացում մշակման գործընթացի ընթացքում:
2. Պղնձե դետալների ջերմային դեֆորմացիաների հետազոտությունը հաշվարկային և փորձարարական մեթոդներով այն դեպքում, երբ նրանք

դիրքավորված են երրորդ էլեմենտով՝ տեխնոլոգիական բույթով(ատիփ): Ինչպես նաև շատ կարևոր է տեխնոլոգիական բույթի նյութի ընտրությունը, որը պետք է ունենա պղնձին հնարավորինս մոտ ջերմային ընդարձակման գործակից, և համապատասխան կոնստրուկցիայի մշակումը:

3. Վակուումում պղնձե դետալների զոդման տեխնոլոգիական գործընթացի մշակումը, որի մեջ են մտնում հետևյալները՝

- Փորձարարական արդյունքների միջոցով պղնձե դետալների միջև եղած զոդանյութի բացակի օպտիմալ չափի որոշումը, որն անհրաժեշտ է զոդանյութի հոսքի համար:
- Պղնձե դետալների ներքին մակերևույթների օպտիմալ հեռավորության որոշումը զոդանյութի բացակի եզրային կետից:

4. Նոր տեխնոլոգիական սարքավորման նախագծում և պատրաստում, որի միջոցով հնարավոր կլինի իրականացնել պղնձե դետալների վակուումային զոդում:

5. Պղնձե փորձանմուշների վրա ցածր հաղորդականություն ունեցող մետաղի ծածկույթապատման տեխնոլոգիայի մշակումը, որը կօգտագործվի միամոդային երկշերտ ալիքատարի պատրաստման համար: Ինչպես նաև փորձարարական սարքավորման(ռեզոնատոր) նախագծումն ու պատրաստումը, որի միջոցով հնարավոր կլինի համեմատել միամոդային երկշերտ ալիքատարի ռեզոնանսային հաճախականությունների հաշվարկային և փորձարարական տվյալները:

Գիտական նորույթը.

1. Հետազոտությունների արդյունքում ակնհայտ դարձավ, որ պղնձե դետալների մեխանիկական մշակման ժամանակ անհրաժեշտություն կա կիրառել լրացուցիչ մեթոդներ, որոնք կնպաստեն դետալների արդյունավետ սառեցմանը և տաշեղների հեռացմանը մշակման գոտուց:

2. Սահմանված է արագացնող կառուցվածքների դետալների դիրքավորման չափանիշները:

3. Նախագծված և պատրաստված վակուումային զոդման նոր տեխնոլոգիական սարքավորումը, որի միջոցով հնարավոր է իրականացնել պղնձե արագացնող կառուցվածքների վակուումային զոդում: Այս սարքավորման միջոցով վակուումային

զողման գործընթացի ժամանակ հնարավոր է դառնում հաշվի առնել ջերմային դաշտի տեղափոխումը համապատասխան պղնձի ջերմահաղորդականությանը, ինչպես նաև գործընթացի ողջ ընթացքի ժամանակ հնարավոր է դառնում փոփոխել դետալների վրա նախապես կիրառված ճնշումը:

Պաշտպանությանը ներկայացվում է՝

1. Արագացնող կառուցվածքների դետալների ճշգրիտ մշակման տեխնոլոգիայի կազմումը նոր մեթոդների կիրառմամբ, որոնց շնորհիվ հնարավոր է իրականացնել այդ դետալների արդյունավետ հովացում և տաշեղների հեռացում մշակման գոտուց:
2. Արագացնող կառուցվածքների էլեմենտների ջերմային դեֆորմացիաների հետազոտության արդյունքները այն դեպքում, երբ այդ էլեմենտները դիրքավորված են մեկը մյուսի նկատմամբ տեխնոլոգիական երրորդ էլեմենտով:
3. Պղնձե արագացնող կառուցվածքների վակուումային զողման նոր տեխնոլոգիական սարքավորման նախագծումն ու պատրաստումը, որի միջոցով հնարավոր է պահպանել զողման գործընթացի ժամանակ հավասարազոր պայմաններ(ճնշում, ինչպես նաև ջերմային դաշտի տեղափոխման համաձայնեցումը պղնձի ջերմահաղորդականության հետ) կառուցվածքի յուրաքանչյուր զողման գոտում:
4. Միամողային երկշերտ ալիքատարի ռեզոնանսային հատկությունների փորձարարական հետազոտությունները:

Գործնական նշանակությունը՝

Ատենախոսությունում մշակվել են նոր տեխնոլոգիական պրոցեսներ, ինչպես նաև նախագծվել ու պատրաստվել են տարատեսակ սարքավորումներ և հանգույցներ, որոնք կարող են օգտագործվել արագացուցչային տեխնիկայում: Վերը նշված արդյունքները կիրառվում են նաև «AREAL» գծային արագացուցիչում:

Ատենախոսության փորձահավանություն՝

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները ներկայացվել են «ՔԵՆԴԼ» ՍՀԻ

գիտական սեմինարներում, ինչպես նաև հետևյալ միջազգային գիտաժողովներում՝

1. International conference «Advanced materials and technologies», 21-30 October 2015 Tbilisi, Georgia:
2. International conference «Current Problems of Chemical Physics», 5-9 October 2015, Yerevan, Armenia:

Ատենախոսության մեջ ներառված գիտական աշխատությունները՝

Ատենախոսության արդյունքները տպագրված են 9 գիտական աշխատություններում, ընդ որում նրանցից 1-ը գյուտի արտոնագիր է:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը՝

Ատենախոսությունը կազմված է ներածությունից, չորս գլուխներից, գրականության ցանկից՝ 94 անվանում: Ատենախոսությունը ներկայացված է 132 էջերում, որոնց մեջ են ներառված 75 նկարներ և 14 աղյուսակներ:

ԳԼՈՒԽ 1. ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԱԿՆԱՐԿ

1.1 AREAL Էլեկտրոնների գծային արագացուցիչ

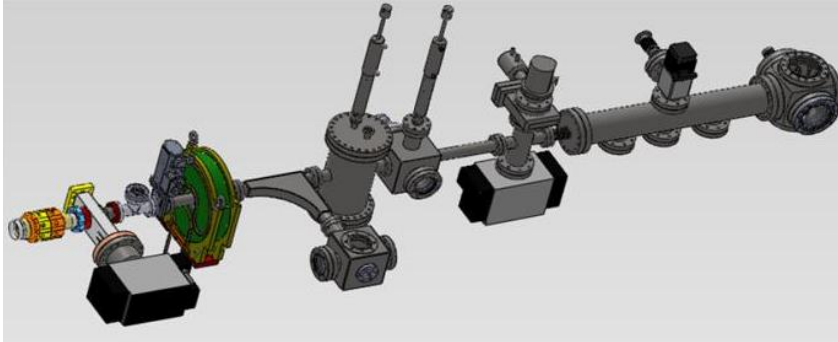
«AREAL»-ը դա 20 ՄէՎ լազերով կառավարվող ԳԲՀ գծային արագացուցիչ է, որը կառուցվում է CANDLE սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտում [12]: Որպես նախագծի առաջին փուլ կառուցվել է ֆոտոկաթոդով ԳԲՀ թնդանոթ, որը ապահովում է 5 ՄէՎ փոքր էմիտանսով, 100 պԿ լիցքով և 0.5-ից մինչև 8 պվրկ երկարության փոփոխման հնարավորությամբ էլեկտրոնային փունջ: «AREAL» գծային արագացուցիչը լայնորեն կարող է կիրառվել առաջավոր փորձարարական ուսումնասիրությունների համար՝ արագացուցչային տեխնիկայում և գերարագ պրոցեսների բնագավառներում: «AREAL» գծային արագացուցչի գլխավոր առանձնահատկություններն են փնջի պարամետրերի փոփոխության հնարավորության լայն տիրույթը և մեքենայի ստաբիլ աշխատանքը այդ տիրույթում: Վերջիններս ցուցադրվեցին 2014թ.-ի մայիսին [13]՝ արագացուցչի ուսումնասիրությանը և փնջի պարամետրերի չափումներին հատկացված ժամանակահատվածում: Արագացուցչի լազերային համակարգը ի վիճակի է կատարել զուգահեռ փորձեր ֆոտոնային ճառագայթման օգտագործման և էլեկտրոնների գեներացիա: «AREAL» գծային արագացուցչի հիմնական պարամետրերը ներկայացված են Աղյուսակ 1.1-ում:

Աղյուսակ 1.1

Պարամետրեր	Միաթանձրուկ	Բազմաթանձրուկ
Փնջի էներգիա	<5 ՄէՎ	<5 ՄէՎ
Թանձրուկի երկարություն	0.4 - 9պվրկ	0.4պվրկ
Փնջի տրամագիծ (ֆոտոկաթոդի մոտ)	4մմ	4մմ
Փնջի լիցք	>200պԿ	<15պԿ
Էմիտանս	<0.35 մմ-մոադ	<0.35 մմ-մոադ

Երկու աշխատանքային ռեժիմները, բազմա և միաթանձրուկային, 0-50 Հց նոմինալ իմպուլսային հաճախականությամբ, ընդարձակում են «AREAL»-ի փորձարարական հնարավորությունները: Կախված փորձարարական պահանջներից՝

համակարգը հեշտ և արագ հնարավոր է կարգավորել որոշակի տիրույթում աշխատելու համար: «AREAL»-ի սխեմայի առաջին փուլը ներկայացված է նկար 1.1-ում:



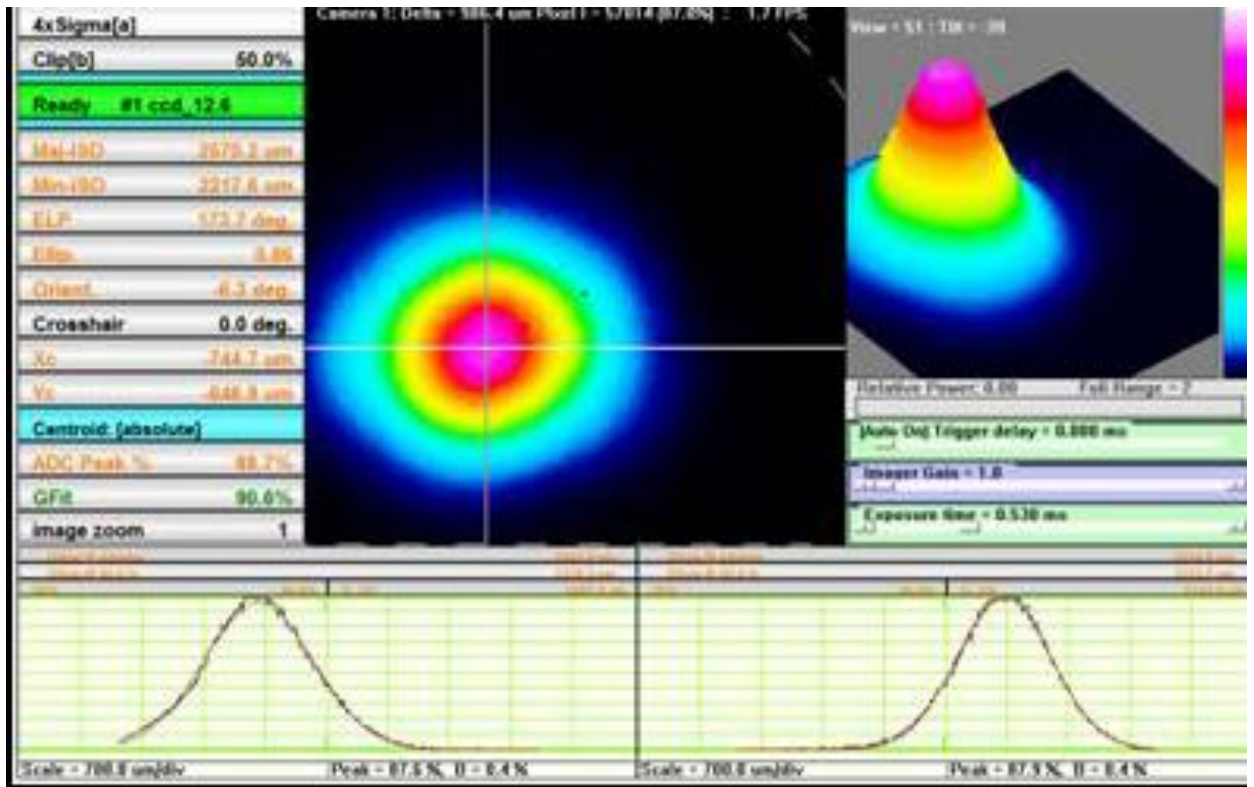
Նկ 1.1 «AREAL» գծային արագացուցչի առաջին փուլի սխեման

Արագացուցչի բաղադրիչ մասերի վերջնական թողարկումից հետո իրականացվել են մեքենայի փորձարկումները, որպեսզի կատարվեն էլեկտրոնային փնջի և լազերային համակարգի գլխավոր պարամետրերի չափումները, ինչպես նաև տարբեր համակարգերի աշխատանքը ուսումնասիրելու համար: Այն գործարկվել է մեկ ամիս 24/7 աշխատանքային ռեժիմով 1-10 Հգ կրկնման հաճախականությամբ:

Լազերային համակարգը, որի ուլտրամանուշակագույն ճառագայթը(ու.մ.) օգտագործվում է պղնձե ֆոտոկաթոդից գերկարճ էլեկտրոնային փնջի գեներացիայի համար, բաղկացած է 4 մոդուլներից: Լազերային համակարգի հիմնական պարամետրերը ներկայացված են աղյուսակ 1.2-ում, իսկ նկար 1.2-ում ներկայացված է լազերային փնջի լայնական պրոֆիլը՝ չափված լազերային լաբորատորիայում:

Աղյուսակ 1.2

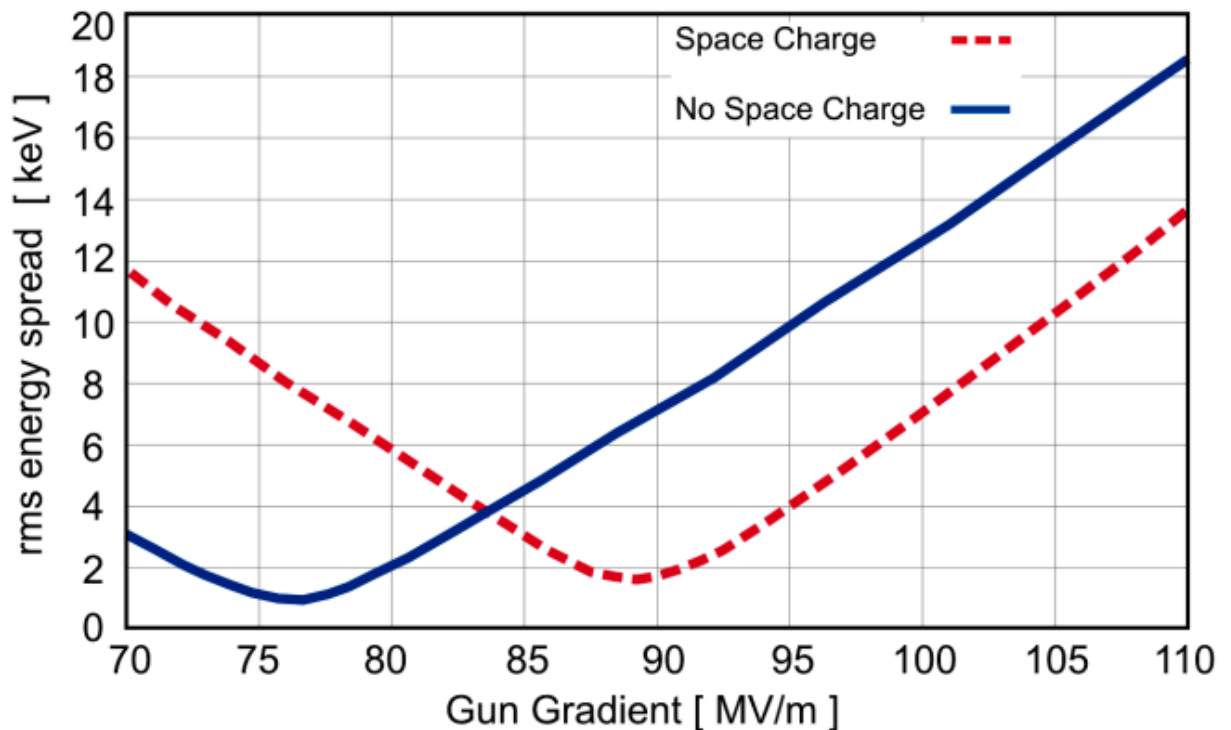
Պարամետրեր	Միաթանձրուկ	Բազմաթանձրուկ
(Ու.մ.) Ալիքի երկ.	258 նմ	258 նմ
Իմպուլսի էներգիա	≥ 300 մկՋ	≤ 15 մկՋ
Աշխատանքային հաճ.	≤ 100 Հգ (1 Հգ քայլով)	≤ 50 Հգ (1 Հգ քայլով)
Փնջի տրամագիծ	≤ 4.5 մմ	≤ 1 մմ
Խմբում ազդակների քանակը	1	16
Էներգիայի կայունություն	$< 2\%$	Ընթացքի մեջ է



Նկ 1.2 Լազերային փնջի լայնական պրոֆիլը

«AREAL»-ի լազերային համակարգի մանրամասն նկարագրությունը ներկայացված է [14]: Մեքենայի գործարկման ժամանակ ուսումնասիրվել են և՛ կարճատև և՛ երկարատև էներգիայի ստաբիլությունը: Վերլուծության արդյունքները ցույց տվեցին, որ մեկ ամսվա ընթացքում էներգիայի կայունության շեղումը փոքր է 3 %-ից: Ստացված միջին ժամանակային տատանումները փոքր են 4 պվ-ից, որը համապատասխանում է ԳԲՀ փուլի 3.5° շեղմանը: Իմպուլսից իմպուլս ԳԲՀ փուլի շտկումը իրականացվում է հատուկ ինքնահարմարվող (adaptive feed-forward of LLRF) վերահսկման համակարգով:

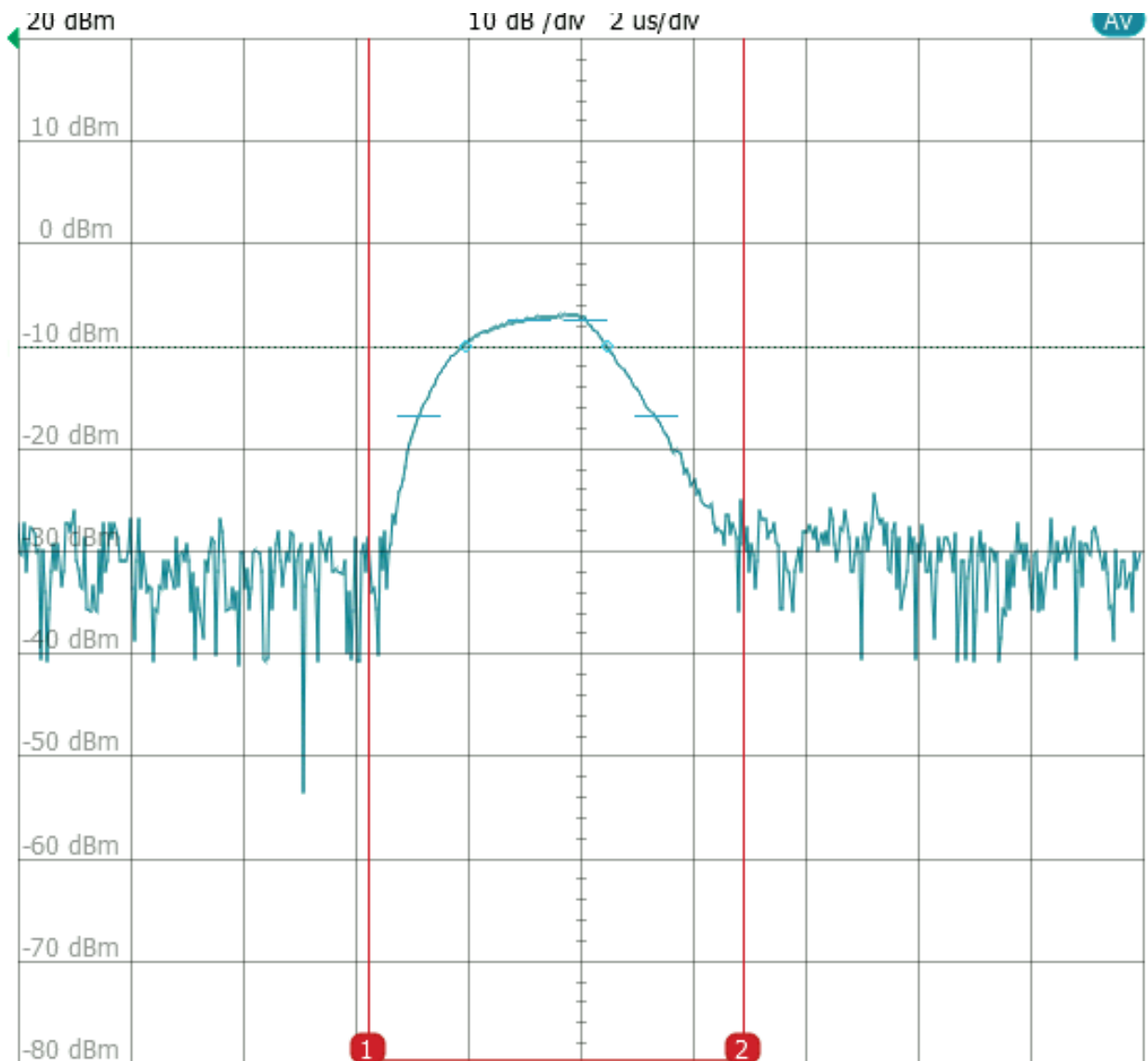
«AREAL» գծային արագացուցչի նախագծման համար իրականացվել են բազմաթիվ հաշվարկային մոդելավորումներ, որպեսզի կատարելագործվեն թնդանոթի և արագացնող կառուցվածքների ԳԲՀ պարամետրերը [15]: ԳԲՀ պարամետրերը օպտիմիզացվել են սարքավորման միաթանձրուկ ռեժիմի համար, ելնելով փնջի էմիտանսի և էներգիայի տարամիտման փոքրացման նկատառումներից: Էլեկտրոնային թնդանոթում, 90 ՄՎ/մ ԳԲՀ գրադիենտի համար հաշվի առնելով տարածական լիցքերի ուժերը, ստացվել է էներգիայի մինիմալ սփռվածք, որը ներկայացված է նկար 1.3-ում:



Նկ 1.3 Փնջի միջին քառակուսային(մ.ք.) էներգիայի սփռվածքը էլեկտրոնային թնդանոթի և արագացնող գրադիենտը: Արդյունքները ներկայացված են տարածական լիցքի ուժերի առկայությամբ(կարմիր) և նրա բացակայության դեպքում(կապույտ):

Էլեկտրոնային թնդանոթում արագացնող դաշտ ապահովելու համար օգտագործվել է ԳԲՀ կայան(եվրոպական S-band հաճախականությամբ), որը համալրված է 7 ՄՎտ. հզորությամբ կլիստրոնով: Նշված ԳԲՀ թնդանոթը իրենից ներկայացնում է կանգուն ալիքով S-Band ռեզոնատոր, որը կազմված է այսպես ասած 1.5 արագացնող էլեմենտներից, և այն նախագծվել ու պատրաստվել է «DESY» միջազգային կենտրոնում գտնվող «REGAE» արագացուցչի համար [16]: ԳԲՀ համակարգի [17] և էլեկտրոնային թնդանոթի վերջնական փորձարկումներից հետո 7 մեգավատ ԳԲՀ հզորությունից ավելի քան 6.2-ը հաջողվել է ներարկել էլեկտրոնային թնդանոթ և ստանալ 3.7 ՄէՎ էլեկտրոնային փունջ, ընդ որում չափումները կատարվել են էներգետիկ սպեկտրոչափի միջոցով:

«AREAL» գծային արագացուցչի թնդանոթի ԳԲՀ համակարգի հիմնական պարամետրերը ներկայացված են աղյուսակ 1.3-ում: Ինչպես նաև նկար 1.4-ում ներկայացված են կլիստրոնի 4 մկվրկ իմպուլսի պրոֆիլի չափումները:



Նկ 1.4 ԳԲՀ իմպուլսի պրոֆիլի չափումներ

Աղյուսակ 1.3

Պարամետրեր	Միա/Բազմաթանձրուկ
ԳԲՀ իմպուլսի երկ.	4 մկվրկ
ԳԲՀ մաքսիմալ հզորություն	7 ՄՎտ
Մաքսիմալ արագաց. գրադիենտ	≈ 95 ՄՎ/մ
Փուլային կայունություն	$< 0.5^\circ$
Ամպլիտուդային կայունություն	$< 0.1 \%$

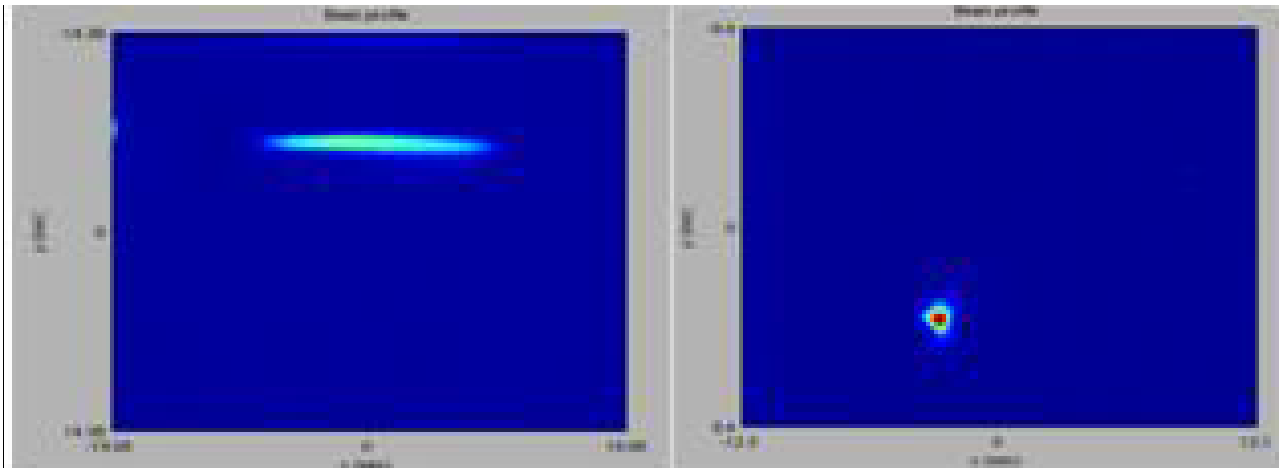
Զերմային կայունության և հովացման համակարգերը ապահովում են ստաբիլ ռեզոնանսային պայմաններ էլեկտրոնային թնդանոթի համար, ինչպես նաև այդ

համակարգերի օգնությամբ է իրականացվում կլիստրոնի և էլեկտրամագնիսների ջերմահեռացումը: Ջերմային կայունության համակարգերի նախագծումն ու պատրաստումը էլեկտրոնային թնդանոթի համար ամբողջությամբ իրականացվել է «CANDLE» ՍՀԻ-ի շրջանակներում:

Ջերմաստիճանային տատանումները նկատվել են $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ -ի սահմաններում, և հարկ է նշել, որ դա գրեթե համապատասխանում է թնդանոթի ռեզոնանսային 10 կՀց հաճախականության տարբերությանը: Մեքենայի կայուն աշխատանքի համար մեկ այլ չափանիշ է վակուումային համակարգերի կայուն գործարկումը, որոնք ապահովում են 4×10^{-9} մԲար վակուում: «AREAL» գծային արագացուցչի վակուումային համակարգը նախապես հավաքվել և փորձարկվել է վակուումային լաբորատորիայում նախքան մեքենայի վերջնական հավաքումը: Արագացուցչի գրեթե բոլոր սարքավորումները և հանգույցները կառավարվում են վերահսկման համակարգի միջոցով: Կառավարման բոլոր ենթահամակարգերը արդյունքում ինտեգրվել են ընդհանուր վերահսկման համակարգի մեջ՝ օգտագործելով EPICS ծրագրային հիմքը: Փնջի հիմնական պարամետրերի չափման և ուսումնասիրության համար օգտագործվել են մի շարք դիագնոստիկ համակարգեր (Ֆարադեյի խցիկ(Faraday Cups), օպտիկական կայան(YAG screens) և լայնական էմիտանսի չափման կայան(pepper-pot)): Աղյուսակ 1.4-ում ներկայացված են արագացուցչի չափումների որոշ արդյունքներ, ինչպես նաև նկար 1.5-ում բերված են փնջի պրոֆիլի պատկերները՝ ուղիղ և էներգետիկ սպեկտրոչափի օպտիկական կայանի էկրանների վրա:

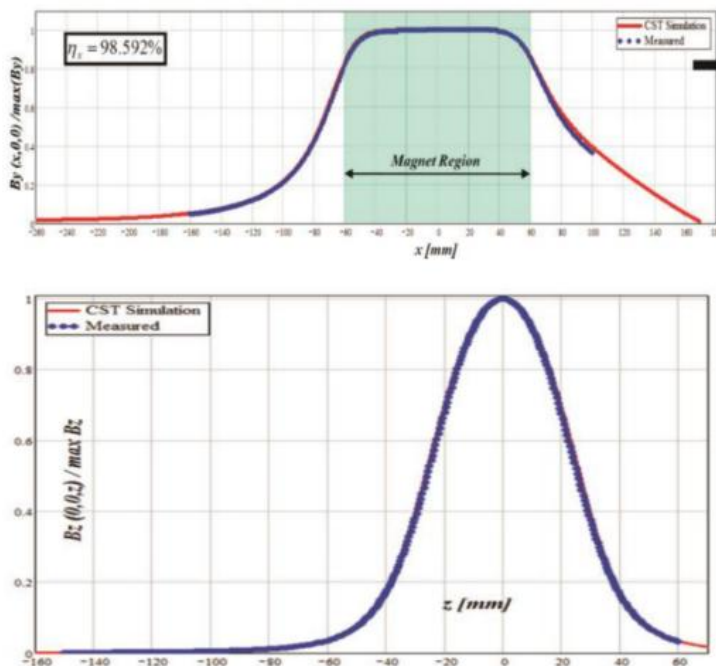
Աղյուսակ 1.4

Չափված պարամետրեր	Միաթանձրուկ
Փնջի էներգիա	2 - 4 ՄէՎ
Լազերի ազդակի երկ.	400 ֆվրկ
Լազերի ազդակի էներգիա	< 270 մկՋ
Փնջի լիցք	30 – 200 պԿ
Փնջի պրոֆիլ (մ.ք.)	0.3 – 0.6 մմ
Էներգիայի (մ.ք.) սփռվածք	< 30 ԿէՎ



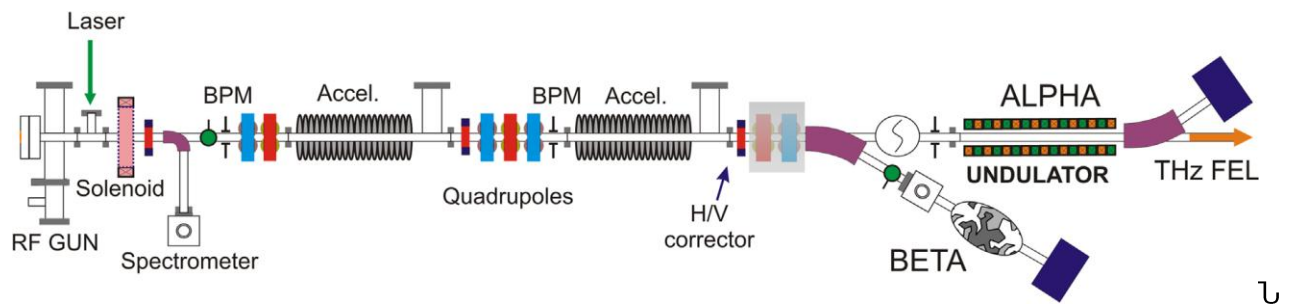
Նկ. 1.5 փնջի պրոֆիլի չափումները՝ ուղիղ(ծախ) և էներգետիկ սպեկտրոչափի(աջ) օպտիկական կայանի էկրաններով

«AREAL» գծային արագացուցչի բազմաթիվ ճշգրիտ համակարգեր և հանգույցներ պատրաստվել են CANDLE սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտում և այդ համակարգերի մեջ են մտնում բոլոր այն մագնիսները, որոնք շահագործվում են «AREAL» արագացուցչի համար [18]: Պատրաստված սոլենոիդային և դիպոլային մագնիսների պարամետրերը բավականին բարձր ճշտությամբ համապատասխանում են հաշվարկային տվյալներին: Նրանց համեմատությունը բերված է նկար 1.6-ում:



Նկ.1.6 Սոլենոիդային(վերև) և դիպոլային(ներքև) մագնիսների հաշվարկային տվյալների համեմատությունը չափումների հետ

«AREAL» գծային արագացուցչի նախագիծը հինականում նախատեսված է ցածր էմիտանսով գերկարճ ելեկտրոնային իմպուլսների գեներացիայի և արագացման համար: Մեքենայի առաջին փուլի [19] բարեհաջող գործարկումից հետո նախատեսվում է «ALPHA» և «BETA» կայանների կառուցումը և փորձարկումը: Հարկ է նաև նշել, որ այդ կայաններին անհրաժեշտ էներգիայի մեծացումը հասնելու է մինչև 20 – 50 ՄԷՎ[4]: «ALPHA» կայանը նախագծված է ազատ էլեկտրոններով լազերի [20] ստացման համար, իսկ «BETA» կայանը նախագծված է որպես փորձարարական պլատֆորմ մասնիկների արագացման առաջադեմ ծրագրերի և հատուկ տեսակների կոհերենտ ճառագայթման ստացման համար: Նկար 1.7-ում բերված է «AREAL» գծային արագացուցչի նոր սխեման, ինչպես նաև աղյուսակ 1.5-ում ներկայացված են նրա պարամետրերը:



կ. 1.7 «AREAL» գծային արագացուցչի սխեման

Աղյուսակ 1.5

Էներգիա	20 - 50 ՄԷՎ
Թանձրուկի լիցք	10 – 250 պԿ
Թանձրուկի երկ.	0.4 – 9 պմրկ
(Մ.ք.) էներգիայի ցրում	< 0.15 %
Մեկ իմպուլսում թանձրուկների քանակը	1/16
Կրկնման հաճախություն	1 – 50 Հց

1.2 Պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման եղանակներ

Ներկայումս գոյություն ունեն պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման բազմաթիվ եղանակներ (վակուումային զոդում, վակուումային եռակցում, գալվանապատում, սառեցնելով միացում, ինչպես նաև մեխանիկական ամրացում) [21-45], սակայն այդ եղանակների մեծամասնությունը գտնվում է հետազոտման փուլում և դեռ չեն կարող կիրառվել գործող միջազգային այնպիսի արագացուցիչներում, որպիսիք են LHC, SOLEIL, DIAMOND, FAIR, EXFEL, ILC, ALBA և այլն:

Ժամանակակից միջազգային արագացուցիչներում կիրառվող պղնձե արագացնող կառուցվածքների երկարությունը տատանվում է մի քանի մետրից ընդհուպ մինչև հարյուրավոր մետրերի [30,41], ուստի պատրաստման եղանակների պրակտիկությունը կայանում է նրանում, որ այն նախ և առաջ պետք է բավարարի զանգվածային արտադրության պահանջներին: Ըստ վերը նշված պահանջների՝ պղնձե արագացնող կառուցվածքները պատրաստվում են տարբեր բարդության և տիպերի պղնձե դետալներից, որոնք միացվում են միմյանց երկու հիմնական եղանակներով՝

1. Վակուումային զոդում
2. Վակուումային դիֆուզիոն եռակցում

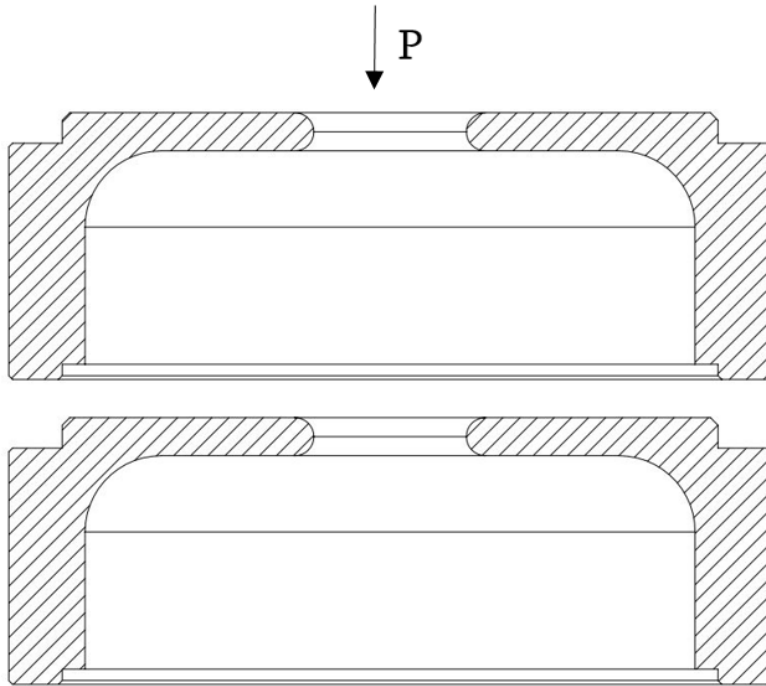
Վերը նշված երկու եղանակներն էլ լայնորեն կիրառվում են ինչպես պղնձե արագացնող կառուցվածքների, այնպես էլ ամբողջ արագացուցչային տեխնիկայի տարատեսակ խնդիրների լուծման համար:

Նշված երկու եղանակներն էլ ունեն և՛ առավելություններ և՛ թերություններ:

Նկար 1.8-ում բերված է պղնձե արագացնող կառուցվածքների համար դիֆուզիոն եռակցման եղանակի սխեման:

Դիֆուզիոն եռակցման հիմնական առավելությունն է համարվում այն փաստը, որ ամբողջ պղնձե կառուցվածքը պատրաստվում է մեկ տեսակի մետաղից, այսինքն՝ զերծ մնալով տարատեսակ միջանկյալ շերտերից կամ ներդիրներից: Հարկ է նշել, որ տարատեսակ մետաղների կիրառումը արագացուցչային տեխնիկայում և հատկապես պղնձե արագացնող կառուցվածքներում բերում է մի շարք ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների ոչ ցանկալի փոփոխությունների (էլեկտրահաղորդականություն,

ջերմահաղորդականություն և այլն):



Նկ. 1.8 Պղնձե արագացնող կառուցվածքների դիֆուզիոն եռակցման եղանակի սխեման

Երկրորդ կարևորագույն առավելությունն այն է, որ ամբողջությամբ բացառվում է միջանկյալ շերտի ներթափանցումը կառուցվածքի ներքին մակերևույթ: Քանի որ այս մեթոդը իրականացվում է առանց տարատեսակ զոդանյութերի, ուստի պղնձե դետալների միացությունը իրականացվում է մետաղի ատոմների մեկը մյուսի մեջ դիֆուզիայի միջոցով որոշակի ջերմաստիճանային պայմաններում՝ գտնվելով բարձր ճնշման տակ, ի համեմատ զոդման եղանակին [22,37]: Դիֆուզիոն եռակցման եղանակով պղնձե դետալների որակյալ (վակուումահերմետիկություն, ամրություն և այլն) միացություն ստանալու համար անհրաժեշտ է նրանց տաքացնել $700 - 1050^{\circ}\text{C}$ (կախված ժամանակի տևողությունից, և իհարկե, միացվող մակերևույթների մաքրություններից) [22,27,28,37] և կիրառել 200կգ/սմ^2 ուժ [27,28,34,37]: Հայտնի է, որ պղնձի հալման ջերմաստիճանը 1083°C [46] է, և ակնհայտ է դառնում, որ վերը նշված ջերմաստիճանի և ճնշման առկայության դեպքում գրեթե անհնարին է դառնում խուսափել կառուցվածքի դեֆորմացիաներից: Ինչպես նաև գոյություն ունի վերջնական կառուցվածքի կծկում(усадка) հասկացողություն, որը դիֆուզիոն եռակցման եղանակի կիրառման դեպքում մոտ 3 անգամ ավելին է, քան զոդման եղանակի դեպքում [34]: Այդ պատճառով էլ կառուցվածքի պատրաստմանը հաջորդում է յուրաքանչյուր

էլեմենտի ռեզոնանսային կարգավորումը [26,27,33]: Սակայն վակուումային զոդման եղանակի դեպքում հնարավորություն կա զերծ մնալ վերջնական ռեզոնանսային կարգավորումից [24,30]:

Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար շատ ավելի լայն տարածում գտած զոդման եղանակը, ի տարբերություն դիֆուզիոն եռակցման եղանակի, իրականացվում է միջանկյալ միացնող շերտերի միջոցով: Հիմնական առավելությունն է համարվում այն փաստը, որ որակյալ միացություն ստանալու համար անհրաժեշտ է միայն հալեցնել զոդանյութը ($T_n - 650 \div 950^\circ\text{C}$), որի հալման ջերմաստիճանը և պահպանման ժամանակը կարող է լինել շատ ավել փոքր, քան պղնձե դետալների դիֆուզիոն եռակցման համար անհրաժեշտ ջերմաստիճանը: Քանի որ պղնձե դետալները միացվում են հալված միջանկյալ շերտով, ապա ակնհայտ է դառնում, որ կիրառվող ուժը պետք է լինի չնչին [38]: Այստեղից հետևում է, որ զոդման եղանակի օպտիմալ ռեժիմների ընտրման դեպքում հնարավոր է դառնում խուսափել կառուցվածքի դեֆորմացիոն պրոցեսներից, որն էլ իր հերթին զերծ է պահում վերջնական ռեզոնանսային կարգավորումներից: Եղանակի հիմնական թերությունն այն է, որ կախված պղնձե էլեմենտների միացման գոտու կոնստրուկտիվ դիզայնից, հնարավորություն կա զոդանյութի ներթափանցում կառուցվածքի ներքին մակերևույթ, որն անթույլատրելի է: Պղնձե էլեմենտների միացման գոտու ժամանակակից ինժեներական դիզայնները [38] հնարավորություն են տալիս ամբողջովին վերացնել միջանկյալ զոդանյութի ներթափանցումը արագացնող կառուցվածքի ներքին մակերևույթ, սակայն ոչ ճիշտ սեղմող ուժի ընտրության դեպքում զոդանյութը այնուամենայնիվ կնեթափանցի ներքին մակերևույթ:

Ակնհայտ է դառնում որ արագացնող կառուցվածքների դետալների պատրաստման համար նպատակահարմար եղանակ է համարվում վակուումային զոդումը:

Գոյություն ունի մեկ այլ կարևորագույն հանգամանք՝ կիրառվող ուժի կարգավորում և՛ դիֆուզիոն եռակցման և՛ զոդման եղանակների դեպքում, որն անտեսվում է և չի նշվում գրեթե բոլոր արագացնող կառուցվածքների պատրաստման վերաբերյալ աշխատանքներում, կամ, բացակայում են առաջարկվող լուծումները:

Քանի որ պղնձե արագացնող կառուցվածքները զոդվում են, կամ, դիֆուզիոն եռակցվում են ուղղահայաց դիրքով և նրանց վրա առկա է նախօրոք կիրառված ճնշում, ապա դա նշանակում է, որ ամենաներքևի և ամենավերևի դետալների միջև կա կիրառված ուժի տարբերություն ամբողջ կառուցվածքի կշռի չափով [37]: Արդյունքում պղնձե արագացնող կառուցվածքի էլեմենտները, որոնք պետք է միացվեն մեկը մյուսին կատարյալին մոտ հավասար պայմաններում, պատրաստվում են ոչ հավասարազոր պայաններում: Վերը նշված խնդրի լուծման համար անհրաժեշտ է պղնձե արագացնող կառուցվածքի էլեմենտները զոդել տեղային տաքացման եղանակով, որի արդյունքում էլ հնարավոր է դառնում յուրաքանչյուր հաջորդ միացման գոտուն անցնելիս փոքրացնել կիրառված ճնշումը(տաքացման պրոցեսը իրականացվում է վերևից դեպի ներքև): Հետևաբար, որոշակի օպտիմալ տեխնոլոգիայի մշակման միջոցով հնարավոր է դառնում բոլոր միացվող էլեմենտների համար պահպանել հավասարազոր պայմաններ, սակայն այդպիսի տեխնոլոգիայի բացակայության պատճառով անհրաժեշտություն կա մշակել այդ տեխնոլոգիան, ինչպես հաշվարկային, այնպես էլ պրակտիկ փորձերի արդյունքներով:

1.3 Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման չափանիշները և մեթոդները

Էլեկտրոնային գծային արագացուցիչների արագացնող կառուցվածքների մշակումն ու հետազոտությունը, որոնք օգտագործվում են գիտական կիրառական խնդիրների լուծման համար, ինչպես նաև նախագծումն ու պատրաստումը մինչ այսօր մնում են ակտուալ [47-49]: Վերը նշվածի վառ օրինակն է ծառայում 1967թ. Երևանում պատրաստված սինքրոտրոնը 6ԳԷՎ էներգիայով, որը կազմված է 50ՄԷՎ էներգիայով գծային արագացուցիչից: Այստեղից էլ բխում է արագացնող կառուցվածքների նախագծման և պատրաստման անհրաժեշտությունը, ինչպես նաև նրանց հուսալիության և որակի ապահովումը: Արագացնող կառուցվածքների որակը բնորոշում են մի շարք կարևոր հատկություններ (բարձր էլեկտրա և ջերմահաղորդականություն, մեխանիկական ճշտություն, գերբարձր վակուումահերմետիկություն, ոչ մագնիսականություն, տեխնոլոգիապես հնարավորինս պարզ, ինչպես նաև մինիմալ արժեքով), որոնք պետք է համապատասխանեն նախապես որոշված հաշվարկային պարամետրերին: Ստորև բերված են արագացնող կառուցվածքների նախագծման և պատրաստման ժամանակ այն կարևորագույն հանգամանքները, որոնցից կախված է նրանց հուսալիությունը և որակը:

Պատրաստի հանգույցի հուսալիությունը կախված է դետալների պատրաստման որակից, սարքավորումներից, նրանց հավաքման տեխնոլոգիայից, նրանց միացման եղանակից, վերահսկման և փորձարկման մեթոդներից, ինչպես նաև նրանց պատրաստման տեխնոլոգիայի յուրաքանչյուր կետի պահպանումից(սկսած նախապատրաստվածքից մինչև շահագործումը): Մեր դեպքում արագացնող կառուցվածքի որակի գնահատումը կկատարվի նախնական ընդունված տվյալների հետ համեմատումով, որոնք իրենցից ներկայացնում են ֆիզիկական հաշվարկներ: Արագացնող կառուցվածքի պատրաստման բոլոր փուլերում շատ կարևոր դեր է խաղում տեխնոլոգիական հերթականության պահպանումը [50]:

Արագացնող կառուցվածքների կոնստրուկցիայի նախագծման ժամանակ շատ կարևոր է հաշվի առնել նրանց պատրաստման տեխնոլոգիականությունը: Դետալների պատրաստման համար որոշվում են նոր տեխնոլոգիաներ, ավտոմատ ծրագրավորման

հաստոցների կիրառմամբ, որոնց միջոցով էլ հնարավոր է դառնում նվազեցնել մշակման ժամանակը և աշխատանքի քանակը: Նշված երկու հանգամանքներից էլ հիմնականում հնարավոր է դառնում նվազագույն ինքնարժեքով ստանալ ճշգրիտ արտադրանք: Տեխնոլոգիականության բարձրացման համար կարևոր է նաև դետալների ավելորդ ամրության պահանջների հեռացումը: Դետալների պատրաստման բարդության նվազեցման և մշակվող նյութերի տնտեսման նպատակով շատ կարևոր է նախապատրաստվածքի օպտիմալ ստացման ընտրությունը: Ընդ որում հարկավոր է, որ նախապատրաստվածքը ունենա նվազագույն մեխանիկական թողնվածքներ: Ելնելով վերը նշված հանգամանքներից, պղնձե արագացնող կառուցվածքի դետալների նախապատրաստվածք ստանալու համար ընտրվում է նախապատրաստվածքների ճնշմամբ ստանալու մեթոդը, որի շնորհիվ էլ հնարավոր է դառնում ստանալ անհրաժեշտ ստրուկտուրա:

Նախագծման էսքիզային փուլում որոշվում են հետևյալ կետերը՝ դետալների ընդանուր կոնստրուկցիայի որոշումը և ողջ կառուցվածքի հավաքման տեխնոլոգիաների ընտրությունը, դետալների մեխանիկական մշակման տեխնոլոգիայի կազմումը, ինչպես նաև բոլոր գործընթացների հաջորդականությունների որոշումը: Դետալների պատրաստումից հետո նրանք համեմատվում են տեխնոլոգիական գծագրերի հետ՝ համապատասխանում են արդյոք արդյունքները նախապես սահմանված թույլտվածքների հետ, թե՛ ոչ: Արդյունքում բոլոր հետազոտություններից հետո ստացված տվյալները ուղղակիորեն անց են կացվում տեխնիկական դոկումենտացիայի մեջ: Գործողությունների հաջորդ փուլում, հիմնվելով ստացված սկզբնական արդյունքների վրա, իրականացվում է տեխնիկական գծագրերի և պատրաստման տեխնոլոգիայի վերջնական ճշգրտումներ: Բոլոր դետալների որակյալ լինելու հանգամանքը ճշգրտորեն ստուգվում է, կատարվում է մեխանիկական չափերի ստուգում, ինչպես նաև ընտրվում է մեկ դետալ, որն անցել է բոլոր անհրաժեշտ տեխնոլոգիական պրոցեսներով և կատարվում են մետաղագրական հետազոտություններ: Հարկ է նաև նշել, որ մեխանիկական մշակումից հետո դետալների ճշգրտության վրա շատ մեծ դեր կարող են ունենալ մնացորդային լարումները: Այդ պատճառով պղնձե դետալները ենթարկվում են ջերմամշակման: Այն

իրականացվում է հետևյալ կերպ՝ դետալները տաքացվում են մինչև նախապես որոշված ջերմաստիճանը, այնուհետև տեղի է ունենում որոշակի ժամանակով պահում այդ ջերմաստիճանում, և որից հետո էլ ջերմաստիճանը աստիճանաբար իջեցվում է:

Արագացնող կառուցվածքների պղնձե դետալների կարևորագույն պարամետրերից է ներքին մակերևույթների խորդուբորդությունը, և այդ պարամետրը հիմնականում կախված է մեխանիկական մշակման տեխնոլոգիաների ընտրությունից: Հիմնականում, այդպիսի մակերևույթների ստացումը պղնձե դետալների համար կատարվում է մշակման բարձր արագությունների դեպքում, և այդ պատճառով էլ անհրաժեշտություն կա իրականացնել դետալների մաքսիմալ և արդյունավետ հովացում: Բացի այդ, մակերևույթային բարձր պահանջներին բավարարելու համար անհրաժեշտ է նաև բավականին լուրջ ուշադրություն դարձնել տաշեղների հեռացման խնդրին, որոնք մաքսիմալ կերպով պետք է հեռացնել մշակման գոտուց: Բազմաթիվ հետազոտությունների շնորհիվ բոլորին հայտնի է, որ արագացուցչային տեխնիկայում նմանատիպ դետալների մեխանիկական մշակման լավագույն տարբերակն է մետաղների մշակումը կտրումով: Հիմնականում, մնացած բոլոր տիպի մշակումները, հատկապես, հղկումն ու փայլեցումը, հետագայում կարող են բավականին լուրջ խնդիրների պատճառ դառնալ:

Քանի որ արագացնող կառուցվածքների գրեթե բոլոր հանգույցների և դետալների տեխնիկական պահանջները ներկայումս հասնում են բավականին լուրջ թվերի, ուստի այդ տվյալների և պահանջների չափման գործընթացը նույնպես պահանջում է զարգացում: Հիմնականում, կախված դետալների կամ հանգույցների տեխնիկական պահանջներից կիրառվում են կոնտակտային և ոչ կոնտակտային չափման մեթոդները:

Արագացնող կառուցվածքների դետալների միացման համար ներկայումս գոյություն ունեն բազմաթիվ եղանակներ, որոնց շարքին են դասվում վակուումային զոդումը, վակուումային դիֆուզիոն եռակցումը, սառը նստեցման եղանակը, և բոլոր այս եղանակները ունեն և՛ առավելություններ և՛ թերություններ:

Ձողումը՝ դա, այն եղանակն է, որի ժամանակ դետալները միացվում են միջատոմային կապերով տաքացման միջոցով, որը իրականացվում է զոդանյութի

օգնությամբ: Վերջինս, թրջելով դետալների միացվող մակերևույթները, լցվում է բացակի մեջ, որտեղ էլ տեղի է ունենում նրա բյուրեղացումը: Դիֆուզիոն եռակցման ժամանակ միացությունը տեղի է ունենում միացվող մակերևույթների միջև եղած ատոմների փոխադարձ դիֆուզիայի միջոցով, այդ ընթացքում դետալների վրա կա նախապես կիրառված ուժ, որի արդյուքնում էլ տեղի է ունենում որոշակի պլաստիկ դեֆորմացիա նշված մակերևույթների միջև: Անհրաժեշտ է նշել նաև, որ դիֆուզիոն եռակցման եղանակի ժամանակ միացվող դետալները տաքացվում են համեմատաբար շատ ավելի բարձր ջերմաստիճանի, քան՝ զոդման եղանակի ժամանակ:

1.4 Հետազոտության խնդրի ձևակերպում

Ժամանակակից պղնձե արագացնող կառուցվածքների վերաբերյալ հետազոտությունների ուսումնասիրությունից պարզ դարձավ, որ ներկայումս կա նրանց բավականին լուրջ պահանջարկ արագացուցչային տեխնիկայում, ինչպես նաև մեքենաշինության և բժշկության ոլորտներում: Հետազոտությունների ուսումնասիրության արդյունքում պարզ դարձավ նաև, որ պղնձե արագացնող կառուցվածքների միացման օրինաչափությունները նույնպես բավականին շատ են: Նշված կառուցվածքները պետք է օժտված լինեն հետևյալ կարևորագույն պարամետրերով՝

- Մեխանիկական մշակման բարձր ճշտություն
- Բարձր ամրություն
- Պլաստիկություն
- Վակուումահերմետիկություն
- Նախնական չափերի պահպանում միացումից հետո

Արագացուցչային ֆիզիկայում և տեխնիկայում մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում արտաքին մեծ հաղորդականությամբ հաստ շերտով և ներքին փոքր հաղորդականությամբ բարակ շերտով պատված երկշերտ ալիքատարերը, քանի որ տեսականորեն հիմնավորվել է այդ ալիքատարերում նեղ-հաճախականային ռեզոնանսի առաջացումը բարձր հաճախականային տիրույթում: Լիցքավորված մասնիկը երկշերտ ալիքատարի կենտրոնով անցնելիս ճառագայթում է էլեկտրոմագնիսական ալիք, որը ձևավորվում է միակ դանդաղ տարածվող TM_{01} մոդայից (փուլային արագությունը փոքր է վակուումում լույսի արագությունից):

Չնայած այն հանգամանքի, որ արագացնող կառուցվածքների բնագավառում կան բավականին լուրջ արդյունքներ, այդ ոլորտի զարգացման հետ մեկտեղ առաջ են գալիս մի շարք խնդիրներ, որոնց լուծման համար անհրաժեշտ է իրականացնել հետևյալ հարցերի ավելի խորը հետազոտություններ՝ պղնձե դետալների հավաքման ժամանակ նրանց մեկը մյուսի նկատմամբ բազավորման խնդիրը, դետալների տաքացման մեթոդի ընտրության գիտական հիմնավորումը և նրա ջերմային դաշտի

բնութագրի որոշումը, ինչպես նաև պղնձե դետալների միացման եղանակի(դիֆուզիոն եռակցում կամ զոդում) ընտրությունը:

Հետազոտությունների ուսումնասիրության արդյունքում հիմնավորված է արագացնող կառուցվածքների պատրասման համար տեխնոլոգիաների և սարքավորումների անընդհատ զարգացման հեռանկարայնությունը:

ԳԼՈՒԽ 2. ՆՅՈՒԹԵՐ և ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐ

2.1 Հետազոտությունների համար օգտագործվող մետաղների բնութագրերը

Արագացուցչային համակարգերի կոնստրուկցիաների հատկությունները մեծամասամբ որոշվում են ըստ օգտագործվող նյութերի հատկությունների [51]: Հետևաբար, արագացուցչային համակարգերի արդյունավետ աշխատանքի համար անհրաժեշտ է և պարտադիր է նյութերը ընտրել շատ մանրամասն և հիմնավորված տվյալ պայմաններում արդյունավետ աշխատելու համար: Արագացուցչային համակարգերում կիրառվող նյութերին ներկայացնում են տարբեր պահանջներ, կախված նրանից, թե այդ նյութերը կոնկրետ վակուումային համակարգի որ մասում և ինչպիսի աշխատանքային պայմաններում են օգտագործվում [52]: Այդպիսի համակարգերից մեկն է հենց համարվում պղնձե արագացնող կառուցվածքը, որն աշխատում է բարձր վակուումի պայմաններում: Արագացուցչային համակարգերում օգտագործվող նյութերը, ըստ իրենց ներկայացվող պահանջների, կարելի է բաժանել 3 խմբի:

1. Առաջին խմբում ընդգրկված են այն նյութերը, որոնց ներկայացվում են ամենախիստ շահագործման պահանջները: Դրանք հիմնականում այն նյութերն են, որոնք անմիջապես աշխատում են վակուումային միջավայրի պայմաններում: Այդ պայմաններում աշխատող նյութերին ներկայացվող պահանջները էապես խստանում են, երբ այդ վակուումային համակարգը նախատեսված է գերբարձր վակուում ստանալու համար: Հետևաբար, ամենախիստ պահանջները ներկայացվում են 10^{-11} մթաթ ճնշման պայմաններում աշխատող նյութերին:
2. Երկրորդ խմբում ընդգրկված են այն նյութերը, որոնք հանդիսանում են օժանդակ նյութեր և նրանց ներկայացվող պահանջները այնքան խիստ չեն, ինչպես առաջին խմբում ներգրավված նյութերը, սակայն նրանց ներկայացվում են այնպիսի պահանջներ, որոնք անհրաժեշտ են նրանց բուն ֆունկցիաները կատարելու

համար:

3. Երրորդ խմբում ներգրավված են վակուումային համակարգը կոնստրուկտավորող այնպիսի նյութեր, որոնց ներկայացվում են ոչ այնքան խիստ պահանջներ, ինչպիսիք ներկայացվում են առաջին և երկրորդ խմբերում ընդգրկված նյութերին: Այդպիսի նյութեր են հանդիսանում, օրինակ, սնուցման բլոկների իրանները կազմող նյութերը:

Անմիջապես վակուումային միջավայրում աշխատող նյութերին ներկայացվում են հետևյալ պահանջները՝

1. Վակուումային հերմետիկություն վակուումային խցիկի պատի առավել բարակության պայմաններում:
2. Նվազագույն գազագոյացման հատկություն (անգամ ջերմաստիճանային բարձր պայմաններում) և հեշտ գազազերծման ընդունակություն:
3. Լավ մեխանիկական մշակելիություն:
4. Տարբեր տեսակի քայքայումների և կոռոզիայի նկատմամբ կայունություն:

Բացի վերը նշված պահանջներից վակուումային պայմաններում աշխատող նյութերին ներկայացվում են նաև մի շարք այլ լրացուցիչ պահանջներ, որոնք պայմանավորված են կոնկրետ պայմաններում աշխատելու համար: Ըստ այդմ էլ հատուկ պայմաններում աշխատող նյութերին կարող են ներկայացվել էլեկտրահաղորդականության, ջերմակայունության, մագնիսականության և այլ հատկությունների հետ կապված պահանջներ:

Տեսականորեն գերբարձր վակուումային պայմաններում կարող է օգտագործվել նյութերի մեծ բազմազանություն [53], բայց քանի որ գործնականում շատ քիչ են հանդիպում նյութեր, որոնց բաղադրության մեջ չկան խառնուրդներ, և որոնք բացասական են ազդում բարձր վակուում ստանալու վրա, ապա այդպիսի պայմաններում աշխատող նյութերին ներկայացվող պահանջները շատ խիստ են: Աղյուսակ 2.1-ում բերված են մի շարք մետաղների թափանցելիության հատկությունները որոշ գազերի նկատմամբ տրված ջերմաստիճաններում Գերբարձր վակուումային համակարգերում մեծ կիրառելիություն են գտել որոշ մակնիշների

ինչպես մետաղական, այնպես էլ ոչ մետաղական նյութերը, որոնք ամբողջապես բավարարում են այդպիսի պայմաններում աշխատելու համար: Գերբարձր վակուումի պայմաններում առավել տարածված մետաղական նյութերից են հանդիսանում չժանգոտվող պողպատները (12X18H10T, 20X13), պղինձը (OFHC կամ OFE), վոլֆրամը, տիտանը, վանադիումը և այլն: Ոչ մետաղական նյութերից գերբարձր վակուումային համակարգերում օգտագործվում են տարբեր մակնիշների ապակիներ, կերամիկա և այլն:

Աղյուսակ 2.1 [52]

Մետաղ	Գազ	Ջերմաստիճան. T	P թափանցելիության բացարձակ մեծությունը. մ ³ ·Պա/(մ ² ·վ)	P ₀ մ ³ ·Պա/(մ ² ·վ)	H Ջ/կկալ
Fe	H ₂	975	1.31·10 ⁻⁶	1.88·10 ⁻⁴	8.04·10 ⁷
	N ₂	1387	1.93·10 ⁻⁶	5.19·10 ⁻⁴	1.99·10 ⁸
	CO	1266	1.93·10 ⁻⁶	1.51·10 ⁻⁴	1.55·10 ⁸
Ni	H ₂	681	1.93·10 ⁻⁶	1.21·10 ⁻³	1.12·10 ⁸
Mo	H ₂	298	1.23·10 ⁻¹⁸	1.07·10 ⁻³	1.69·10 ⁸
	N ₂	298	7.13·10 ⁻³⁶	9.64·10 ⁻³	3.76·10 ⁸
Cu	H ₂	298	1.23·10 ⁻¹⁶	2.66·10 ⁻⁴	1.39·10 ⁸

Բարձր վակուումի պայմաններում օգտագործվող նյութերի ընտրության ժամանակ մեծ նշանակություն ունի նաև տնտեսապես շահավետությունը, որը վերաբերվում է ինչպես տվյալ նյութի արժեքին, այնպես էլ՝ վերջնական դետալների, կամ հանգույցների պատրաստման տեխնոլոգիաներին: Վերը նշված մակնիշի պողպատները իրենց հատկությունների շնորհիվ շատ մեծ կիրառելիություն են գտել գերբարձր վակուումային համակարգերի պատրաստման ժամանակ: 12X18H10T մակնիշի պողպատներն ունեն բարձր կոռոզիակայունություն, լավ գազազերծվում են տաքացմամբ, հոյակապ եռակցվում են արգոնա-աղեղային և էլեկտրա-ճառագայթային եռակցում եղանակներով, ունեն բավարար ամրություն և անթափանցելիություն գերբարձր վակուումային պայմաններում աշխատելու համար:

Աղյուսակ 2.2 [54]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
- 0.12	- 0.8	- 2	9-11	- 0.02	- 0.035	17-19	- 0.3	-65

Աղյուսակ 2.3 [54]

T, °C	20
λ , Վտ/(մ·աստ.)	15
ρ , կգ/մ ³	7920
R, Օմ·մ	725

T - այն ջերմաստիճանն է, որում ստացվել են տվյալ արդյունքները.

λ - ջերմահաղորդականության գործակիցն է.

ρ - նյութի խտությունն է.

R - տեսակարար էլեկտրադիմադրությունն է.

Վերը նշված բոլոր պահանջների հետ մեկտեղ պարտադիր պայման է նաև, որ գերբարձր վակուումի պայմաններում աշխատող դետալները չունենան միկրոճաքեր, օքսիդային շերտեր և այլ դեֆեկտներ, որոնք միանշանակ բացասական կերպով կանդրադառնան վակուումի ստացման վրա:

Գերբարձր վակուումային պայմաններում աշխատող նյութերը պետք է նաև ունենան նյութի հագեցման գոլորշու ցածր ճնշում տվյալ աշխատանքային ջերմաստիճանի պայմաններում [55]: Նրա համար, որպեսզի նյութի գոլորշիները չվատացնեն վակուումը, անհրաժեշտ է, որ նրանց կոնցենտրացիան վակուումային տարողությունում զգալիորեն փոքր լինեն, համեմատած մնացորդային գազերի մոլեկուլների կոնցենտրացիաների հետ, ինչպես նաև օգտագործվող նյութերի հագեցման գոլորշու ճնշումը պետք է էապես փոքր լինի մնացորդային գազերի ճնշումներից: Միայն այդ բոլոր պայմանների ապահովման դեպքում կարելի է ստանալ բավականին բարձր վակուում (մինչև 10^{-11} մԲար): Ցանկացած նյութի հագեցած գոլորշու ճնշումը կախված է ջերմաստիճանից: Ընդհանուր առմամբ, նյութի ջերմաստիճանը մեծացնելով 5%-ով, նրա գոլորշիների ճնշումը և գոլորշիացման արագությունը մեծանում է մոտ 10 անգամ:

Բարձր ջերմաստիճաններում գերբարձր վակուումային համակարգերում օգտագործվող նյութերին ներկայացվող սահմանափակումները լինում են ոչ թե հալման ջերմաստիճաններով, այլ այդ նյութերի հազեցման գոլորշիների ճնշումներով:

Տիտանը ունի տեսակարար բարձր ամրություն, 500°C-ում նա օքսիդանում է, 600–700°C ջերմաստիճանում ազատ կլանում է ածխածնի օքսիդ և ածխածնային գազ: Ցածր ջերմաստիճաններում նա կլանում է մեծ քանակությամբ ջրածին: Բարձր քիմիական ակտիվություն ունենալու պատճառով տիտանի հալումը կատարվում է վակուումում, կամ, իներտ գազերի միջավայրում: Տիտանը, վանադիումը և նրանց համաձուլվածքները լայն կիրառում ունեն արդյունաբերության գրեթե բոլոր ճյուղերում:

Պղինձը շատ լայն կիրառում է գտել մեքենաշինության գրեթե բոլոր ոլորտներում, հատկապես, իր բարձր էլեկտրահաղորդականության և ջերմահաղորդականության, բարձր պլաստիկության, ինչպես նաև ոչմագնիսականության շնորհիվ: Պղնձե արագացնող կառուցվածքներ պատրաստելիս կարևորագույն խնդիրներից մեկն է համարվում նյութերի ընտրությունը և, հատկապես, պղնձի ընտրությունը:

Աղյուսակ 2.4 [28]

Նյութ	Էլկետրա- հաղորդականություն 1/(օհմ-սմ)	Ջերմա- հաղորդականությունը (Վտ/սմ/ °C)
Թթվածնազրկված պղինձ	$5,9 \times 10^7$	4
Ալյումին	$3,7 \times 10^7$	2,2
Արծաթ	$6,2 \times 10^7$	4,1
Չժանգոտվող պողպատ	$1,5 \times 10^6$	0,2

Ժամանակակից բոլոր պղնձե արագացնող կառուցվածքները պատրաստում են թթվածնազրկված պղնձի տարբեր տեսակներից(ելնելով կոնկրետ խնդրի պահանջներից) և նրանց մեծամասնության համար հիմնական պահանջները հետևյալներն են՝ էլկետրահաղորդականությունը, ջերմահաղորդականությունը, վակուումային գազաբացթողումը, մեխանիկական ամրությունը, ինչպես նաև արժեքը: Ստորև բրված են(աղյուսակ 2.4) արագացնող կառուցվածքների պատրաստման

համար անհրաժեշտ մետաղների էլեկտրա և ջերմա-հաղորդականությունները:

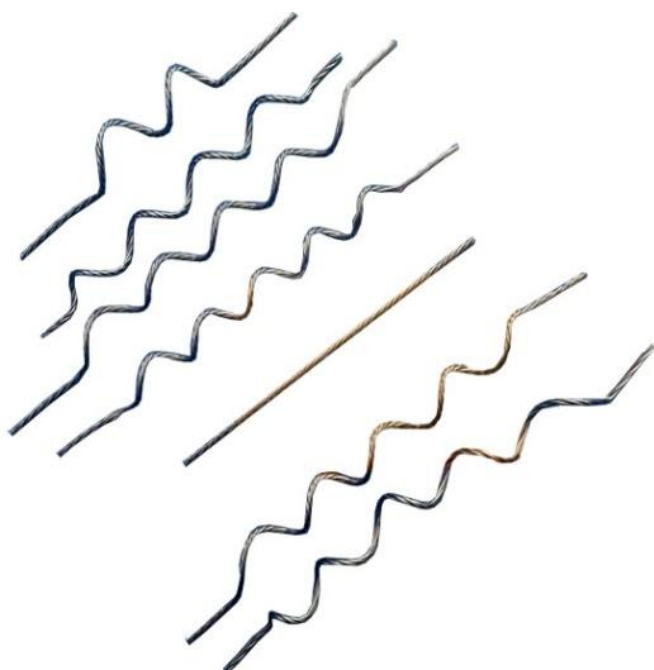
Պղնձե արագացնող կառուցվածքների էլեմենտների զոդման համար շատ մեծ դեր է խաղում թթվածնի պարունակությունը: Թթվածինը պղնձի մեջ գտնվում է օքսիդի տեսքով(Cu_2O) [56], ինչպես նաև պղնձի բաղադրության մեջ է մտնում ջրածինը(H) [56], որն ի դեպ համարվում է ամենաթեթև գազը, որտեղից էլ հետևում է, որ այն համարվում է ամենադժվար հեռացվող գազը վակուումային տեխնիկայի համար: Ինչպես նաև հայտնի է, որ պղնձի մեջ գտնվող թթվածնի օքսիդը(Cu_2O) տաքացման ժամանակ անդադար ռեակցիայի մեջ է մտնում ջրածնի ատոմների հետ[53], որի արդյունքում էլ ստացվում է հետևյալը՝ $\text{Cu}_2\text{O} + 2[\text{H}] = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$: Այստեղից պարզ է դառնում, որ արագացնող կառուցվածքների էլեմենտների միացման ժամանակ (որի ընթացքում վերջիններս տաքացվում են) ռեակցիայի հետևանքով առաջացած ջրի էլեմենտները գոլորշիանում են, և էլեմենտների միացություններում առաջանում են ճաքեր և ծակոտիներ, որն էլ հենց հայտնի է որպես «ջրածնային հիվանդություն» անվանումով: Վերը նշված փաստերի հետևանքով արագացնող կառուցվածքները պատրաստում են ինչքան հնարավոր է մաքուր պղնձից՝ OFHC կամ OFE մակնիշի պղինձ, որի մեջ թթվածնի պարունակությունը հասցված է մինիմալի ($\text{C10100 OFE } 0.0005\%$ թթվածնի պարունակությամբ) [22,23,26-28,33,35,37,38]:

Ներկայումս գոյություն ունեն պղնձե արագացնող կառուցվածքների էլեմենտների միացման երկու եղանակ՝ զոդում [23-29,30-35,37,38] և դիֆուզիոն եռակցում [22,25,27,28,31,34,36,37]: Հայտնի է, որ վերը նշված պղնձե էլեմենտների եռակցման համար որևէ այլ միջանկյալ մետաղ հարկավոր չէ կիրառել, սակայն պղնձե էլեմենտների զոդման համար պետք է կիրառել տարբեր նշանակության զոդանյութեր, որոնք իրարից տարբերվում են հետևյալ պարամետրերով. հալման ջերմաստիճան, մետաղների տոկոսային քանակություն և մետաղների տեսակներ (BVAg-8 , BVAg-30 , $25\text{Au}/75\text{Cu}$, $35\text{Au}/65\text{Cu}$, $50\text{Au}/50\text{Cu}$, $68\text{Ag}/28\text{Cu}/5\text{Pd}$, ինչպես նաև մաքուր մետաղներ՝ ոսկի, արծաթ և նիկել) [25-29,31,33,35,37,38]: Վերը նշված զոդանյութերը լինում են հետևյալ տեսքերի՝ լար [28,33,38], փոշի [27], ծածկույթ [37] և շերտ [27,28,33,35,37]: Արագացնող կառուցվածքների տարբեր էլեմենտների(copper cells, couplers, tuning studs, cooling blocks, drift tubes և այլն) զոդման համար պետք է նրանց միացնել

որոշակի հաջորդականությամբ և այդ պատճառով էլ պետք է ամեն հաջորդ զոդման համար կիրառել ավելի ցածր հալման ջերմաստիճանով զոդանյութ, խուսափելով նախորդ միացությունների զոդատումից [25-29,32,35,37]: Ելնելով պղնձե դետալների միացման գոտու կոնստրուկտիվ դիզայնից, զոդանյութերը կիրառվում են լարի և փայլաթիթեղի տեսքով:

Հետազոտությունների արդյունքները ցույց տվեցին [11], որ նոր երկշերտ արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար որպես արտաքին շերտ հարկավոր է ընտրել այնպիսի մետաղ, որն օժտված լինի բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ, իսկ ներքին շերտը պետք է ընտրել մի այնպիսի մետաղ, որն ի համեմատ արտաքին շերտի կունենա բավականին ցածր էլեկտրահաղորդականություն: Ելնելով վերը նշված պարամետրերից, արտաքին շերտ ընտրվեց թթվածնազրկված պղինձը, իսկ ներքին շերտը՝ գերմանիումը: Գերմանիումին էլեկտրահաղորդականության պահանջը տրվում է ֆիզիկայի տեսանկյունից, սակայն երկշերտ արագացնող կառուցվածք պատրաստելու համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել կիրառվող մետաղի մի շարք հատկություններ ևս: Քանի որ երկշերտ արագացնող կառուցվածքի ներքին մակերևույթը պետք է լինի 1մկմ հաստությամբ համասեռ շերտ, ապա այդպիսի կառուցվածք ստանալու համար օպտիմալ եղանակներից մեկն է հանդիսանում վակուումային փոշենստեցման մեթոդը: Հետազոտությունների արդյունքում պարզ դարձավ, որ միանշանակ հնարավոր է ջերմային փոշենստեցման եղանակով ստանալ 1մկմ համասեռ հաստությամբ գերմանիումի շերտ պղնձե փորձանմուշների վրա:

Հարկավոր է նաև նշել, որ գերմանիումը պատկանում է այն մետաղների տեսակին, որոնց ջերմային փոշենստեցումը հնարավոր է իրականացնել տարբեր տեսակի գոլորշիարարների միջոցով, քանի որ գերմանիումը նույնպես ունի այսպես կոչված թրջվելիության հատկություն, որն էլ հենց թույլ է տալիս գոլորշիացնել նրան վոլֆրամե պարուրակաձև կամ լարային գոլորշիարարների միջոցով՝ բերված նկար 2.1(ա)-ում: Թրջվելիության հատկության բացակայության դեպքում անհրաժեշտություն կա մետաղներին գոլորշիացնել վոլֆրամից և մոլիբդենից պատրաստված կաղապարային գոլորշիարարների միջոցով՝ բերված նկար 2.1(բ)-ում:



Նկ. 2.1(ա) Պարուրակաձև գոլորշիարարներ



Նկ. 2.1(բ) Կաղապարային գոլորշիարարներ

Նշված փորձանմուշների վրա գերմանիումի շերտ ստանալաու համար օգտագործվել է 99.9996% -ոց մաքրության գերմանիումի կտորներ(гранулы)՝ 3-5 մմ չափերով:

Արագացուցչային տեխնիկայում և, ընդհանրապես, մեքենաշինության գրեթե

բոլոր ոլորտներում հաճախ կարևոր դետալները սկզբնական շրջանում պատրաստվում են մեկ այլ օժանդակ մետաղից: Այդպիսի լուծման հիմնական դրդապատճառներից են հիմնական մետաղի թանկարժեքությունը, մետաղի հազվագյուտությունը, դետալի բարդությունը և այլն: Այդպիսի մետաղներից են հանդիսանում ոսկին, արծաթը, պալադիումը, թթվածնազրկված պղինձը և այլն: Հիմնականում, վերը նշված դեպքերում դետալները պատրաստվում են կամ ալյումինի համաձուլվածքներից, կամ էլ պղնձի տարատեսակ համաձուլվածքներից (բրոնզ, արույր և այլն): Արագացուցիչներում փնջի երկայնական չափերի որոշման համար նախատեսված շեղող ռեզոնատորը (Transverse Deflecting Cavity (TDC ռեզոնատոր)) նույնպես պետք է պատրաստվեր թթվածնազրկված պղնձից: Բացի դա, այն պատրաստվում էր առաջին անգամ, ուստի սկզբնական շրջանում այն պատրաստվեց դյուրալյումինից: Ալյումինե բազմաթիվ համաձուլվածքներից ընտրվեց D16T ալյումինը, որը գոյություն ունեցող հնարավոր տարբերակներից լավագույնն է, քանի որ այդ տեսակի ալյումինը համեմատաբար ամենամոտն է պղնձին իր հատկություններով:

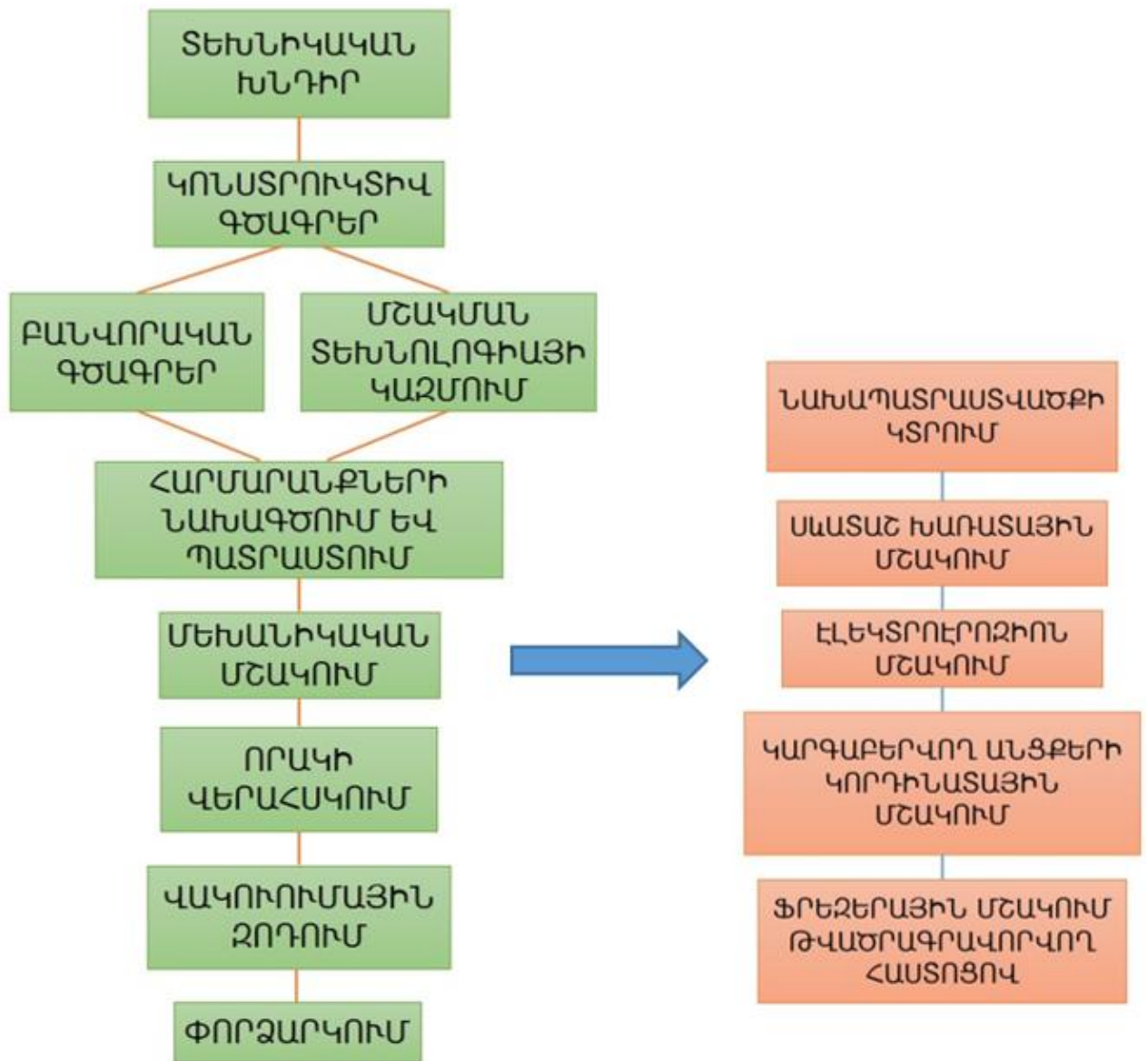
2.2 Հետազոտվող նյութերի մշակման տեխնոլոգիաները

Հայտնի է, որ արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար, հիմնականում, օգտագործվում են գունավոր մետաղները և նրանց համաձուլվածքները (պղինձ, ալյումին, և այլն): Արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող ցանկացած հանգույցին և դետալին տրվող պահանջները բավականին բարձր են, ուստի այդ հանգույցների պատրաստման տեխնոլոգիաներին նույնպես տրվում են բավականին լուրջ պահանջներ: Արդյունքում հաճախ նրանց պատրաստման գործընթացի ժամանակ անհրաժեշտություն է առաջանում շեղվել դասական մեխանիկական մշակման տեխնոլոգիաներից: Այդ ճշգրիտ հանգույցների մի շարք կարևորագույն պարամետրերի(հիմնական չափեր, մակերևույթների մաքրություն և այլն) ստացման համար, հիմնականում, օգտագործում են մետաղների կտրմամբ մշակման տեխնոլոգիաները:

Վերը նշված նյութերի մշակման օրինաչափությունները և առանձնահատկությունները դիտարկվել են TDC ռեզոնատորների, պղնձե արագացնող կառուցվածքների և երկշերտ արագացնող կառուցվածքի պատրաստման համար: Վերջինիս համար անհրաժեշտություն կար հետազոտելու նաև գերմանումի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները:

Արագացուցչային տեխնիկայում օգտագործվող սարքերի, սարքավորումների և այլ հանգույցների պատրաստման համար առաջին ամենակարևոր քայլերից մեկն է հանդիսանում հետազոտողների կողմից կատարվող տեսական, անալիտիկ, կամ, համակարգչային մոդելավորման միջոցով կատարվող հաշվարկները: Այդ հաշվարկների հիման վրա կազմվում է տեխնոլոգիական առաջադրանքը, որից հետո որոշվում է այն պատրաստելու հնարավոր տարբերակները:

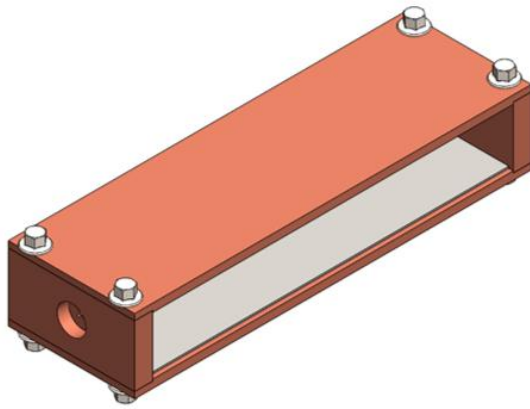
Աշխատանքում դիտարկվել են արագացուցչային տեխնիկայում լայնորեն կիրառվող երեք սարքավորումների և հանգույցների(երկշերտ արագացնող կառուցվածքներ, պղնձե արագացնող կառուցվածքների և TDC ռեզոնատոր) պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացները: Նկար 2.2-ում ներկայացված են վերը նշված հանգույցների պատրաստման տեխնոլոգիական պրոցեսների հաջորդականությունը:



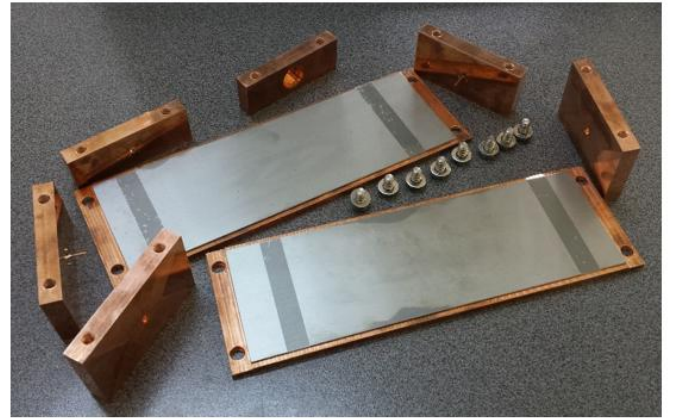
Նկ. 2.2 Գործընթացների իրականացման հաջորդականությունը

Միամոդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքները իրենցից ներկայացնում են պղնձե կլոր կտրվածքով խողովակներ, որոնց ներքին մակերևույթին պետք է նստեցված լինի ցածր հաղորդականություն ունեցող մետաղ:

Էլեկտրադինամիկական հաշվարկներ կատարելու համար որպես մոդել վերցրել ենք երկու պղնձե թիթեղներ, որոնք մշակվել են թվածրագրավորվող ֆրեզերային հաստոցով՝ բավականին բարձր ճշտությամբ և այդ թիթեղների վրա մեխանիկական եղանակով ամրացրել ենք գերմանիումի թիթեղներ: Նկար 2.3-ում բերված է այդ հանգույցի եռաչափ մոդելը (ա) և պատրաստի հանգույցի ընդհանուր տեսքը(բ):



ա)



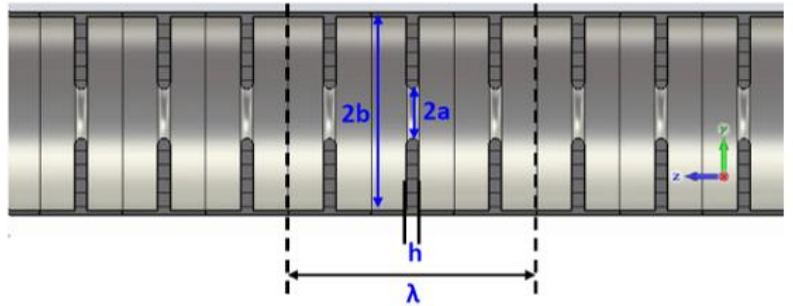
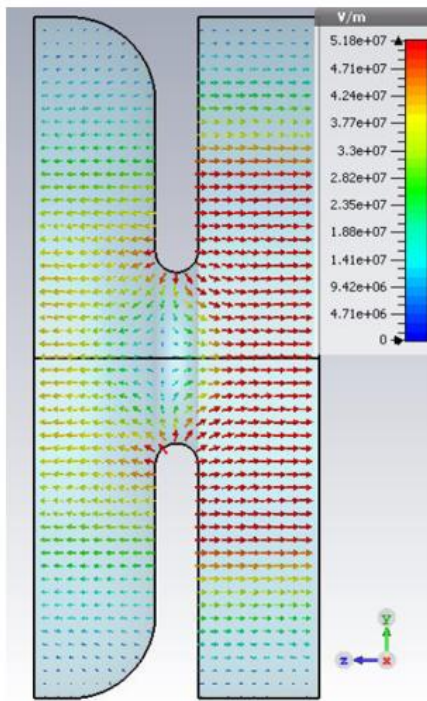
բ)

Նկ. 2.3 Միամողային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի փորձարարական սարքավորման(ռեզոնատոր) ընդհանուր տեսքը

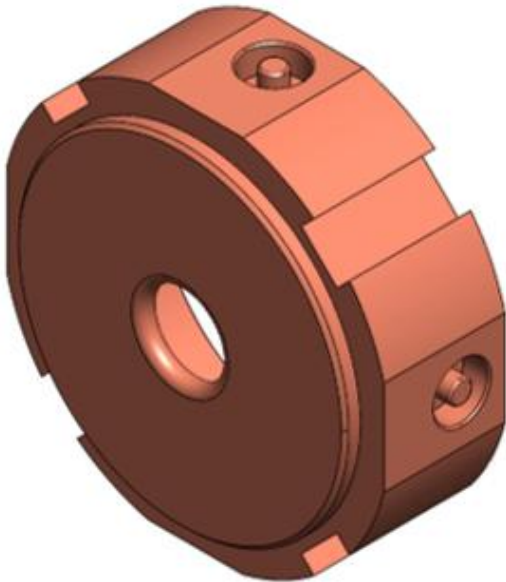
Պղնձե արագացնող կառուցվածքները, մեխանիկայի տեսանկյունից, իրենցից ներկայացնում են գլանական առանցքահամաչափ դետալներ: Պղնձե արագացնող կառուցվածքների դետալների մեխանիկական պատրաստման համար անհրաժեշտ տեխնոլոգիական պրոցեսները հետևյալն են՝

- Արագացնող կառուցվածքների ընդհանուր նախագծում
- Ոչ ստանդարտ հարմարանքների նախագծում և պատրաստում
- Նախապատրաստվածքի կտրում
- Սևատաշ խառատային մշակում
- Էլեկտրաէրոզիոն մշակում
- Կարգավորող անցքերի մշակում
- Ֆրեզերային մշակում թվաճրագրավորող հաստոցով
- Որակի վերահսկում

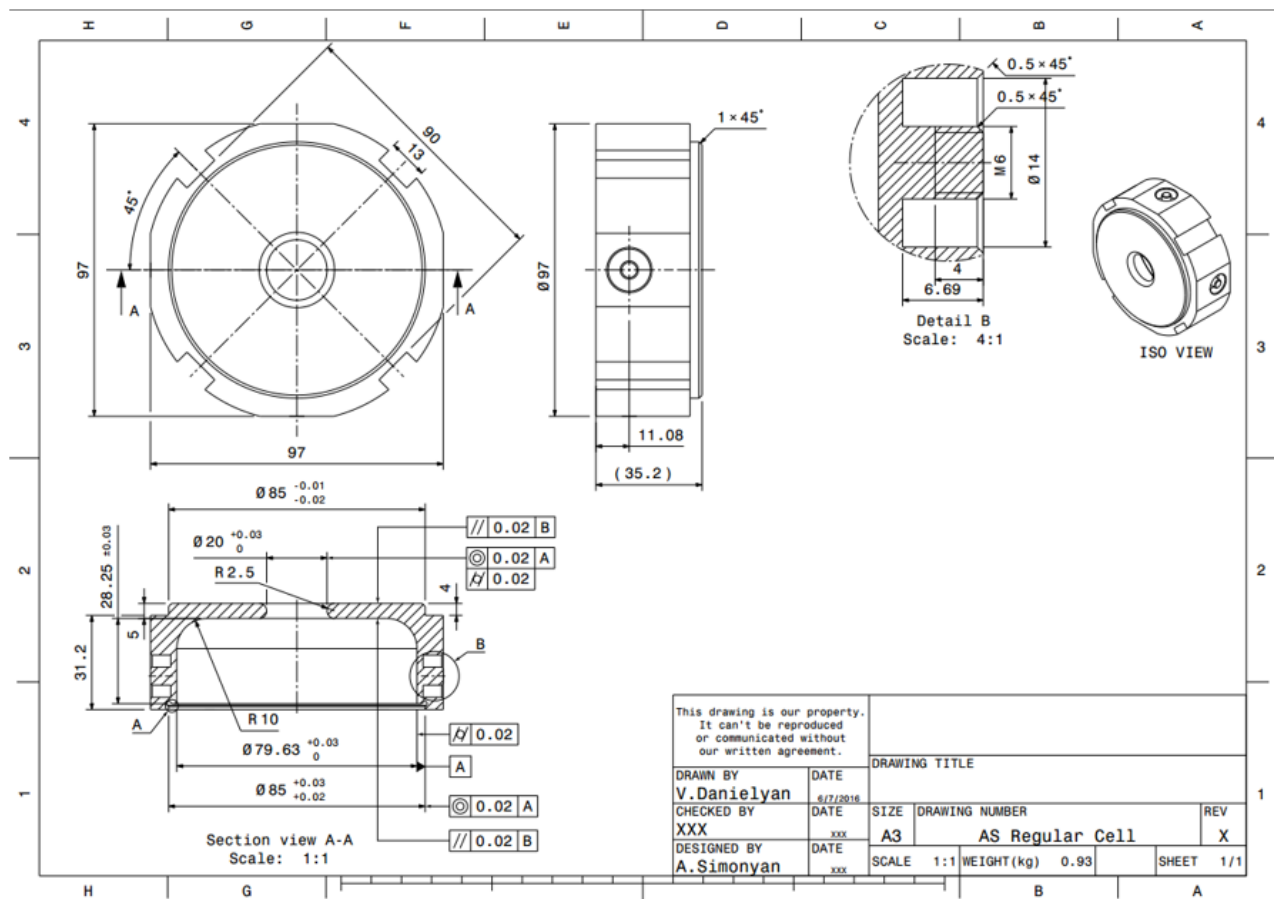
«AREAL» գծային արագացուցիչի համար նախագծված արագացնող կառուցվածքների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները ցույց են տրված նկար 2.4-ում: Այդ մոդելավորման հիման վրա նախագծվել է կառուցվածքի մոդելը(նկար 2.5), ինչպես նաև պատրաստվել են տեխնիկական գծագրերը, որոնք համապատասխանաբար բերված են նկար 2.6-ում և նկար 2.9-ում:



Նկ. 2.4 AREAL գծային արագացուցիչի համար նախագծված արագացնող կառուցվածքների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները

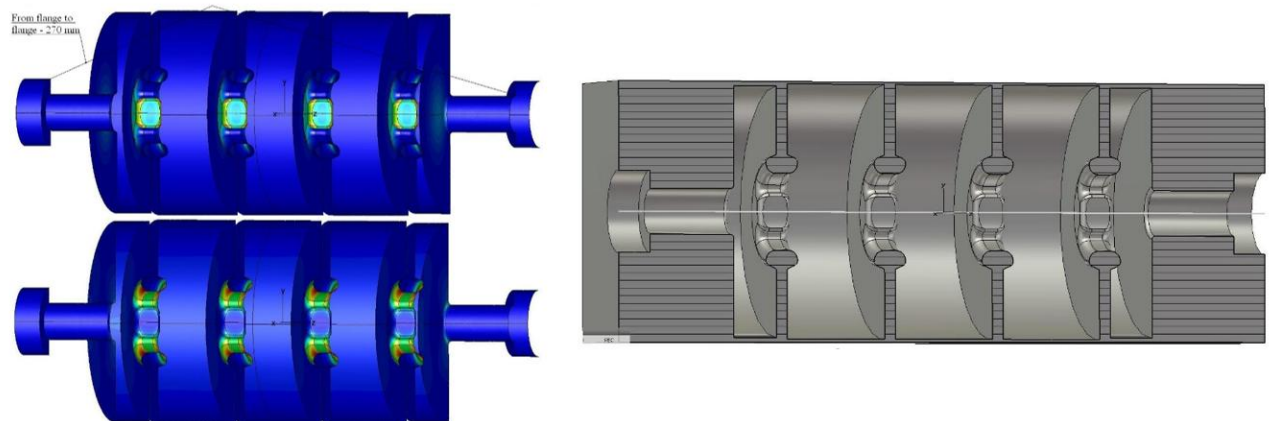


Նկ.2.5 Արագացնող կառուցվածքների մեկ դետալի եռաչափ մոդելը

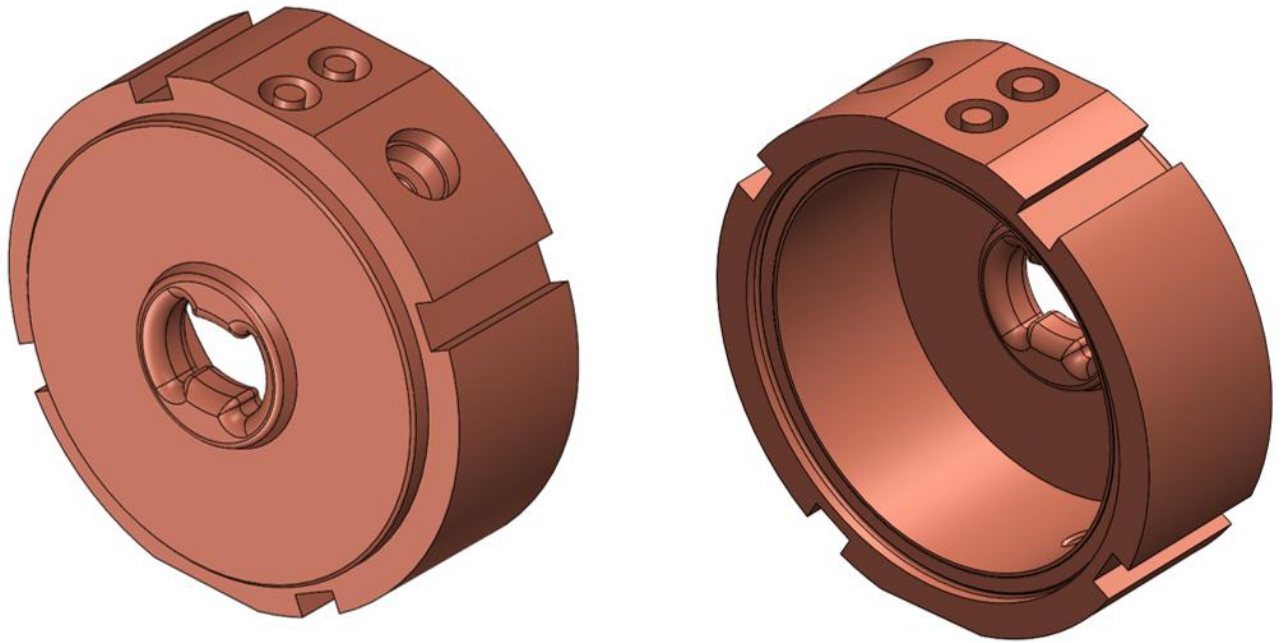


Նկ. 2.6 Արագացնող կառուցվածքների մեկ դետալի տեխնիկական գծագիրը

Նկար 2.7-ում ցույց է տրված TDC ռեզոնատորների համակարգչային մոդելավորման արդյունքները, որի հիման վրա էլ նախագծվել է նրա դետալների եռաչափ մոդելը(նկար 2.8):



Նկ. 2.7 TDC ռեզոնատորի հաշվարկային մոդելը

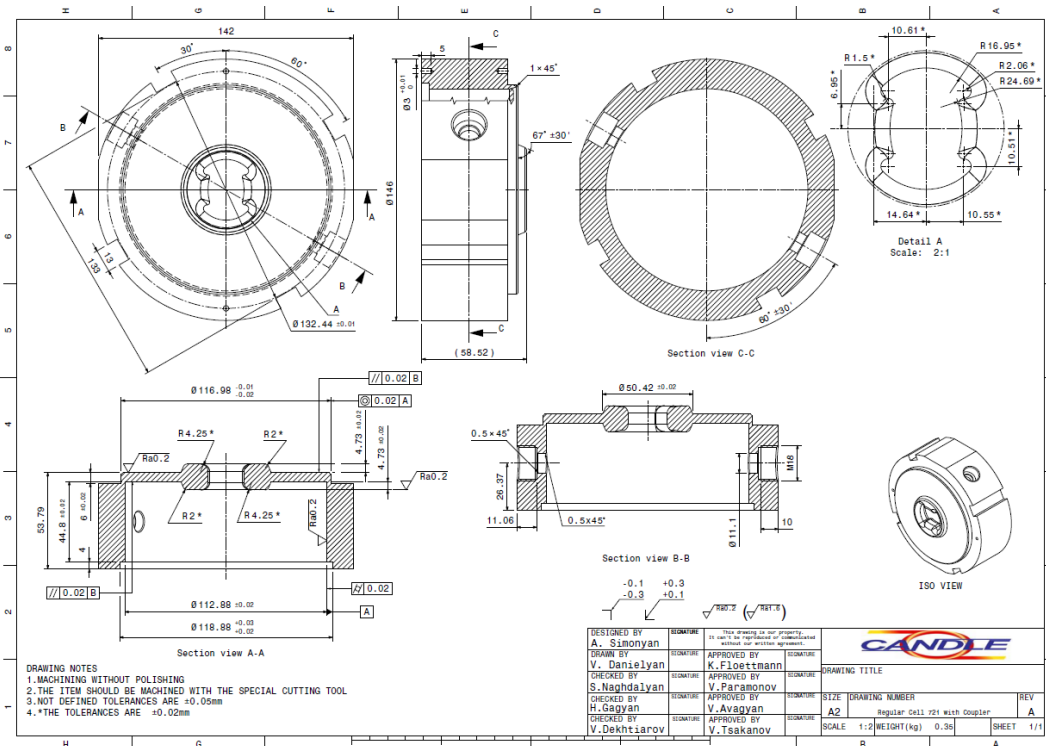


Նկ. 2.8 TDC ռեզոնատորի դետալներից մեկի եռաչափ մոդելը

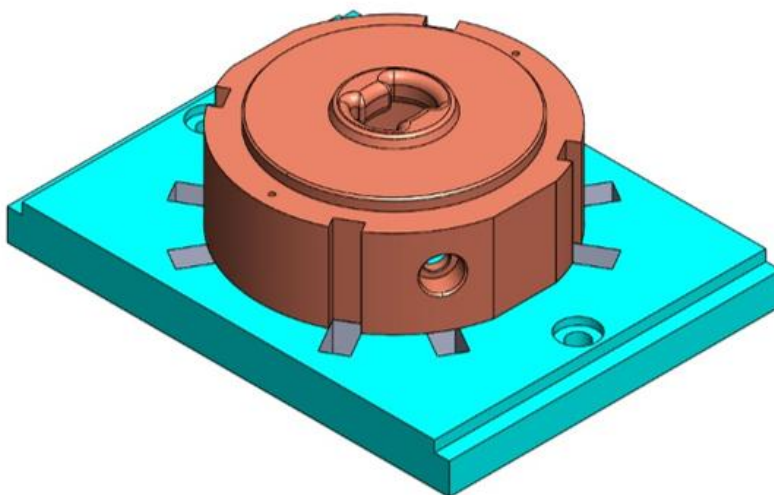
Կոնստրուկտիվ գծագրերը կատարվել են ըստ միջազգային ISO ստանդարտի: Բանվորական գծագրերում նշված են մակերևույթների մաքրության աստիճանները, թույլտվածքները և նստեցվածքները, ինչպես նաև վակուումային զոդման համար նախատեսված որոշ տեխնոլոգիական լուծումներ: Ֆրեզերային մշակումը կատարվել է թվածրագրավորվող ֆրեզերային հաստոցի միջոցով, որի ծրագրավորումը կատարվել է DELCAM PowerMill ծրագրի միջավայրում:

Վերը նշված երեք ճշգրիտ հանգույցների պատրաստման տեխնոլոգիական կարևորագույն խնդիրների լուծման համար անհրաժեշտ է կիրառել ոչ ստանդարտ հարմարանքներ, որոնց պատրաստման տեխնոլոգիական պահանջները, հիմնականում, մի քանի անգամ գերազանցում են հիմնական պատրաստվող դետալի պահանջներից: Ինչպես նաև այդ հանգույցների մեխանիկական մշակման համար բազմաթիվ փորձերի միջոցով կատարվել են օպտիմալ ռեժիմների հաշվարկներ [57-66]: Այդ հարմարանքների կիրառումը բացառապես կարևոր է դետալների մեխանիկական մշակման ժամանակ, քանի որ ճշգրիտ հաստոցները ապահովում են միայն դետալների ճշգրիտ մշակման գործընթացը, սակայն դետալների պատման կամ որոշ դեպքերում էլ բազայավորման խնդիրները անհնարին է լուծել առանց այդ հատուկ

նախագծված հարմարանքների: TDC ռեզոնատորի դետալների ֆրեզերային մշակում կատարելու համար նախագծվել և պատրաստվել են մի քանի ճշգրիտ հարմարանքներ, որոնցից ամենա գլխավորը բերված է նկար 2.10-ում(ա – մոդել, բ – պատրաստի հարմարանքը):

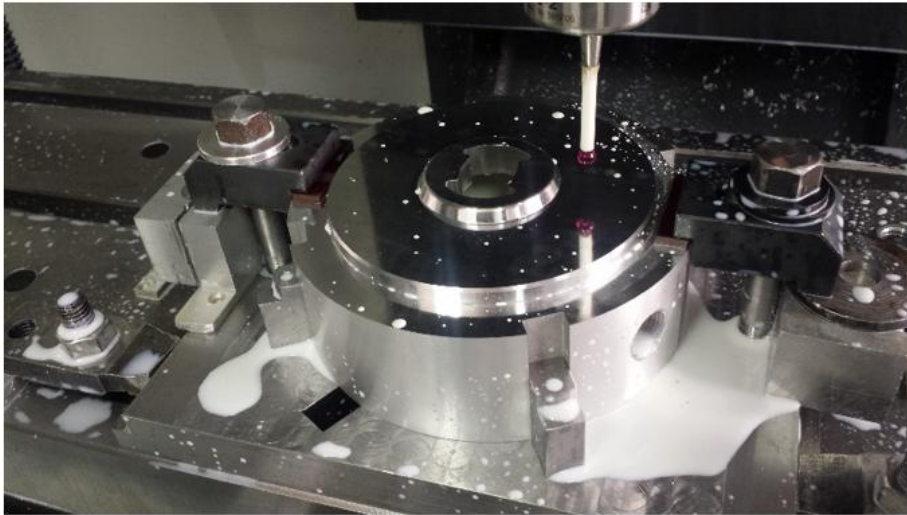


Նկ. 2.9 TDC ռեզոնատորի դետալներից մեկի տեխնիկական գծագիրը



Նկ. 2.10(ա) TDC ռեզոնատորի դետալների ֆրեզերային մշակման համար հարմարանքի

Եռաչափ մոդելը և պատրաստի հարմարանքը



Նկ. 2.10(բ) TDC ռեզոնատորի դետալների ֆրեզերային մշակման համար հարմարանքի եռաչափ մոդելը և պատրաստի հարմարանքը

2.3 Նյութերի կառուցվածքների հետազոտման մեթոդները

Ինչպես հայտնի է, նյութերի, իսկ մեր դեպքում՝ մետաղների հատկությունները պայմանավորված են ոչ միայն քիմիական բաղադրությամբ, այլ նաև կառուցվածքով: Մետաղների կառուցվածքները բաժանվում են երկու մասի՝ մակրոսկոպիկ և միկրոկառուցվածք(միկրոստրուկտուրա):

Մակրոսկոպիկ կամ մակրոկառուցվածքը՝ դա, անզեն աչքով, կամ, ոչ մեծ խոշորացմամբ դիտվող կառուցվածքն է, որը ընդհանուր պատկերացում է տալիս մետաղի կառուցվածքի և նրանում առկա արատների մասին:

Մակրոստրուկտուրան ուսումնասիրվում է նախապատրաստվածքի կտրվածքի մակերեսի վրա, որը հղկվում է և մշակվում համապատասխան քիմիական ռեակտիվներով [67]: Մակրոսկոպիկ անալիզը հնարավորություն է տալիս որոշել՝

1. Մետաղի հատիկային կառուցվածքը, այսինքն՝ հատիկները (կամ բյուրեղները) խոշոր են, թե մանր: Մետաղագիտությունից և նյութագիտությունից հայտնի է, որ խոշորահատիկ կառուցվածքը բավականին փոքրացնում է մետաղի մեխանիկական հատկությունները, և նյութը դառնում է փխրուն: Այդ իսկ պատճառով մետալուրգները ձգտում են ստանալ մանրահատիկ կառուցվածքով մետաղներ:
2. Մետաղի թելիկային կառուցվածքը, որն էլ ստացվում է մետաղյա ձուլվածքի գլոցմամբ կամ կոմամբ:
3. Մետաղների քիմիական անհամասեռությունը, այսինքն՝ գլանվածքի ծավալում քիմիական որևէ տարրի անհավասարաչափ բաշխվածությունը:
4. Կառուցվածքի տարբեր արատները՝ մետաղի հոծության խախտումները, որոնք կտրուկ փոքրացնում են նրա հատկությունները և հաճախ նախապատրաստվածքի քայքայման (խտտանման) առիթ են հանդիսանում:

Ձուլվածքներում (ձուլույթներում) այդպիսի արատների (դեֆեկտների) հիմնական տեսակներն են՝ գազային, հողային և նստվածքային խոռոչները, ճեղքերը, եռակցման կարերում ճեղքերը, օդային և խարամային խոռոչները, ջերմամշակված մետաղների (մխված) ճաքերը և այլն:

Միկրոկառուցվածքը՝ դա, մանրադիտակի միջոցով մետաղների և նյութերի դիտվող կառուցվածքն է:

Մետաղների և նրա համաձուլվածքների միկրոստրուկտուրան ուսումնասիրելու համար մետաղից կտրվում է հատուկ նմուշ, որի մակերևույթը հղկվում է, կոկվում և ապա խաժատվում: Խաժատումը հիմնականում իրականացնում են թթուների կամ աղերի լուծույթներով: Այդպիսի նմուշները կոչվում են մետաղագրական և, հետևաբար, այդ նմուշների հետազոտումը մետաղագրական անալիզ [68]:

Քանի որ մետաղները ունեն բյուրեղային կառուցվածք և թափանցիկ չեն, այդ իսկ պատճառով նրանց կառուցվածքը ուսումնասիրում են մետաղագրական մանրադիտակի միջոցով անդրադարձած լույսում:

Մետաղագրական անալիզը իր հերթին բաժանվում է մի քանի գործընթացների՝ առաջինը՝ դա, հղկուկի պատրաստումն է, որի համար վերցվում է մետաղյա փորձարկվող նմուշը և կտրվում է որոշակի ուղղությամբ: Այնուհետև այն ենթարկվում է հղկման, կոկման և խաժատման: Հղկումը կատարվում է հաջորդաբար 100,120,150,180,220,240,280 և 320 համարի հղկաթղթերի միջոցով: Հղկումը կատարվում է ձեռքով՝ հղկաթուղթը սեղմվում է (ֆիքսվում է) հարթ ապակուն, իսկ հղկուկը ձեռքով համընթաց շարժում են հղկաթղթի վրայով: Վերջնական հղկումից հետո այն լվանում են և անցնում կոկմանը: Կոկումը կատարում են մահուդի կամ ֆետրի վրա, արագիվային փոշու ջրային լուծույթի օգնությամբ: Կոկումը կատարում են մինչև հայելային մակերևույթի ստացումը: Կոկված հղկուկը դիտարկում են մանրադիտակով [69]:

Հղկված մակերեսի վրա երևում են միայն այն մասնիկները, որոնք իրենց գույնով կտրուկ տարբերվում են մետաղից: Հղկուկի մնացած մասն ունի վառ սպիտակ գույն:

Միկրոկառուցվածքի խաժատման համար հղկուկի մակերեսը խաժատում են տարբեր նյութերով (օրինակ HNO_3 3-4%-ոց սպիրտային լուծույթով):

Խաժատիչը տարբեր չափով է ազդում կառուցվածքի բաղադրիչների վրա՝ վերջիններիս էլեկտրաքիմիական պոտենցիալների տարբերության հետևանքով:

Առաջանում է գալվանական զույգ և զանգվածի տեղափոխում ֆազերի և հատիկների սահմանից: Սահմանագծերում առաջանում են փոսիկներ, և այդտեղից մեծ անկյան տակ անդրադարձած ճառագայթները ցրվում են ու հասնում ակնակալ, ուստի երևում են մութ սահմանային գծերի տեսքով [70]:

Մետաղագրական և մակրոսկոպիկ անալիզներից բացի շատ հաճախ կիրառում են նաև մագնիսական, լյումինեսցենտային, ուլտրաձայնային և ռենտգենյան արատանշման մեթոդները:

Մագնիսական արատացույց մեթոդը կիրառվում է ճաքերի, խոռոչների և այլ արատների բացահայտման համար, ֆերոմագնիսական նյութերի համար: Այդ մեթոդի էությունը կայանում է նրանում, որ դետալների մագնիսականացման հիման վրա, որոնց մակերևույթին քսվում է երկաթի օքսիդի մագնիսական փոշի, փոշու հատիկները մագնիսական հոսքի ազդեցությամբ տարածվում և ուղղորդվում են արատների ուղղությամբ:

Լյումինեսցենտային մեթոդը օգտագործվում է մակերևույթային արատների և միկրոճաքերի առկայությունը հայտնաբերելու համար: Այն հիմնվում է ուլտրամանուշակագույն ճառագայթների ազդեցության տակ որոշակի օրգանական նյութերի լուսավորման հատկությունների վրա: Այս մեթոդի ժամանակ նույնպես արտադրատեսակի մակերևույթին քսվում է հատուկ ֆլուորոսցենտնային լուծույթ, որը ուլտրամանուշակագույն ճառագայթների ազդեցության տակ լուսավորվում է և ցույց է տալիս միկրոճաքերը:

Ուլտրաձայնային մեթոդը կիրառվում է նյութերի այն արատների ուսումնասիրման համար, որոնք բավականին խորքում են գտնվում: Այդ մեթոդը կիրառելու համար օգտագործվում է հատուկ ուլտրաձայնային արատացույց (դեֆեկտոսկոպ), որի օգնությամբ նյութի ողջ հաստությամբ ուլտրաձայնային ալիքների փունջ են բաց թողնում և ղեկավարում նրանց անցումը: Մետաղի մեջ ցանկացած շեղում աղավաղում է ալիքների բնականոն անցումը, որն էլ իր հերթին դիտվում է օսցիլոգրաֆի օգնությամբ:

Ռենտգենյան անալիզը նյութերի հետազոտման մեջ բաժանվում է երկու մասի՝ ռենտգենաստրուկտուրային և ռենտգենա արատացուցիչ: Ռենտգենաստրուկտուրային անալիզի միջոցով որոշում են նյութերի քիմիական բաղադրությունը: Ռենտգենա արատանշային անալիզը կիրառվում է ձուլված, կռված, դրոշմված, ինչպես նաև եռակցված մետաղների արատների բացահայտման համար [71,72]:

2.4 Հետազոտությունների կատարման համար օգտագործվող սարքավորումները

Մեքենաշինության բոլոր ոլորտներում, ինչպես նաև արագացուցչային տեխնիկայում յուրաքանչյուր սարքի, կամ, հանգույցի պատրաստման գործընթացը սկսվում է գաղափարից, որը նախ և առաջ իրականացվում է համակարգչային տարբերակով: Արագացնող կառուցվածքների (ֆիզիկայի տեսանկյունից) համակարգչային դիզայնին և հաշվարկներին հաջորդում է նրա ինժեներական մոդելի կառուցումը համակարգչային տարբերակով: Վերջինիս միջոցով հնարավոր է դառնում ռեալ պատկերացում ունենալ ամբողջ հանգույցի կառուցման և հավաքման վերաբերյալ, ինչպես նաև ժամանակակից հաշվարկային մեթոդների շնորհիվ հնարավոր է դառնում իրականացնել այդ հանգույցների, կամ, դետալների տարատեսակ հաշվարկներ: Դրանց մեջ են մտնում ռեզոնանսային, ջերմային և դեֆորմացիոն հաշվարկները, որոնց միջոցով պարզ է դառնում դետալների և հանգույցների բոլոր վտանգավոր հատվածները: Այնուհետև բոլոր անհրաժեշտ փոփոխություններից հետո սկսվում է իրական դետալների պատրաստման գործընթացները:

Հատկապես մեր դեպքում մշակվող մետաղը՝ դա, թթվածնազրկված պղինձն է: Արագացնող կառուցվածքների դետալները իրենց արտաքին երկրաչափությամբ հիմնականում լինում են երկու տեսակի՝

1. Կլոր
2. Ուղղանկյուն

Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար ավելի լայն տարածում գտած կլոր երկրաչափություն ունեցող դետալները, բնականաբար, ավելի նպատակահարմար է պատրաստել կլոր մետաղակոճղից(балванка), որն էլ արտադրվում է մի քանի մետր երկարությամբ և տարբեր տրամագծերի: Սկզբնական շրջանում հարկավոր է այդ կլոր մետաղակոճղը որոշակի թողնվածքներով բաժանել անհրաժեշտ չափերով դետալների: Դա իրականացվում է տարատեսակ սղոցներով,

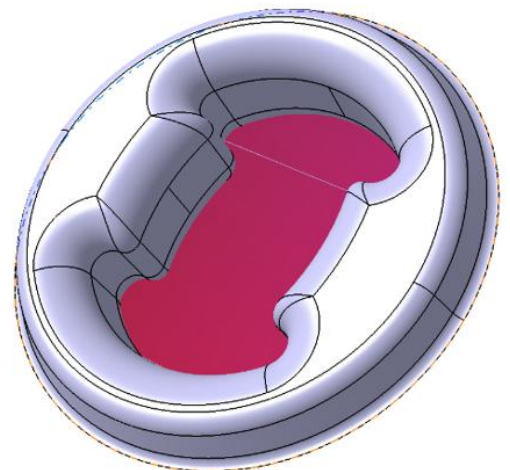
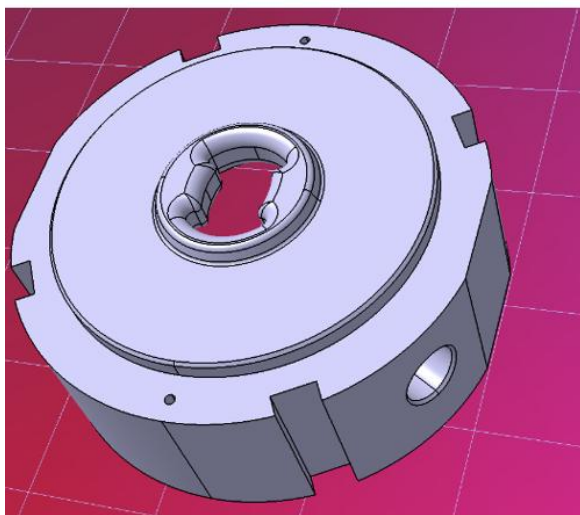
որոնց միջոցով հնարավոր է լինում կատարել մետաղների ոչ ճշգրիտ նախնական կտրում:

Նախնական դետալների ստացումից հետո, կախված մշակվող դետալների երկրաչափությունից, պետք է ընտրել վերջնական մշակումների համար նախատեսված հաստոցները: Արագացնող կառուցվածքների այնպիսի դետալները, որոնք կազմված են միայն պտտական մակերևույթներից, նպատակահարմար է մշակել խառատային հաստոցների միջոցով: AREAL գծային արագացուցիչի արագացնող կառուցվածքների համար նախատեսված պղնձե դետալները մշակվել են HAAS CNC ST-10 խառատային հաստոցի միջոցով բերված նկար 2.11-ում, իր տեխնիկական տվյալներով:



Բռնցքի չափ	165 մմ
Մաք. մշակվող տրամագիծ	356 մմ
Մաք. մշակվող երկ.	460 մմ
Մաք. արագություն	6000պտ. ր.
Տեղակայման ճշտություն	$\pm 0,0025$ մմ
Կրկնելիություն	$\pm 0,0025$ մմ
Գործիքների քանակ	24

Նկ. 2.11 HAAS ST-10 խառատային հաստոց իր տեխնիկական տվյալներով



Նկ. 2.12 TDC ռեզոնատորի-ի ընդհանուր և միջնամասում գտնվող պրոֆիլի տեսքերը

Այնուամենայնիվ, ոչ բոլոր մշակման գործընթացները կարելի է իրականացնել

խառատային հաստոցների միջոցով: Նկար 2.12-ում բերված է TDC ռեզոնատորի մոդելը, որն անհնարին էր պատրաստել միայն խառատային հաստոցի միջոցով, հատկապես, դետալի մեջտեղում գտնվող պրոֆիլը:

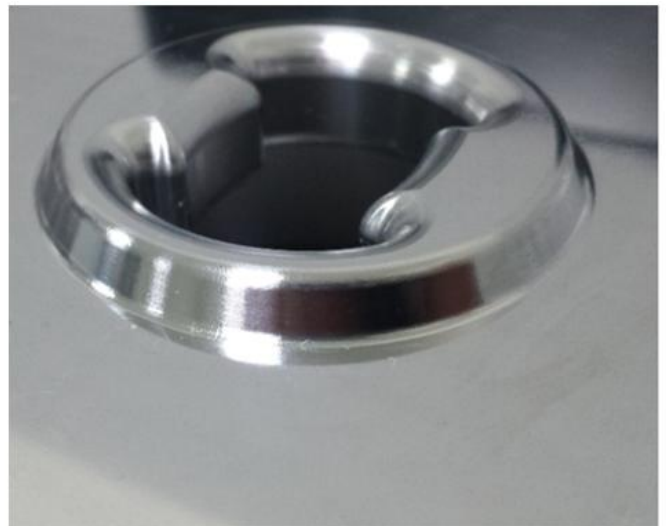
Հետևաբար, այն պատրաստվել է HAAS CNC TM-1P ֆրեզերային հաստոցի միջոցով, որի տեխնիկական տվյալները լիովին բավարարում են ինժեներական գծագրերով հաստատված թույլտվածքների հետ: Նկար 2.13-ում բերված է վերը նշված հաստոցի ընդհանուր տեսքը իր տեխնիկական տվյալներով:



Սեղանի երկարություն	165 մմ
Սեղանի լայնություն	356 մմ
Ակոսների լայնություն	16 մմ
Մաք. արագություն	6000 պտ. ր.
Տեղակայման ճշտություն	$\pm 0,010$ մմ
Կրկնելիություն	$\pm 0,005$ մմ
Գործիքների քանակ	10

Նկ. 2.13 HAAS TM-1P ֆրեզերային հաստոցի ընդհանուր տեսք իր տեխնիկական տվյալներով

Նկար 2.14-ում բերված է TDC ռեզոնատորի ալյումինե նախատիպի պատրաստի դետալներից մեկը, որը գրեթե ամբողջովին պատրաստվել է վերը նշված ֆրեզերային հաստոցի միջոցով:



Նկ. 2.14 TDC ռեզոնատորի պատրաստի ալյումինե նախատիպի ընդհանուր տեսքը

Նկար 2.15-ում բերված դետալի, ինչպես նաև նկար 2.12-ում բերված մոդելից երևում է, որ այդ դետալը արտաքին տրամագծի վրա ունի իրարից 45°-ով շեղված ուղղաձիգ 4 ակոսներ և միմյանցից 180°-ով շեղված 2 ուղիղ հարթություններ: Դետալների այդ երկու հատվածներն էլ հնարավոր է իրականացնել ֆրեզերային հաստոցի միջոցով, սակայն քանի որ դետալները պետք է պատրաստել բավականին մեծ ճշտությամբ, ապա դա իրականացնելու համար անհրաժեշտ է կա՛մ 3 առանցքներով աշխատող հաստոցին ավելացնել ևս 2-ը, կա՛մ էլ նախագծել մի քանի տեսակի ճշգրիտ հարմարանքներ: Բացի այս տարբերակներից հնարավոր է նաև այդ երկու օպերացիաները կատարել էլեկտրաէռոզիոն հաստոցի միջոցով:



X, Y, Z աշ. չափեր	302x220x160 մմ
Կտրող լարի տրամագիծ	0.25 - 0.3 մմ
Ճշտություն	0.5 մկմ
Դետալի մաք. քաշ	500 կգ
Դիէլեկտրիկ	Դիօնիլզացված ջուր

Նկ. 2.15 Charmilles Robofil 2050TW էլեկտրաէռոզիոն հաստոցի ընդհանուր տեսք իր տեխնիկական տվյալներով

Մետաղների մշակման այդ եղանակի առավելություններն են ճշտությունը, արագությունը, մետաղի գրեթե անմնացորդ օգտագործումը և կտրող գործիքի (լարի) անհամեմատ փոքրությունը: Տվյալ դետալների անհրաժեշտ օպերացիաները իրականացվել են նկար 2.15-ում պատկերված Charmilles Robofil 2050TW էլեկտրաէռոզիոն հաստոցի (իր տեխնիկական տվյալներով) միջոցով:

Արագացուցչային տեխնիկայում գրեթե ամենախիստ պահանջները տրվում են նրա կազմի մեջ մտնող դետալների, ինչպես նաև նրանց շրջապատող ամեն ինչի մաքրությանը, այսինքն՝ զերծ ցանկացած տիպի յուղերից, փոշուց, ինչպես նաև հեղուկներից: Ամեն ինչ ասելով հասկանում ենք սենյակների և նրանց տարածքում գտնվող ցանկացած հատվածի, մարդկանց հագուստների և, հատկապես, նրանց ձեռքերի մաքրությանը: Հարկ է նշել նաև, որ մարդկանց ձեռքերի և նրանց հագուստի

մաքրությունը կարելի է ապահովել միանգամյա օգտագործման ձեռնոցների և հագուստների օգնությամբ: Վերը նշված մաքրության պահպանման համար բոլոր միջոցները կիրառվում են այն ժամանակ, երբ այդ կարևոր դետալները արդեն գտնվում են գեր մաքուր վիճակում: Նրանց մաքրումը տեղի է ունենում տարատեսակ եղանակներով և լուծույթներով, սակայն հիմնականում նրանց վերջնական մաքրումը տեղի է ունենում գերձայնային վաննաներում: AREAL գծային արագացուցչի պղնձե արագացնող կառուցվածքների, TDC ռեզոնատորի, ինչպես նաև մնացած բոլոր կարևոր դետալների ու հանգույցների մաքրումը իրականացվել է գերձայնային վաննայում:

Արագացնող կառուցվածքների դետալներն ունեն բավականին լուրջ պահանջներ՝ կապված մակերևույթի մաքրության և չափերի ճշտության հետ, ինչպես նաև տեխնիկայի զարգացման հետ միասին այդ պահանջները նույնպես բարձրանում են: Հետևաբար, չափիչ սարքավորումները նույնպես պետք է համապատասխանեն և նույնիսկ մեկ քայլ է՛լ ավելի առաջ պետք է գտնվեն, քան այդ դետալների տեխնիկական պահանջներն են: Գոյություն ունեցող արագացնող կառուցվածքների դետալների հիմնական անհրաժեշտ չափումները հետևյալներն են՝

1. Տրամագծերի չափում
2. Խորությունների և հաստությունների չափում
3. Շառավիղների և երեսակների չափում
4. Մակերևույթների զուգահեռության, ուղղահայացության, համառանցքության և մաքրության չափումներ:

Վերը նշված պարամետրերը հնարավոր է չափել միայն մեկ սարքավորման միջոցով, սակայն այդպիսի սարքավորումներն ունեն անհամեմատ մեծ արժեք: Այսպիսի չափումները կարելի է իրականացնել՝ կիրառելով տարատեսակ չափիչ սարքավորումներ: Պղնձե դետալների, ինչպես նաև տարատեսակ փորձանմուշների տրամագծերի, մակերևույթների զուգահեռության, ուղղահայացության և համառանցքության չափման համար օգտագործվել է նկար 2.16-ում բերված Renishaw չափիչ սարքավորումը:



Նկ. 2.16 Renishaw չափիչ սարքավորման ընդհանուր տեսքը

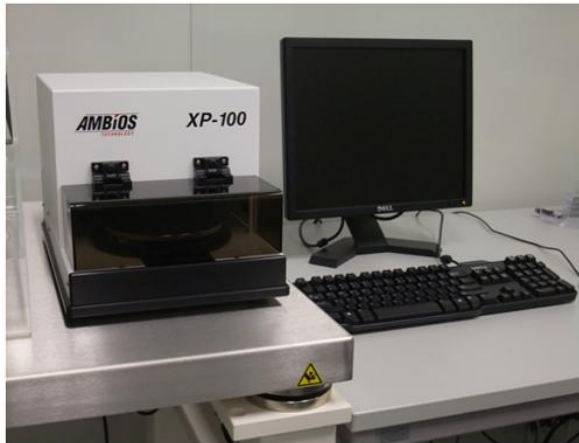


Նկ. 2.17 Միամոդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի փորձարարական հանգույցի դետալները

Մակերևույթների մաքրության, այսինքն՝ խորդուբորդության չափումները իարականացվեցին նկար 2.17-ում պատկերված պղնձե դետալների(երկշերտ արագացնող կառուցվածքի փորձարարական հանգույցի դետալներ) վրա, և չափիչ սարքավորման ընդհանուր տեսքը բերված է նկար 2.18-ում, իր տեխնիկական պարամետրերով:

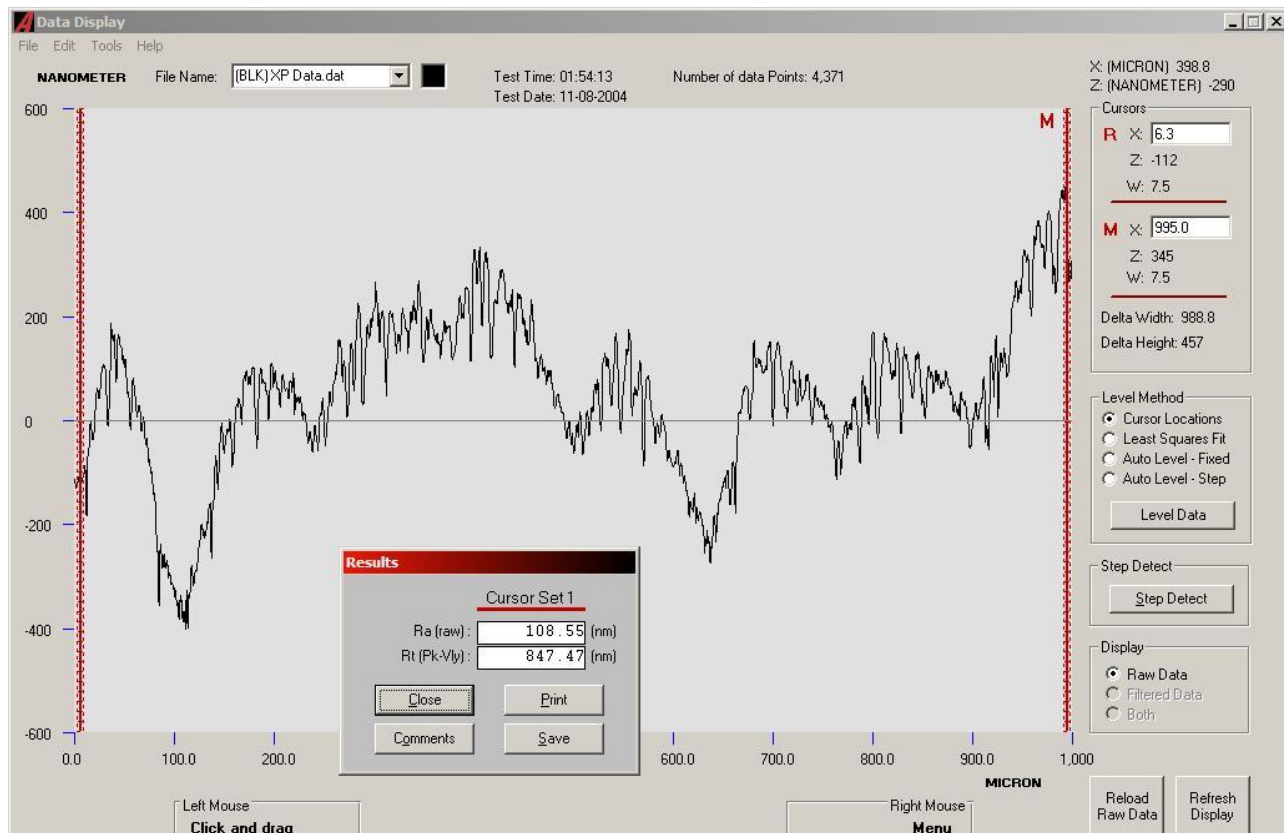
Նկար 2.17-ում պատկերված պղնձե դետալների մակերևույթների խորդուբորդության արդյունքները ցույց տվեցին, որ ֆրեզերային մեխանիկական մշակումից հետո հնարավոր է ստանալ մի այնպիսի մակերևույթ, որի

խորդուբորդությունը տատանվում է $Ra=0,05$ մկմ -ից մինչև $0,1$ մկմ (կախված ֆրեզերային մշակման ռեժիմների ընտրությունից): Վերը նշված չափումների արդյունքները բերված են նկար 2.19-ում:



Սկանավորման երկ. տիր.	30 մմ
Դետալի հաստություն	20 մմ
Ստանդարտ խոշորացում	100 x
Չափիչ ասեղի շառավիղ	2.5 մկմ
Չափիչ ասեղի ուժի տիր.	0.05-10 մգ

Նկ. 2.18 AMBIOS XP-100 պրոֆիլոմետր իր տեխնիկական տվյալներով



Նկ. 2.19 Պղնձե դետալների մակերևույթային մաքրության չափումների արդյունքները

Արագացնող կառուցվածքների դետալների պատրասման և բոլոր չափումների իրականացման գործընթացին հաջորդում է նրանց միացման պրոցեսը, որը կա՛մ իրականացվում է պղնձի համար իներտ գազերի միջավայրում, կա՛մ էլ՝ վակուումային

միջավայրում: Վակուումը և իներտ գազերը անհրաժեշտ են պղնձե դետալների միացմանը, քանի որ վերջիններս տաքացման ժամանակ օքսիդանում են, որն ուղղակի անթույլատրելի է արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար: Վերը նշված դետալների որակյալ միացման համար անհրաժեշտ է, որ ողջ պրոցեսի ժամանակ խցիկում պահպանվի 5×10^{-5} մԲար-ից ոչ ավել վակուումի մակարդակը: Հետազոտությունների և ռեժիմների ընտրման բոլոր աշխատանքները իրականացվել են հորիզոնական վակուումային վառարանում, որի միջոցով բոլոր միացման պրոցեսները կատարվել են 2×10^{-6} մԲար վակուումում, իսկ սառեցման պրոցեսները իրականացվել են 2×10^{-7} մԲար վակուումում: Նշված վակուումային վառարանի ընդհանուր տեսքը բերված է նկար 2.20-ում՝ իր տեխնիկական տվյալներով:



Մաք. ջերմաստիճան	2000°C
Վակուումի սահման	1×10^{-7} մԲար
Տաքացուցիչների նյութ	վոլֆրամ
Տաքացուցիչների տրամ.	6 մմ
Հզորություն	35 ԿՎտ
Վակուումային խցիկի չ.	250x250x400 մմ

Նկ. 2.20 Վակուումային հորիզոնական վառարան իր տեխնիկական տվյալներով

Քանի որ վերը նշված վակուումային վառարանի խցիկի ուղղությունը հորիզոնական է, ապա բոլոր հետազոտական աշխատանքները, որոնք հնարավոր չէր իրականացնել այդ վառարանում, կատարվեցին նկար 2.21-ում բերված ուղղահայաց երկխցիկանի վառարանի միջոցով (իր տեխնիկական տվյալներով): Երկու խցիկների առկայությունը բավականին արագացնում է ընդհանուր հետազոտական արդյունքների ստացումը, քանի որ մեկ խցիկում իրականացվող ջերմային փորձի ժամանակ հնարավորություն կա երկրորդ խցիկին ամբողջովին նախապատրաստել կայանալիք աշխատանքներին: Այսինքն, դետալներ տեղադրել խցիկի ներսում, կատարել բոլոր անհրաժեշտ կարգավորումները, ինչպես նաև ստանալ անհրաժեշտ վակուում:



Մաք. Ջերմաստիճան	Վակուումի սահման	Տաքացուց. հաստություն	Տաքացուց. նյութ	Հզորություն	Խցիկի չափեր
1500°C	1×10^{-7} մթաթ	0.7 մմ	մոլիբդեն	18 ԿՎտ	250x400 մմ

Նկ. 2.21 Երկխցիկանի վակուումային վառարան իր տեխնիկական տվյալներով

Հետազոտությունների համար զոդանյութերը, հիմնականում, օգտագործվել են լարի կամ նրբաթիթեղի տեսքով, սակայն ուսումնասիրվել է նաև վակուումային փոշեծածկման մեթոդով ստացված շատ բարակ շերտերի միջոցով զոդման պրոցեսը: Այդ մեթոդի միջոցով հնարավոր է դառնում ստանալ միջինը 0,1-5 մկմ հաստության շերտեր, որոնց միջոցով էլ կարելի կլինի իրականացնել պղնձե դետալների վակուումային զոդում: Վակուումային փոշեծածկման մեթոդով իրականացվել են նաև միամոդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի համար անհրաժեշտ որոշ հետազոտություններ, և մշակվել է տեխնոլոգիա պղնձե հարթ փորձանմուշների վրա գերմանիումի համասեռ շերտ ստանալու համար (Cu-Ge) [73]:

Նկար 2.22-ում բերված է հետազոտությունների համար մոդեռնիզացված UVN-71P3 վակուումային փոշեծածկման սարքավորումը՝ իր տեխնիկական տվյալներով:

Տարատեսակ փորձարարական հետազոտությունների համար օգտագործվել է նաև վակուումային զոդման և վակուումային դիֆուզիոն եռակցման մեկ այլ սարքավորում(նկար 2.23) [74,75] ևս, որն ամբողջովին նախագծվել ու պատրաստվել է

Քենդլ սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտում: Սարքավորումը համալրված է գերբարձր վակուումային ստանդարտներին համապատասխանող վակուումային համակարգերով, ինչպես նաև զոդման և դիֆուզիոն եռակցման եղանակների համար անհրաժեշտ ուժային համակարգով: Այն նաև համալրված է վերը նշված համակարգերի պարամետրերի չափիչ սարքավորումներով՝ դինամոմետր, վակուումաչափ և այլն:



Նյութերի տաք. ջերմաստիճան	Դետալների տաք. ջերմաստիճան	Վակուումի սահման	Խցիկի չափեր
1700°C	300°C	1×10^{-6} մԲար	500x700 մմ

Նկ. 2.22 UVN-71P3 վակուումային փոշեծածկման սարքավորում իր տեխնիկական տվյալներով
Վերը նշված վակուումային սարքավորումներում բոլոր գործընթացները կախված են վակուումի պարամետրերից և այն հանգամանքից, թե ինչպիսի վակուումային համակարգերով է համալրված տվյալ սարքավորումը:



Նյութերի տաք. ջերմաստիճան	Վակուումի սահման	Տաքացուցիչի տիպ	Խցիկի չափեր	Քաշ
1500	1×10^{-6} մԲար	ինդուկտոր	500x500 մմ	1200 կգ

Նկ. 2.23 Վակուումային զոդման և դիֆուզիոն եռակցման սարքավորում իր տեխնիկական տվյալներով

Վակուումային տարողություններում վակուումի ստեղծումը կարելի է իրականացնել երկու հիմնական եղանակներով [76]:

1. Գազերի հեռացումը վակուումային խցիկից, կիրառելով տարբեր սկզբունքներով աշխատող վակուումային պոմպեր:

2. Գազերի հեռացումը վակուումային խցիկի ընդհանուր ծավալից, տվյալ գազի մոլեկուլները վակուումային խցիկի պատերի մակերևույթներին կապելու արդյունքում:

Վակուումային խցիկներում վակուումի ստեղծման առաջին եղանակը իրականացվում է տվյալ խցիկից գազերի մաս-մաս հեռացման արդյունքում: Այն բոլոր պոմպերը, որոնց օգնությամբ կարելի է վակուումային խցիկներից գազերը հեռացնել արտաքին միջավայր, աշխատում են միայն մեխանիկական սկզբունքներով և կոչվում են ծավալային վակուումային պոմպեր: Չեզոք գազերի մոլեկուլները վակուումային խցիկից անընդհատ հեռացնելու համար անհրաժեշտ է ունենալ մարմին, որը մշտապես կկլանի և կուղղորդի այդ գազերի մոլեկուլները համապատասխան ցանկալի ուղղություններով: Այդպիսի ուղղորդող մարմիններ կարող են հանդիսանալ անընդհատ շարժվող պինդ մակերևույթները, կամ, համապատասխան բաղադրություն ունեցող հեղուկների, գոլորշիների և գազերի հոսքերը: Վակուումային խցիկում գոյություն ունեցող գազերի մոլեկուլները, հարվածելով պինդ մարմինների մակերևույթներին, ձեռք են բերում անհրաժեշտ ուղղությամբ համապատասխան մակարդակի արագություններ, որի արդյունքում հնարավորություն է ստեղծվում դրանք հեռացնել վակուումային խցիկներից:

Այն մեխանիկական պոմպերը, որոնց աշխատանքը հիմնված է պինդ մակերևույթին գազերի մոլեկուլների հարվածներով նրանց հեռացմամբ, կոչվում են իոնային պոմպեր:

Այն վակուումային պոմպերը, որոնց աշխատանքը հիմնված է խցիկներում վակուումի ստացման երկրորդ եղանակի վրա, կոչվում են սորբցիոն պոմպեր: Գազերը սորբցիոն պոմպերում կարող են կապնվել գետտերների օգնությամբ, ինչպես նաև սառեցվող մակերևույթների վրա սորբցման և կոնդենսացման միջոցով:

Վակուումային պոմպերի հիմնական բնութագրիչ հատկություններից մեկը հանդիսանում է պոմպի քաշման արագությունը (պոմպի արագագործությունը) S , որը իրենից ներկայացնում է միավոր ժամանակամիջոցում պոմպի կողմից արտաձվող գազի ծավալը ($լ/վ$, $մ^3/ժ$) [77]:

Գիտության և տեխնիկայի զարգացման հետ մեկտեղ վակուումային

տեխնիկայում կիրառվող պոմպերը ավելի են կատարելագործվում, և ստեղծվում են նորերը, որոնք իրենց հատկություններով հնարավորություն են տալիս ստանալ և ապահովել շատ բարձր մակարդակի վակուում:

Վակուումային պոմպերի ճիշտ ընտրության համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել բոլոր հանգամանքները, որոնք առընչվում են թե՛ տվյալ պոմպերի աշխատանքային պայմանների առանձնահատկություններին և թե՛ վակուումային խցիկների բնութագրերին:

Կախված վակուումային խցիկներում վակուումի մակարդակից և ծավալից՝ կարող են օգտագործվել տարբեր տեսակի վակուումային պոմպեր: Բարձր և գերբարձր վակուումային խցիկներում համապատասխան բարձր մակարդակի վակուում ստանալու համար խցիկներից գազերը հեռացնում են մի քանի տեսակի վակուումային պոմպերի օգնությամբ, քանի որ մինչև այժմ գոյություն չունեն այնպիսի արդյունավետ վակուումային պոմպեր, որոնք հնարավորություն կտան մթնոլորտային ճնշումից մինչև գերբարձր վակուում ստանալ:

Վակուումային պոմպերի ընտրության ժամանակ կարևորագույն պայմաններից են հանդիսանում նաև վակուումային խցիկների աշխատանքային պայմանները:

Բարձր և գերբարձր վակուում ստանալու համար մեծ նշանակություն ունի նաև այն հանգամանքը, որ վակուումի ստացման յուրաքանչյուր մակարդակում օգտագործվող պոմպը ստեղծի այնպիսի վակուում, որը հնարավոր կլինի հաջորդ մակարդակի վակուումային պոմպի օգնությամբ ավելի բարձրացնել:

Լիցքավորված մասնիկների արագացուցիչներում կիրառվում են բարձր արդյունավետություն, անվտանգություն, ավտոմատացում և հեշտ սպասարկում ունեցող վակուումային պոմպեր: Բարձր և գերբարձր վակուում ստանալու համար մեծ կիրառելիություն են գտել տուրբոմոլեկուլային, իոնային և կրիոգեն պոմպերը:

Տուրբոմոլեկուլային պոմպերը իրենց մեջ ներգրավում են մոլեկուլների ներգրավման և առանցքային կոմպրեսորների սկզբունքները [78]: Դրա հետ մեկտեղ պոմպը ընդգրկող ռոտորը կազմող կետերը ունեն մոլեկուլայինին մոտ գծային արագություններ (430մ/վ): Այդ պատճառով այսպիսի պոմպերի առանցքները պետք է պատվեն 10000-60000պտ/ր արագությամբ՝ կախված պոմպի տրամագծից:

Տուրբոմոլեկուլային պոմպերը, համեմատած այլ գերբարձր վակուումային պոմպերի հետ ունեն մի շարք առավելություններ: Այսպիսի պոմպերը օժտված են արագ թողարկմամբ (10-15ր), մշտապես պատրաստ են աշխատանքին, ընդունակ են աշխատել ճնշումների կտրուկ փոփոխությունների պայմաններում, կարող են աշխատել աշխատանքային ճնշման լայն սահմաններում (10^{-2} - 10^{-9} մԲար) գազերի մեծամասնության համար ունենալով մոտավորապես միևնույն արտադրողականությունը: Տուրբոմոլեկուլային պոմպերը իրենցից ներկայացնում են պրակտիկորեն անյուղ պոմպեր: Տուրբոմոլեկուլային պոմպերի բնութագրիչ հատկությունների վրա էապես ազդեցություն են ունենում հենարանային հանգույցները: Այս տիպի պոմպերում հենարանային հանգույցները կարող են կազմված լինել առանցքակալներից, մագնիսական հենարաններից և օդային բարձիկներից: Տուրբոմոլեկուլային պոմպերի արդյունավետ և երկարատև սպասարկման համար անհրաժեշտ է այն թողարկել միայն նախնական վակուումի առկայության պայմաններում, որի պահանջվող մակարդակը կախված է տվյալ տուրբոմոլեկուլային պոմպի հատկություններից:

Գերբարձր վակուում ստանալու համար մեծ կիրառելիություն են գտել նաև կրիոգենային պոմպերը [78]: Կրիոգենային պոմպերի աշխատանքի սկզբունքի էությունը կայանում է այն կազմող մակերևույթների վրա գազերի և գոլորշիների ադսորբացման և կոնդեսացման մեջ, որոնց ջերմաստիճանը զգալիորեն ցածր է շրջակա միջավայրի ջերմաստիճանից: Գազերի մոլեկուլները, հարվածելով այդպիսի մակերևույթներին, կապվում են դրանց հետ: Կրիոգենային պոմպերը առաջին հերթին օգտագործվում են շատ բարձր վակուում ստանալու համար: Ընդհանրապես, կրիոգենային պոմպերը աշխատեցնում են այն դեպքերում, երբ տվյալ վակուումային խցիկներում արդեն ստեղծված է բավականին բարձր մակարդակի վակուում՝ այլ պոմպերի աշխատանքից հետո (դիֆուզիոն, իոննային): Կրիոգենային պոմպերի կոնստրուկցիան իրենից ներկայացնում է տարա, որն ունի մեծ մակերևույթով ծավալ և երկակի պատեր, որոնց մեջ գտնվում են կրիոգեն հեղուկները: Այդ հեղուկները գոլորշիացման հետ մեկտեղ ժամանակ առ ժամանակ լրացվում են: Կրիոմարմինների գոլորշիացման մակարդակները փոքրացնելու համար օգտագործում են սառեցվող

Էկրաններ արտաքին միջավայրից ջերմահոսքերը կանխելու համար:

Իոնային պոմպերը, ինչպես և կրիոպոմպերը, օգտագործում են միայն որոշակի մակարդակի նախնական վակուումի առկայության պայմաններում: Եթե իոնային պոմպերը գործարկվեն առանց նախնական վակուումի ստեղծման, ապա նրանց թիթեղները շատ կարճ ժամանակահատվածում կհագենան և շուտ շարքից դուրս կգան [78]:

ԳԼՈՒԽ 3. ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ և ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

3.1 Հեղուկ փուլում միացումների ստացման հետազոտություններ

Զոդում է կոչվում միջատոմային կապերով միացությունների առաջացումը տաքացման միջոցով, որը իրականացվում է զոդանյութի օգնությամբ: Վերջինս, թրջելով դետալների միացվող մակերևույթները, լցվում է բացակի մեջ, որտեղ էլ տեղի է ունենում նրա բյուրեղացումը: Ներկայումս զոդումը հանդիսանում է ժամանակակից արտադրության մեջ չքանդվող միացությունների ստացման ամենատարածված եղանակը [56]: Զոդման ամենակարևոր առավելությունն է այն հանգամանքը, որ միացման կարը ձևավորվում է միացվող մետաղների հալման ջերմաստիճանից ցածր ջերմաստիճանում: Դա հնարավորություն է տալիս իրականացնել՝

- մեկից ավելի դետալների միաժամանակյա զոդում,
- դետալների դժվար հասանելի տիրույթների զոդում,
- բարակապատ դետալների զոդում,
- տարատեսակ մետաղների և ոչմետաղների զոդում,
- զոդված դետալների անջատում՝ զոդատման միջոցով:

Քանի որ զոդման գործընթացը իրականացվում է միացվող մետաղների սուլիդուսից ցածր ջերմաստիճանային պայմաններում, ապա զոդվող մետաղների հալում տեղի չի ունենում: Սակայն զոդվող մետաղը շփվում է զոդանյութի հետ, որը գտնվում է հեղուկ ֆազային վիճակում: Արդյունքում զոդվող մետաղը և զոդանյութը, որոնք ունեն քիմիական նմանություն, իրենից ներկայացնում է ոչ հավասարակշիռ համակարգ, քանի որ նրանց սահմանում գոյություն ունի էներգիայի և խտության գրադիենտ [56]:

Ըստ զոդանյութի հոսքի բնութագրի գոյություն ունեն կաթիլային (բացակի լայնություն $< 0,5$ մմ) և ոչ կաթիլային (բացակի լայնություն $\geq 0,5$ մմ) զոդում: Կաթիլային զոդման դեպքում բացակը զոդանյութով լցվում է կաթիլային ուժերի ազդեցության տակ: Ոչ կաթիլային զոդման դեպքում բացակը զոդանյութով լցման պրոցեսը հնարավոր է դառնում իրականացնել գրավիտացիայի, ոչ կաթիլայինի դեպքում՝

բացակում բացասական ճնշման, էլեկտրամագնիսական և այլ ուժերի ազդեցության շնորհիվ [56]:

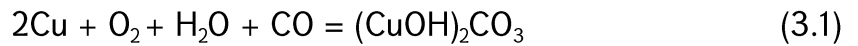
Զոդման գործընթացի հաջող իրականացման համար առաջնային փաստերից մեկն է հանդիսանում զոդվող մետաղների զոդանյութի թրջելիության աստիճանը, որը կախված է մի շարք հանգամանքներից: Քանի որ հեղուկ վիճակում գտնվող զոդանյութը թրջում է միացվող դետալների միայն մաքուր մակերևույթները, ապա նրանց զոդելուց առաջ կարևորագույն խնդիր է համարվում այդ մակերևույթների նախապատրաստումը զոդման գործընթացին: Դրանցից ամենագլխավորն է հանդիսանում զոդվող մակերևույթների և հեղուկ զոդանյութի ֆիզիկական կոնտակտի ապահովումը, որը հիմնականում իրականացվում է օքսիդային շերտի հեռացման միջոցով: Ֆիզիկական կոնտակտի ապահովման համար անհրաժեշտ է նաև պահպանել դետալների ինժեներական գծագրերով սահմանված բարձր պահանջները, որոնցից են մակերևույթի մաքրությունը, հարթայնությունը (flatness) և այլն: Զոդանյութի թրջելիության աստիճանը կախված է նաև զոդման գործընթացի ժամանակա-ջերմաստիճանային ռեժիմներից: Վերը նշված բոլոր պայմանների պահպանումից է կախված, թե ինչպիսի թրջելիություն կստացվի արդյունքում՝ լրիվ թրջելիություն, թերի թրջելիություն, ինչպես նաև չթրջելիություն: Հեղուկ ֆազայում գտնվող զոդանյութի հոսքը դեպի բացակ սկսվում է անմիջապես վերջինիս հալումից հետո, և զոդանյութի թրջելիության հատկությունից է հատկապես կախված ուղղահայաց կաթիլային բացակների զոդանյութով լցվելու հավանականությունը: Սակայն այն կախված է նաև բացակի լայնության չափի ընտրությունից նույնպես: Հարկ է նաև նշել, որ զոդանյութի թրջելիության բարձրացման և կաթիլային բացակի չափսի փոքրացման արդյունքում մեծանում է զոդանյութի բարձրանալու չափը [56]:

Պղնձի և հատկապես արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար նախատեսված թթվածնազրկված պղնձի համար շատ կարևոր դեր է խաղում զոդման եղանակի և ռեժիմների ընտրությունը՝ ելնելով հետևյալ հանգամանքներից.

- օքսիդների քիմիական կայունություն
- դյուրագոլորշիացող մետաղների պարունակություն(ցինկ, կադմիում, մանգան և այլն)

- ջրածնային փխրունություն
- զոդանյութերի հետ միջմետաղամիացությունների կազմելիության հնարավորություն

Պղնձի մակերևույթային շերտի սովորական օքսիդացումը օդում հիմնականում տեղի է ունենում ըստ հետևյալ հավասարման՝



Օդում SO_2 -ի պարունակելու դեպքում զուգահեռ կարող է ընթանալ հետևյալ ռեակցիան՝



H_2S -ի առկայության ժամանակ Cu_2S -ից և CuS -ից գոյանում է սև թաղանթ: Պղնձի զգալի փոխազդեցությունը թթվածնի հետ տեղի է ունենում 200°C -ից և ընթանում է հետևյալ սխեմայով՝ $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} \rightarrow \text{CuO}$: Պղնձի CuO օքսիդը սկսում է գոյանալ միայն Cu_2O օքսիդի բավականաչափ հաստության ($>0.25\text{մկմ}$) դեպքում: Պղնձի օքսիդացման նախնական փուլը բավականին դժվար է նկատել, քանի որ Cu_2O օքսիդը գոյնով շատ քիչ է տարբերվում պղնձից: Սակայն CuO օքսիդը բավականին կայուն է, և նրա տրոհումը Cu_2O -ի և Cu -ի սկսվում է 800°C -ից, իսկ մաքուր թթվածնի միջավայրում՝ 1100°C [56]:

Բազմաթիվ հետազոտությունների արդյունքում հայտնի է դարձել, որ 20°C -ի դեպքում մոտավորապես 3 ռոպեի ընթացքում պղնձի օքսիդացված թաղանթի հաստությունը կազմում է 0,002 մկմ, և այդպիսի մակերևույթով դյուրահալ զոդանյութերով զոդման պրոցեսը գրեթե անհնարին է դառնում: Հարկ է նաև նշել, որ պղնձի օքսիդացման թաղանթի աճի արագությունը կախված է տաքացման ջերմաստիճանից և տևողությունից: 495°C ջերմաստիճանի դեպքում մոտավորապես 1վ հետո օքսիդացման շերտի հաստությունը հասնում է 1,8մկմ, մոտավորապես 50վրկ հետո՝ 5կմկ, իսկ 70վ հետո 17մկմ [56]:

Գոյություն ունեն ցածրջերմաստիճանային և բարձրջերմաստիճանային վակուումային զոդման եղանակներ, և ինչպես հայտնի է, նրանց ջերմաստիճանային բաժանման սահմանն է հադիսանում 450°C -ը: Այդ ջերմաստիճանային սահմանը հանդիսանում է շատ կարևոր հանգամանք, քանի որ ցածրջերմաստիճանային և բարձրջերմաստիճանային վակուումային զոդման համար անհրաժեշտ օժանդակ

նյութերը և հարմարանքները լիովին տարբերվում են: Դրանցից են՝ վակուումի պահանջները և վակուումային սարքավորումները, տվյալ ջերմաստիճանն ապահովելու տաքացուցիչները, սառեցման համակարգերը, էլեկտրական սարքավորումները, ինչպես նաև ջերմաստիճանային մեկուսիչների ձևը և նյութի տեսակը [56]:

Վերը նշված ռեժիմների ընտրությունից, ինչպես նաև տվյալ հանգույցի տեխնիկական պահանջներից կախված է, թե ինչ տեսակի և ձևի պետք է լինի զոդանյութը: Պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար օգտագործվող զոդանյութերի տեսակները բազմաթիվ են, ըստ կիրառելիության, երկրաչափական ձևի, նյութերի, ինչպես նաև մի շարք ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների: Հիմնականում զոդանյութերը բաժանվում են երկու տեսակի ըստ պատրաստման տեսակի՝ պատրաստի զոդանյութեր և զոդանյութեր, որոնք կազմավորվում են զոդման պրոցեսի ընթացքում: Արագացուցչային տեխնիկայում և, ընդանրապես, ողջ մեքենաշինությունում ավելի լայն տարածում են գտել պատրաստի զոդանյութերը, որոնք իրարից տարբերվում են հետևյալ հատկություններով՝

- հալման ջերմաստիճանային տիրույթով
- աշխատանքային ջերմաստիճանով
- հիմնական կամ ավելի հազվագյուտ կոմպոնենտով
- պատրաստման տեխնոլոգիայով

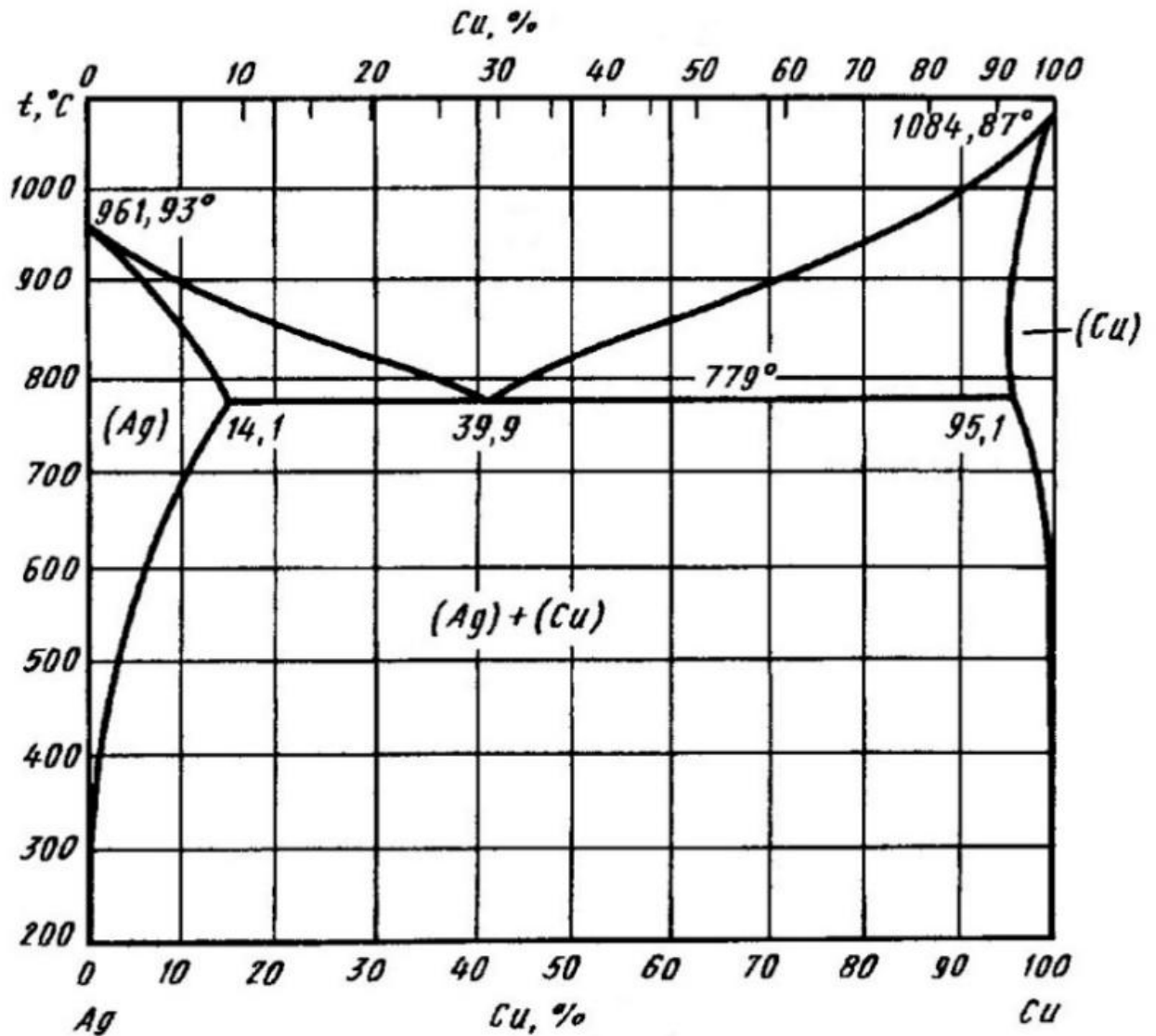
Զոդանյութի հալման ջերմաստիճանային տիրույթը, որը շատ կարևոր դեր է խաղում, ունի իր սիկզբն (սուլիդուս) ու ավարտը(լիկվիդուս): Ըստ զոդանյութերի հալման ջերմաստիճանային տիրույթի, նրանք ևս բաժանվում են հետևյալ խմբերի՝

- | | |
|----------------------------------|---|
| • շատ ցածր ջերմաստիճանում հալվող | - $T_h \leq 145^{\circ}\text{C}$ |
| • դյուրահալ | - $145^{\circ}\text{C} \leq T_h \leq 450^{\circ}\text{C}$ |
| • միջին ջերմաստիճանում հալվող | - $450^{\circ}\text{C} \leq T_h \leq 1100^{\circ}\text{C}$ |
| • բարձր ջերմաստիճանում հալվող | - $1100^{\circ}\text{C} \leq T_h \leq 1850^{\circ}\text{C}$ |
| • դժվարահալ | - $T_h \geq 1850^{\circ}\text{C}$ |

Ներկայումս զոդանյութերի լեգիրացման արդյունքում հնարավոր է դառնում

բարձրացնել նրանց մի շարք ֆիզիկամեխանիկական հատկությունները՝ ամրությունը, էլեկտրահաղորդականությունը, ցածր ջերմային ընդարձակման գործակիցը, մագնիսականությունը և այլն: Հիմնականում, պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար օգտագործվող զոդանյութերը, ըստ իրենց հալման ջերմաստիճանի, կարելի է բաժանել երկու խմբի՝ դյուրահալ և դժվարահալ: Պղնձե կառուցվածքներ պատրաստելու համար դյուրահալ զոդանյութերը, հիմնականում, կիրառվում են օժանդակ դետալների, կամ, հանգույցների, օրինակ պղնձե հովացման խողովակների զոդման, համար: Նշված հանգույցների զոդանյութերի ընտրության համար շատ կարևոր հանգամանք է հանդիսանում, թե ինչ ջերմաստիճանային պայմաններում է շահագործվելու տվյալ հանգույցը: Հիմնականում, ցածր ջերմաստիճանային տիրույթում շահագործվող զոդանյութերը պատրաստվում են մի շարք դյուրահալ մետաղների հավելումով՝ սնդիկ($T_h - 38,87^\circ\text{C}$), գալիում($T_h - 29,78^\circ\text{C}$), ինդիում($T_h - 156,4^\circ\text{C}$), անագ($T_h - 231,9^\circ\text{C}$), բիսմութ($T_h - 271,3^\circ\text{C}$), կապար($T_h - 327^\circ\text{C}$), կադմիում($T_h - 321^\circ\text{C}$) և ցինկ($T_h - 419^\circ\text{C}$) [56]: Այնուամենայնիվ, վերը նշված մետաղներ պարունակող զոդանյութերի կիրառումը վակուումային զոդման ընթացքում, երբ խոսքը գնում է պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդմանը, ցանկալի չէ, քանի որ նրանց գոլորշիացման արդյունքում վակուումային պայմանները զգալիորեն վատթարանում են: Արդյունքում պղնձե դետալները կարող են օքսիդանալ, իսկ այդ հանգամանքը անթույլատրելի է:

Նեկայումս գոյություն ունեցող պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար, հիմնականում, օգտագործվում են արծաթե զոդանյութերը և հատկապես Au – Cu համաձուլվածքի տարատեսակ տարբերակներով: Նրանցից ամենալայն տարածումն է գտել 72% Ag և 28% Cu զոդանյութը(ՈՐ72), որի հալման ջերմաստիճանը հավասար է 778°C : Au – Cu համակարգի զոդանյութերը լայն տարածում են գտել արագացուցչային տեխնիկայում, քանի որ նրանք չեն պարունակում այնպիսի էլեմենտներ, որոնք ունեն բարձր գոլորշիացման աստիճան: Մեկ այլ հանգամանք է հանդիսանում այդ զոդանյութերի բարձր էլեկտրահաղորդականությունը, որը կարելի է համարել պղնձե միացության ամենակարևոր հատկանիշը: Նկար 3.1-ում բերված է Ag – Cu վիճակի դիագրաման՝



Նկ. 3.1 Ag – Cu վիճակի դիագրաման [56]

Արագացուցչային տեխնիկայում, ինչպես նաև մեքենաշինության գրեթե բոլոր ճյուղերում, զոդման եղանակի կիրառման ժամանակ անհրաժեշտություն կա օգտագործել տարբեր հալման ջերմաստիճաններ ունեցող զոդանյութեր: Արագացուցչային տեխնիկայում այդ հանգամանքը անհրաժեշտ է՝ ելնելով հետևյալ փաստերից՝

- պղնձե արագացնող կառուցվածքների երկարությունը կարող է հասնել մի քանի մետրերի, և հաճախ անհրաժեշտություն կա մեկ, կամ մի քանի պատրաստի զոդված(բարձր հալման ջերմաստիճանի զոդանյութով) կառուցվածքներ զոդել միմյանց(ցածր հալման ջերմաստիճանի զոդանյութով):

- կախված պղնձե արագացնող կառուցվածքների և տարատեսակ չափիչ սարքերի դիզայնից, որոնք կարող են ունենալ կառուցվածքի հիմնական առանցքին ուղղահայաց դիրքով տեղակայված կցաշտրթեր, նրանք պատրաստվում են հորիզոնական և ուղղահայաց վառարաններում:

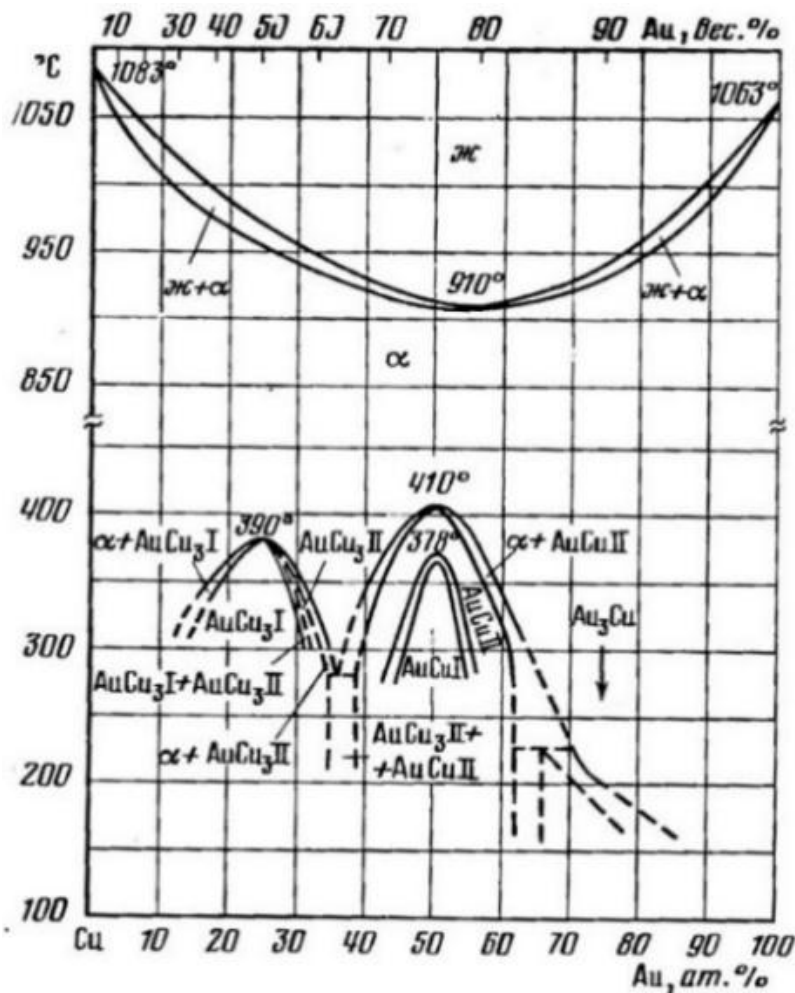
Արդյունքում տարբեր հալման ջերմաստիճաններ ունեցող զոդանյութերը ջերմաստիճանի տեսակետից կիրառվում են նվազման կարգով: Դա նշանակում է, որ ամեն հաջորդ միացություն ստանալու համար պետք է կիրառել ավելի ցածր հալման ջերմաստիճան ունեցող զոդանյութ: Աղյուսակ 3.1-ում բերված են արագացուցչային տեխնիկայում կիրառվող արծաթե զոդանյութերի տեսակները:

Աղյուսակ 3.1 [56]

Զոդանյութ	Զոդանյութի բաղադրություն, %		Ջերմաստիճան °C		Խտություն գ/սմ ³
	Ag	Cu	լիկվիդուս	զոդում	
ՄСр92	92.5	7.3	890	899-930	9.9
ՄСр72	72	28	778	780-900	9.9
ՄСр71	67	33	645	825-840	9.8
ՄСр50	50±0.5	50±0.5	850	850-950	9.3

Արծաթե զոդանյութերից զատ, պղնձե արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար, լայն կիրառություն են գտել նաև ոսկյա զոդանյութերը: Վերջիններս օժտված են մի շարք հատկանշական առավելություններով՝ բարձր ջերմակայունություն(500°C), բարձր պլաստիկություն և բարձր կայունություն կոռոզիայի նկատմամբ մթնոլորտային պայմաններում, ինչպես նաև ագրեսիվ միջավայրերում:

Նկար 3.2-ում բերված է Au-Cu վիճակի դիագրաման, որտեղից էլ երևում է, որ պղնձե համաձուլվածքի մինիմում հալման ջերմաստիճանը 18% Au-ով մոտավորապես հավասար 980°C-ի, իսկ 82,5% Au-ով հավասար է 955°C-ի: Ինչպես նաև աղյուսակ 3.2-ում [25] նշված են արագացնող կառուցվածքների վակուումային զոդման համար կիրառվող Au-Cu զոդանյութերի տեսակները:



Նկ. 3.2 Au-Cu վիճակի դիագրաման [56]

Աղյուսակ 3.2 [27]

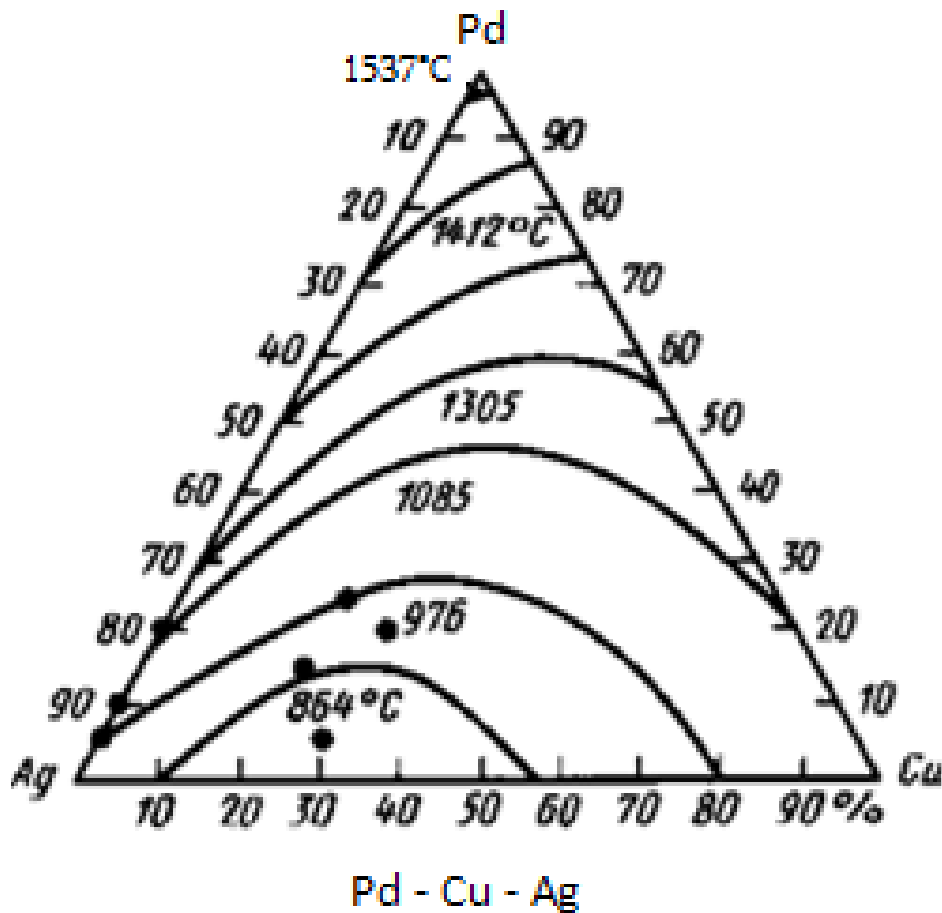
Զոդանյութի բաղադրություն, %		Ջերմաստիճան °C
Au	Cu	զոդում
25	75	890
35	65	778
50	50	850

Արագացնող կառուցվածքների զոդման համար բավականին լայն կիրառություն են գտել նաև այն զոդանյութերը, որոնք պարունակում են պալադիում:

Զոդանյութում պալադիումի կիրառումը, որպես հիմնական մետաղ, կամ լեգիրացնող, հնարավորություն է տալիս ստանալ զոդանյութեր, որոնց հալման ջերմաստիճանը տատանվում է 810°C-ից մինչև 1552°C: Հայտնի է 72Ag/28Cu զոդանյութի մեջ

պալադիումով լեգիրացումը հնարավորություն է տալիս բարձրացնել զոդանյութի ամրությունը, ինչպես նաև կոռոզիոն կայունությունը [56]:

Ջողման գործընթացի մեջ շատ կարևոր դեր է խաղում միացվող մակերևույթների միջև գոյություն ունեցող անկյունը, որը կոչվում է թրջման անկյուն, և 10-12% պալադիումով արծաթե զոդանյութերի կիրառման ժամանակ նշված անկյունը հնարավոր է դառնում իջեցնել ընդհուպ մինչև զրոյի:



Նկ.3.3 Pd-Au-Cu վիճակի դիագրաման [56]

Իսկ 72Ag/28Cu զոդանյութում 6% պալադիումի լեգիրացումը հնարավորություն է տալիս բարձրացնել միացության վակուումային հերմետիկությունը: Նկար 3.3-ում բերված է Pd- Cu -Ag վիճակի դիագրաման: Ինչպես նաև կարելի է նշել, որ պալադիումով զոդանյութերի բարձր թրջելիության հատկությունը հնարավորություն է տալիս զոդել 0,05-0,5մմ բացակների դեպքում: Աղյուսակ 3.3-ում բերված են պալադիումով զոդանյութերի որոշ տեսակները:

Աղյուսակ 3.3 [56]:

Զոդանյութի բաղադրություն, %			Ջերմաստիճան °C		
Pd	Ag	Cu	սովիդուս	լիկվիդուս	զոդում
5	68,4	26,6	807	810	815
5	95	-	970	1010	1015
10	58,5	31,5	824	852	860
15	65	20	850	900	905
20	52	28	879	898	905
25	54	21	901	950	955

3.2 Cu-Ag միացման զոնայի միկրոստրուկտուրային հետազոտություններ

Նյութերի մակերևույթային շերտերը հետազոտելու համար լայն կիրառելիություն են գտել մետաղագրական միկրոսկոպները: Մետաղագրական միկրոսկոպները համարվում են օպտիկական միկրոսկոպների տարատեսակներից մեկը, որոնք նախատեսված են խառնուրդների, համաձուլվածքների և այլ կարծր, առավելապես անթափանց նյութերի հետազոտման համար (միկրոսկոպիա):



Խոշորացման տիրույթ	50x -1600x
Պտտվող սարքեր	4
Սեղանի չափսեր	180x165 մմ
Ֆիլտրներ	Կապույտ, կանաչ, կարմիր, սպիտակ
Թվային Ֆոտոխցիկ	CMOS 9Mpx

Նկ.3.4 MMT-9C Մետաղագրական միկրոսկոպ իր տեխնիկական տվյալներով

Պղնձե արագացնող կառուցվածքների դետալների զոդման հետազոտությունների համար նախատեսված բոլոր փորձանմուշներից պատրաստված հղկուկները ուսումնասիրվել են MMT-9C մակնիշի միկրոսկոպի օգնությամբ, որը պատկերված է նկար 3.4-ում իր տեխնիկական տվյալներով: MMT-9C մակնիշի մետաղագրական միկրոսկոպը հանդիսանում է ունիվերսալ միկրոսկոպ և հնարավորություն է տալիս կատարել հետազոտություններ հետևյալ մեթոդներով.

1. լույսի անդրադարձմամբ, ինչպես լուսային, այնպես էլ մութ դաշտերի մեթոդներով:
2. Բևեռացման մեթոդով:
3. Թափանցիկ և կիսաթափանցիկ նյութերի հետազոտություն թափանցող լույսով:

Մանրադիտակի լուսավորող սարքը համապատասխան տիրույթով ապահովում է հավասարաչափ լույսով, առանց կետիկների: Տվյալ մանրադիտակում օգտագործվում

են հալոգենային լամպեր 50Վտ հզորությամբ: Հավասարաչափ բաշխված լույսը փոքրացնում է տեսողական հոգնածությունը և ստեղծում է հարմարավետ պայմաններ միկրոսկոպով աշխատողների համար: Լույսի լուսային անրադարձիչում նախատեսված են մի քանի լուսային ֆիլտրեր՝ կապույտ, կանաչ և այլն, որոնք հեշտությամբ կարող են փոփոխվել:

Զոդված հանգույցի կարից համապատասխան մակերևույթով հղկուկ պատրաստելու համար նախ կտրվում է զոդման կարի տեղամասը ընդգրկող մի հատված մեխանիկական հաստոցի օգնությամբ: Այնուհետև կատարվում է ստացված նմուշի ալմաստային փոշիների օգնությամբ մշակում: Սկզբից նմուշը մշակվում է մեծ հատիկների չափեր ունեցող ալմաստային փոշու օգնությամբ, այնուհետև 20-30 մկմ չափեր ունեցող փոշիներով, և վերջնական փուլում 8-12 չափեր ունեցող փոշիների օգնությամբ [79]:

Ստանալով համապատասխան մակերևույթով հղկուկ, նրա մակերևույթի որակական հատկությունները ավելի լավացնելու համար մինչև մանրադիտակով ուսումնասիրությունը կատարվում է վերջինիս խաճատում [80]: Խաճատումը իրականացվում է աղաթթվի օգնությամբ: Աղաթթվի լուծույթի մեջ իջեցնելով համապատասխան մետաղները, դրա ազդեցության ներքո քայքայվում են մետաղների մակերևույթային շերտում առկա օքսիդային շերտերը: Խաճատման պրոցեսը պետք է իրականացնել այնպես, որպեսզի տվյալ նմուշը կազմող մետաղը ինչքան հնարավոր է քիչ քայքայվի: Աղաթթվի լուծույթի միջավայրում մետաղի և նրա մակերևույթային օքսիդային շերտի քայքայման արագությունը կախված է մետաղի տեսակից, աղաթթվի բաղադրությունից, տվյալ պրոցեսի ջերմաստիճանից և այլ պարամետրերից, որոնք յուրաքանչյուր դեպքի համար կարող են տարբեր լինել:

Սարքավորումները, որոնք նախատեսված են խաճատման համար, իրենցից ներկայացնում են փայտյա կամ այլ նյութերից պատրաստված տարաներ, որոնք ներսից պատված են աղաթթուների նկատմամբ կայուն նյութերով:

Ստորև բերված են պղնձե փորձանմուշները, որոնք անցել են արագացնող կառուցվածքների պատրաստման ողջ պրոցեսներով: Այդ փորձանմուշները պատրաստվել են զոդման գործընթացի մի շարք տեխնոլոգիական պարամետրերի

փորձարարական որոշման համար՝

- Զերմաստիճանային պայմանները
- Որոշված ջերմաստիճանում պահպանման ժամանակը
- Միացման բացակի չափը
- Զոդանյութի քանակը
- Զոդանյութի դիրքը
- Կիրառվող ուժի չափը



Նկ. 3.5 Պղնձե փորձանմուշների ընդհանուր տեսքը

Վերը նշված պարամետրերից է կախված այդ փորձանմուշների որակյալ լինելու հանգամանքը, և այն ստուգվում է նրանց միկրոստրուկտուրաների

հետազոտությունների միջոցով: Նկար 3.5-ում բերված են վերը նշված փորձանմուշների որոշ մասը, որոնք նախապատրաստված են միկրոստրուկտուրային հետազոտությունների համար:

Արագացնող կառուցվածքների զոդման գործընթացի որակյալ լինելու կարևորագույն պահանջներից մեկն այն է, որ զոդանյութը ոչ մի դեպքում չներթափանցի կառուցվածքի ներքին մակերևույթ: Նկ.3.6(ա և բ)-ում պարզ երևում է, թե ինչպես է զոդանյութը ներթափանցել փորձանմուշների ներքին մակերևույթ: Այդ խնդիրը, հիմնականում, կախված է երկու շատ կարևոր պարամետրերից՝ առաջինը՝ դա, կիրառվող ուժն է, իսկ երկրորդը զոդանյութի ակոսի ձևն է:



Նկ. 3.6(ա) - Պղնձե փորձանմուշի կտրվածք տեսքը (զոդանյութը ներթափանցած ներքին մակերևույթներին)



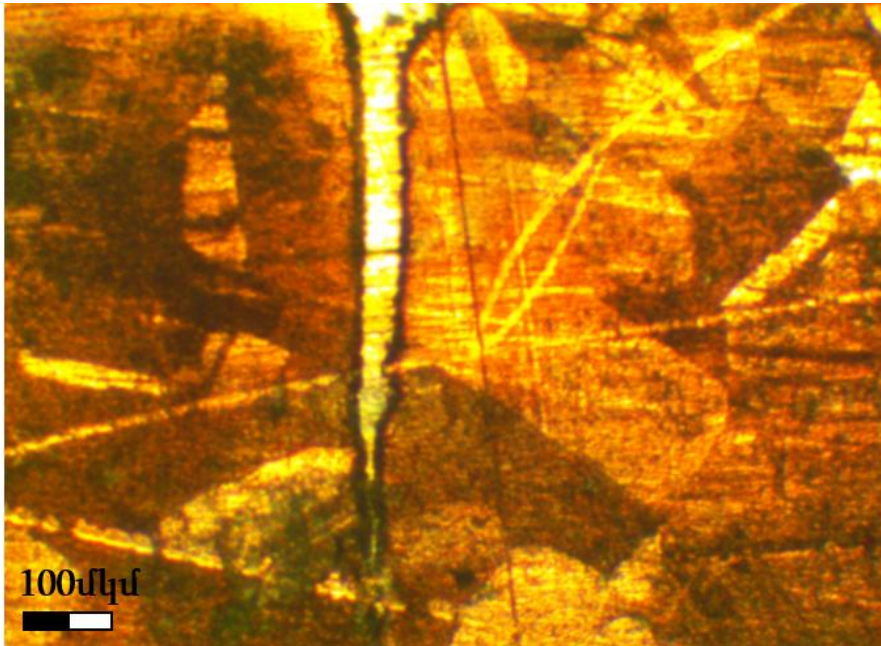
Նկ. 3.6(բ) - Պղնձե փորձանմուշի կտրվածք տեսքը (զոդանյութը ներթափանցած ներքին մակերևույթներին)



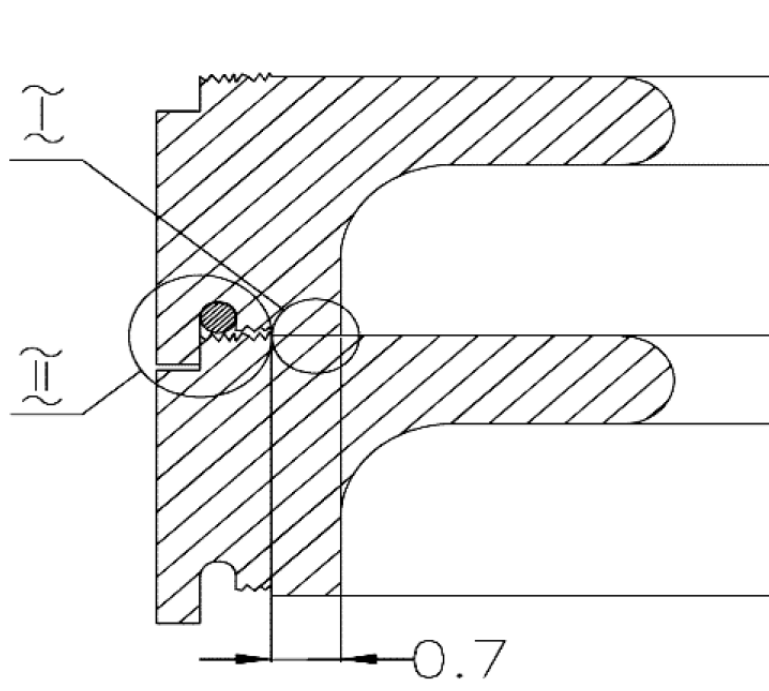
Նկ. 3.7 Պղնձե վերջնական փորձանմուշի ընդհանուր տեսքը

Հետազոտությունների արդյունքում որոշվել է զոդման գործընթացի այն

օպտիմալ պարամետրերը և պայմանները, որոնց դեպքում հնարավոր է դառնում ստանալ որակյալ վակուումային զոդում: Նկար 3.7-ում բերված է ստացված վերջնական փորձանմուշը և նկար 3.8-ում ներկայացված է նրա միկրոստրուկտուրան:



Նկ. 3.8 Պղնձե վերջնական փորձանմուշի միկրոստրուկտուրան (x200)



Նկ. 3.9 Պղնձե դետալների միացման տեխնոլոգիական հատվածը

Ինչպես նաև ներկայացված է զոդանյութի համար նախատեսված տեխնոլոգիական կոնստրուկցիան, որի սխեման բերված է նկար 3.9-ում:

Փորձարարական հետազոտություններից հետո վակուումային զոդման համար ընտրվել է նկար-3.9-ում ներկայացված տեխնոլոգիական լուծումը, և այն կիրառվել է պղնձե արագացնող կառուցվածքների դետալների վակուումային զոդման համար:

3.3 Փորձարարական հետազոտությունների գնահատականը չժանգոտվող պողպատի և պղնձի զոդման ժամանակ

Չնայած երկմետաղների ստացման որոշակի դժվարությունների առկայությանը՝ նրանք ժամանակակից արագացուցչային տեխնիկայում օգտագործվում են մեծ ծավալներով: Դա հիմնավորվում է երկմետաղների տեխնիկական հրատապ խնդիրների անրաժեշտությունը և նրանք օգտագործվում են զարգացած տեխնիկական կառուցվածքներում՝ ատոմային, վակուումային, կրիոգենիկ, հրթիռային սարքավորումներում [81,82]:

Այդ կառուցվածքներում, կամ, նրանց հանգույցներում օգտագործվում են երկմետաղների միացման բազմաթիվ տարբերակներ չժանգոտվող պողպատից, պղնձից, գլիդկոպից, ալյումինից, տիտանից, մոլիբդենից, նիոբիումից, կովարից և այլն: Այս տարբեր զույգեր մետաղների միացման համար օգտագործվում են հալման մեթոդով եռակցումներ, մակահալում, ճնշմամբ եռակցում, դիֆուզիոն եռակցում, եռակցում պայթեցման մեթոդով և զոդման տարբեր եղանակներ:

Երկմետաղների առավելագույն զույգերը միմյանցից տարբերվում են իրենց բնութագրերով՝ հալման ջերմաստիճանով, խտությամբ, ջերմաֆիզիկական հատկություններով, հատկապես, գծային ընդարձակման գործակցով և բյուրեղագրաֆիկական բնութագրերով՝ ցանցի ձևով և պարամետրերով, ինչպես նաև փոխադարձ լուծելիությամբ:

Այնպիսի մետաղներ, ինչպիսիք են՝ չժանգոտվող պողպատը, տիտանը, նիոբիումը, տանտալը և մոլիբդենը, իսկ համաձուլվածքներից՝ գլիդկոպը, առաջացնում են լրացուցիչ դժվարություններ՝ կապված նրա հետ, որ այդ մետաղները տաքացման ժամանակ ակտիվ փոխազդեցության մեջ են մտնում գազերի հետ և որոնց կլանման ժամանակ կտրուկ վատացնում են եռակցման միացությունների հատկությունները: Շատ դեպքերում երկմետաղների եռակցման զույգերի բավարար լուծելիության դեպքում դժվար է խուսափել կայուն միջմետաղական ֆազաներից, որոնք ունեն բարձր կարծրություն և փխրունություն [83]:

Երկմետաղների եռակցման դժվարությունը կայանում է նրանում, որ նրանք

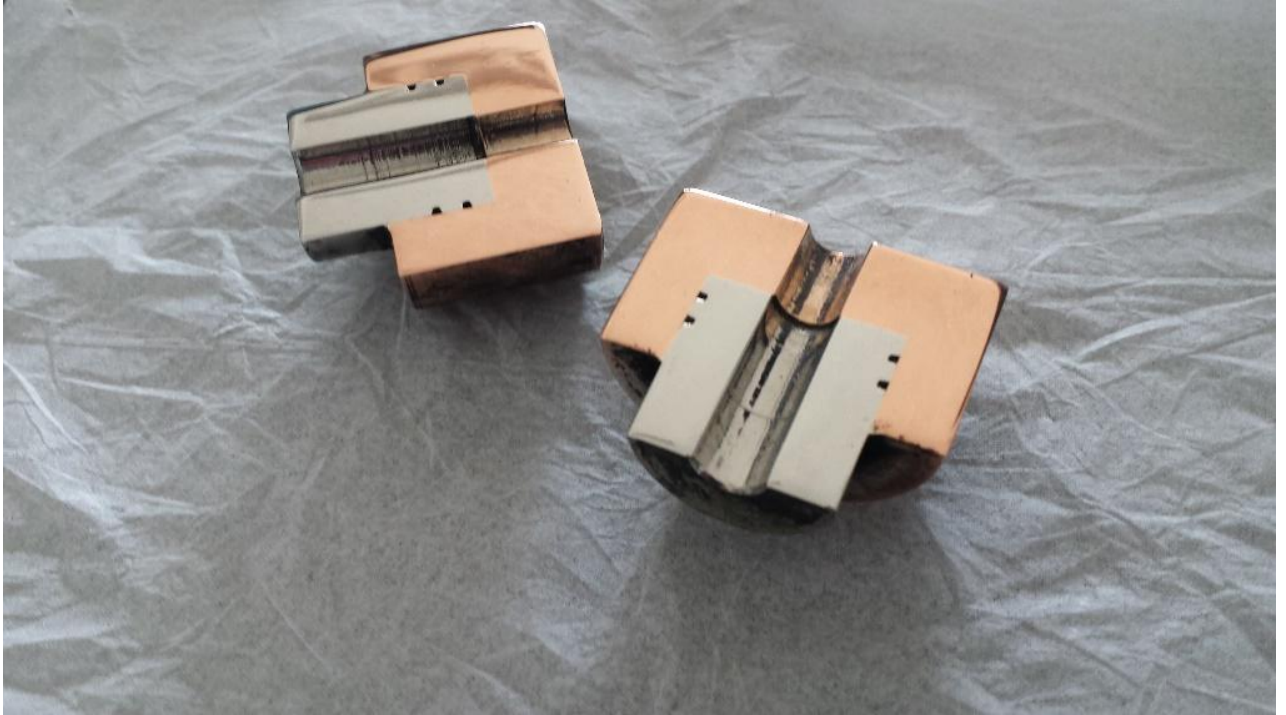
տարբերվում են միմյանցից ֆիզիկական, մեխանիկական և ֆիզիկաքիմիական հատկություններով, որոնք արտահայտվում են ինչպես միացվող մետաղների փոխազդեցության ժամանակ, այնպես էլ նաև նոր առաջացված ֆազանների փոխազդեցությունից:

Որոշ երկմետաղների և համաձուլվածքների եռակցումը նպատակահարմար է կատարել միջանկյալ թաղանթների միջոցով, որոնք կարող են կանխել փխրուն միջմետաղական ֆազաների առաջացումը և որոշ դեպքերում իջեցնել եռակցման պահանջվող ջերմաստիճանը, բացի դրանից փոքրացնել մնացորդային դեֆորմացիաները, որոնք առաջանում են տարբեր ջերմային ընդարձակման գործակից ունեցող նյութերի ժամանակ, ակտիվացնել եռակցվող մակերևույթները և մեծացնել դիֆուզիոն պրոցեսների ինտենսիվությունը:

Ժամանակակից տեխնոլոգիաների պահանջները և զարգացման հեռանկարները թելադրում են ստեղծել նոր երկմետաղական զույգեր՝ տարբեր մեխանիկական և տեխնոլոգիական հատկություններով: Միավորելով բազմաթիվ բաղադրիչներ մի կառուցվածքի մեջ՝ մեզ թույլ է տալիս ստանալ միանգամից նոր երկմետաղական նյութ՝ միանգամայն նոր հատկություններ, որոնք տարբերվում են իրենց բաղադրամասերից: Հիմնվելով հայտնի աշխատանքների վերլուծության վրա՝ գոյություն ունեցող երկմետաղների ստացման տեխնոլոգիաները հիմնված են, հիմնականում, մետաղական կոմպոնենտների փոխակերպման վրա. հեղուկ և պինդ ֆազաներում՝ ձևավորելով շերտեր: Արագացուցչային տեխնիկայում արդեն պատրաստված հանգույցների վրա օգտագործվող անցումների համար նպատակահարմար է օգտագործել 316 L մակնիշի չժանգոտվող պողպատը: Վակուումային զոդումը չժանգոտվող 316 L պողպատի և պղնձի հետ կատարվել է 56%-ոց արծաթե զոդանյութով նկար 3.10: Չժանգոտվող պողպատը և նրա միացումը հիմնական հանգույցի հետ զոդել ավելի ցածր հալման ջերմաստիճան ունեցող զոդանյութի միջոցով, վակուումում կամ իներտ գազերի միջավայրում:

Ստացված փորձանմուշների ուսումնասիրությունների արդյունքում ստացվել է վակուումահերմետիկ միացում, և քանի որ փորձանմուշների միացման երկայնքով արված է անցք, վակուումային հերմետիկությունը ստուգելու նպատակով, միացման

կարի քայքայումը կատարված է ոչ ստանդարտ եղանակներով (նկար 3.11): Միացման կարի ամրությունը գնահատվում է 25կգ/մմ²:



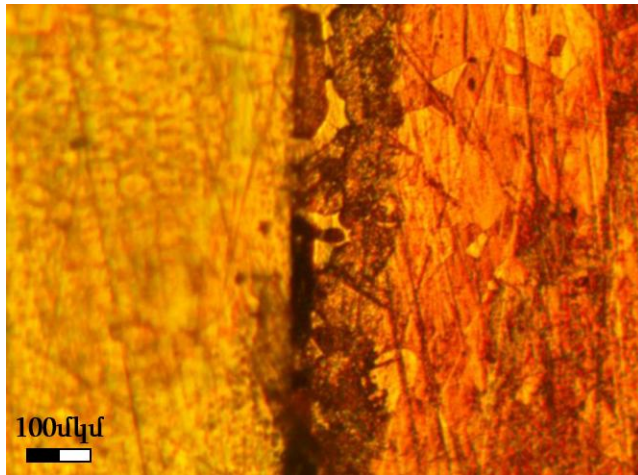
Նկ. 3.10 Չժանգոտվող պողպատի և պղնձի վակուումում զոդված փորձանմուշներ



Նկ. 3.11 Չժանգոտվող պողպատի և պղնձի վակուումում զոդված փորձանմուշների քայքայման ենթարկված արդյունքները

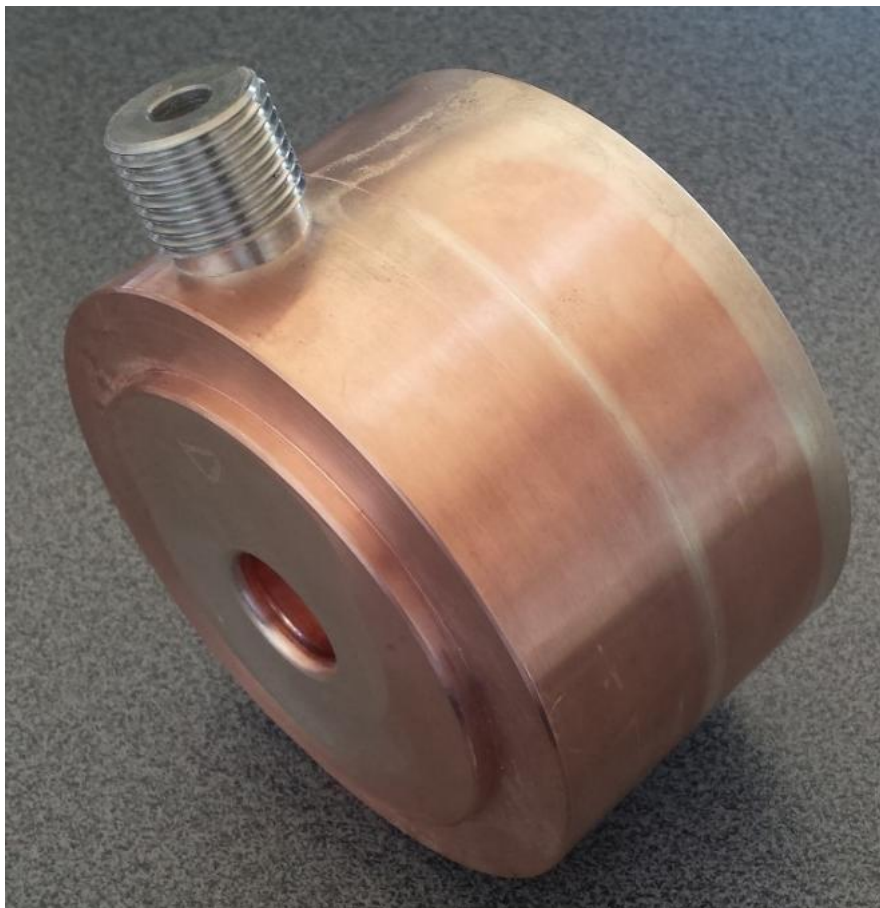
Մետաղագիտական ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս (նկար 3.12), որ զոդանոյթը

թափանցել է պղնձի բյուրեղների հատիկների ամբողջ երկայնքով, իսկ ջժանգոտվող պողպատի կողմից փոխկապակցություն է ստեղծվել նիկելի հետ:



200x

Նկ. 3.12 Ջժանգոտվող պողպատի և պղնձի վակուումում զոդված փորձանմուշի միկրոստրուկտուրան



Նկ. 3.13 Ջժանգոտվող պողպատի և պղնձի վակուումում զոդված իրական հանգույցի տեսքը
Հարկ է նշել, որ նկար 3.13-ում բերված հանգույցի(պղինձ-ջժանգոտվող պողպատ)

զոդման ժամանակ օգտագործվում է հարմարանք անհրաժեշտ ճնշում ապահովելու նպատակով՝ համաձայն [84]. Չժանգոտվող պողպատի և պղնձի զոդումը պետք է իրականացնել ավելի ցածր ջերմաստիճանում:

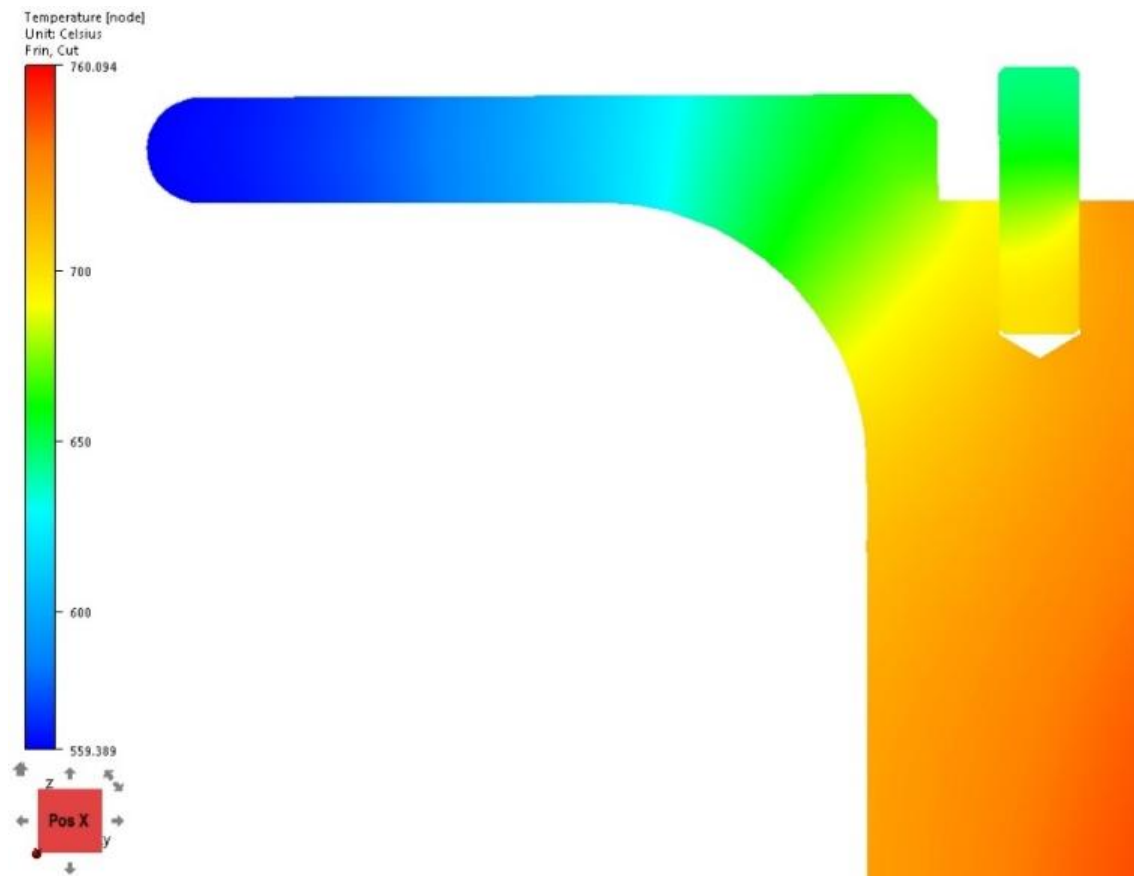
3.4 Արագացուցչային տեխնիկայում ճշգրիտ դետալների դիրքավորման խնդիրները

Արագացուցչային տեխնիկայում օգտագործվում են տարբեր տեսակի արագացնող կառուցվածքներ, և նրանց պատրաստման համար շատ կարևոր հանգամանքներից մեկն է հանդիսանում առանձնակի դետալների մեկը մյուսի նկատմամբ ճշգրիտ բազավորման խնդիրը: Լինելով բավականին բարդ խնդիր, այն կարող է լուծվել շատ պարզ ինժեներական մեթոդով: Հատկապես, մեր արագացնող կառուցվածքների պղնձե դետալների ճշգրիտ բազավորման համար, զոդման գործընթացից առաջ, առաջարկվում է օգտագործել բույթավորման(штифтования) սկզբունքը: Նշված բույթերը(штифты) պատրաստված են 304L մակնիշի, 3մմ տրամագծով, չժանգոտվող պողպատից: Ինչպես նաև հարկ է նշել, որ յուրաքանչյուր պղնձե դետալների զույգի բազավորման համար օգտագործվել է երկուական բույթ: Քանի որ արագացնող կառուցվածքի զոդման գործընթացի ժամանակ նրա բոլոր դետալները տաքացվում են, ապա տարբեր մետաղների կիրառման ժամանակ կարող են առաջանալ սեղմող լարումներ: Այդ լարումները առաջանում են, քանի որ տաքացման ժամանակ տարբեր մետաղներ ունեն տարբեր ջերմային ընդարձակման գործակիցներ: Ոչ ճշգրիտ հետազոտությունների արդյունքում կարող են առաջանալ անդառնալի խնդիրներ:

Արագացնող կառուցվածքների պղնձե դետալների և չժանգոտվող պողպատից պատրաստված բույթի միջև առաջացող հնարավոր լարումների հետազոտության համար իրականացվել է համակարգչային մոդելավորում վերջավոր էլեմենտների մեթոդով: Հաշվարկը կատարվել է մեկ բույթի համար և ընդունվել է, որ արդյունքները մնացածների համար կլինեն բացառապես նույնը: Նկար 3.14-ում ներկայացված վերը նշված մոդելավորման արդյունքները ցույց են տալիս ջերմաստիճանային դաշտի տարածումը արագացնող կառուցվածքի պղնձե դետալի և բույթի կտրվածքի վրա:

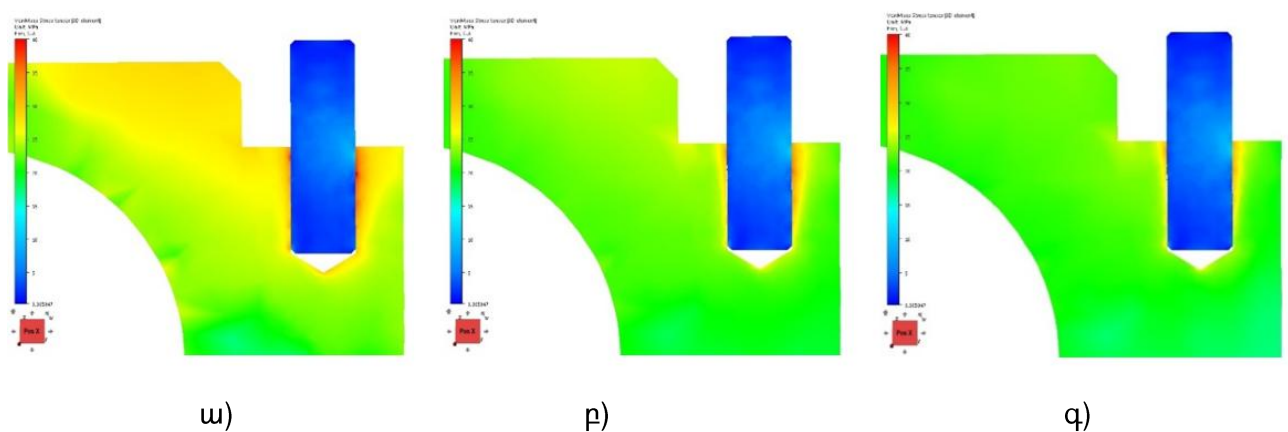
Մոդելավորման կատարման ժամանակ ընդունվել է, որ մինչև անհրաժեշտ տաքացման ջերմաստիճանին հասնելու ժամանակահատվածը հավասար է 2700վրկ: Ընդ որում որպես վերջնական ջերմաստիճան ընդունվել է 700°C-ը, քանի որ այդ ջերմաստիճանից բարձր պղինձը, ի համեմատ չժանգոտվող պողպատի, դառնում է

բավականին փափուկ, և այդ դեպքում վերանում են որևէ տեսակի լարվածային պրոցեսները:



Նկ. 3.14 Ջերմաստիճանի տարածումը դետալների կտրվածք տեսքում

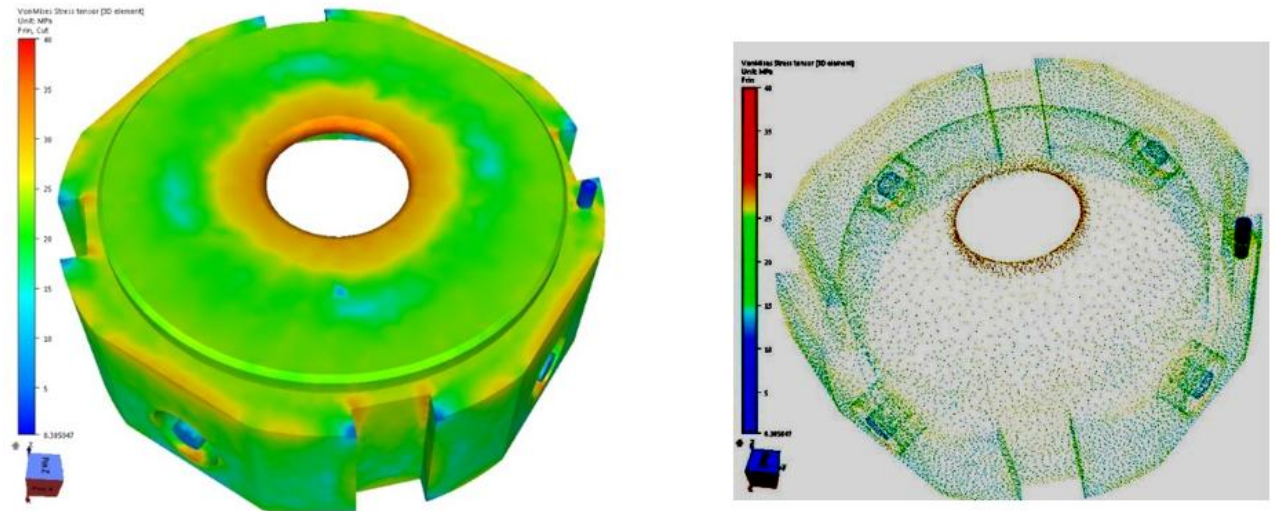
Ստորև բերված է նաև տարբեր ժամանակային հատվածներում պղնձի դետալի ներքին մակերևույթի լարվածային վիճակները՝ նկար 3.15-ում:



Նկ. 3.15 Պղնձե դետալի լարվածային վիճակը. ա) - 200վրկ, բ) – 700վրկ, գ) – 2700վրկ

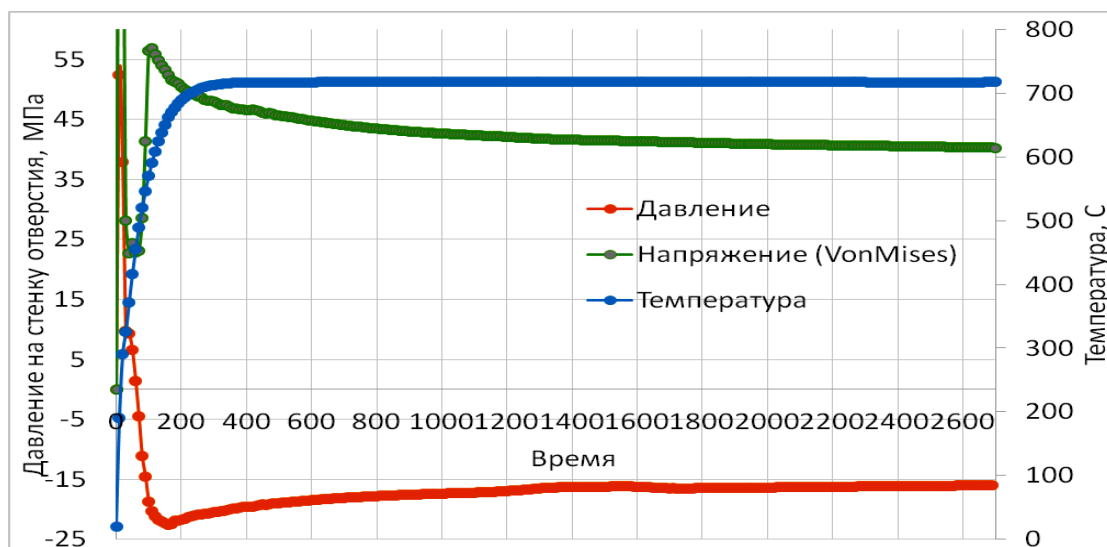
Ինչպես երևում է վերը բերված նկարներից, 700վրկ տաքացնելուց հետո լարվածային վիճակը փոփոխվում է չնչին չափով: Հարկ է նաև նշել, որ լարվածային

վիճակի տեղայնացումը, հիմնականում, առաջանում է բույթի անցքի շրջակայքում և չի տարածվում պղնձե դետալի ներքին կարևոր մակերևույթներին: Մոդելավորված դետալի ընդհանուր տեսքը և արդյունքները եռաչափ մոդելում բերված են նկար 3.16-ում:



Նկ. 3.16 Մոդելավորված դետալի ընդհանուր տեսքը և արդյունքները եռաչափ մոդելում

Բազավորման բույթի անցքի մակերևույթի լարումների տարածումը ներկայացված է նկար.17-ում և բերված են լարումների տարածման արդյունքները, որոնք առաջանում են պղնձե դետալների բազավորման բույթի անցքի մակերևույթին:



Նկ. 3.17 Բույթի անցքի մակերևույթին ջերմաստիճանի և լարումների փոփոխության գրաֆիկ

Վերը նշված գրաֆիկից երևում է, որ բույթի ջերմաստիճանային ընդարձակման ազդեցությունը սկսվում է 30-րդ վայրկյանից: Սկզբնական շրջանում լարումները

դրական են, քանի որ անցքը տաքացման արդյունքում մեծանում է, սակայն դրանից հետո բացասական լարումների առաջացումը ցույց է տալիս, որ որոշ ժամանակ անց սկսվում է այդ մակերևույթների սեղմում: Այդ սեղմման պրոցեսը սկսվում է մոտավորապես 60-րդ վայրկյանին և տևում է մինչև զոդման գործընթացի վերջը: Ընդ որում հարկ է նաև նշել, որ նշված մակերևույթի սեղմման ինտեսիվությունը սկզբնական շրջանում մեծ է, սակայն որոշ ժամանակ անց այն աստիճանաբար ցածրանում է:

ԳԼՈՒԽ 4. ԱՐԱԳԱՅՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՊԱՏՐԱՍՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ԱՆՀՐԱԺԵՇՏ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ և ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ, ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ ՈՒ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒՄ

4.1 Ջերմային դաշտի փոխանցման հաշվարկն ու մոդելավորումը արագացնող կառուցվածքների տաքացման ժամանակ

Ժամանակակից պղնձե արագացնող կառուցվածքների ոլորտում հետազոտությունները ցույց տվեցին, որ վերջին տասնամյակներում արագացուցչային տեխնիկայում նկատվում է նրանց պատրաստման տեխնոլոգիաների բավականին լուրջ պահանջարկ [85]: Արագացնող կառուցվածքների նախագծումն ու պատրաստումը իրենից ներկայացնում է բարդ տեխնոլոգիա և, հիմնականում, նրանց պատրաստման համար անհրաժեշտ է իրականացնել հետևյալ գործընթացները՝

1. Ստանալ մետաղի հավասարաչափ ստրուկտուրա: Ջերմամշակել նախապատրաստվածքները մեխանիկական մշակումից առաջ: Կատարել մեխանիկական ճշգրիտ մշակում նախապես որոշված և հաստատված կտրող գործիքներով, ինչպես նաև այդ գործընթացի ընթացքում շատ կարևոր դեր ունի քսուկահովացնող հեղուկի ընտրությունը: Պատրաստի դետալների մեխանիկական և ֆիզիկական չափումների ստուգումն ու վերահսկումը նույնպես շատ կարևոր է:
2. Պատրաստի դետալների էլեկտրաքիմիական փայլեցում, դետալների մաքրում գերձայնային եղանակով, այնուհետև պղնձե դետալների պահպանում, կա՛մ, վակուումային, կա՛մ էլ, իներտ գազերի միջավայրում:
3. Կատարվում է պղնձե դետալների ճշգրիտ հավաքում, որից հետո ընտրվում է տաքացման, միջավայրի(վակուում կամ իներտ գազերի միջավայր) և միացման եղանակի(դիֆուզիոն եռակցում կամ վակուումային զոդում) մեթոդները:

Դիֆուզիոն եռակցման եղանակի ժամանակ միացությունը գոյանում է միացվող մակերևույթների մոտեցման և լոկալ պլաստիկ դեֆորմացիայի շնորհիվ, որի

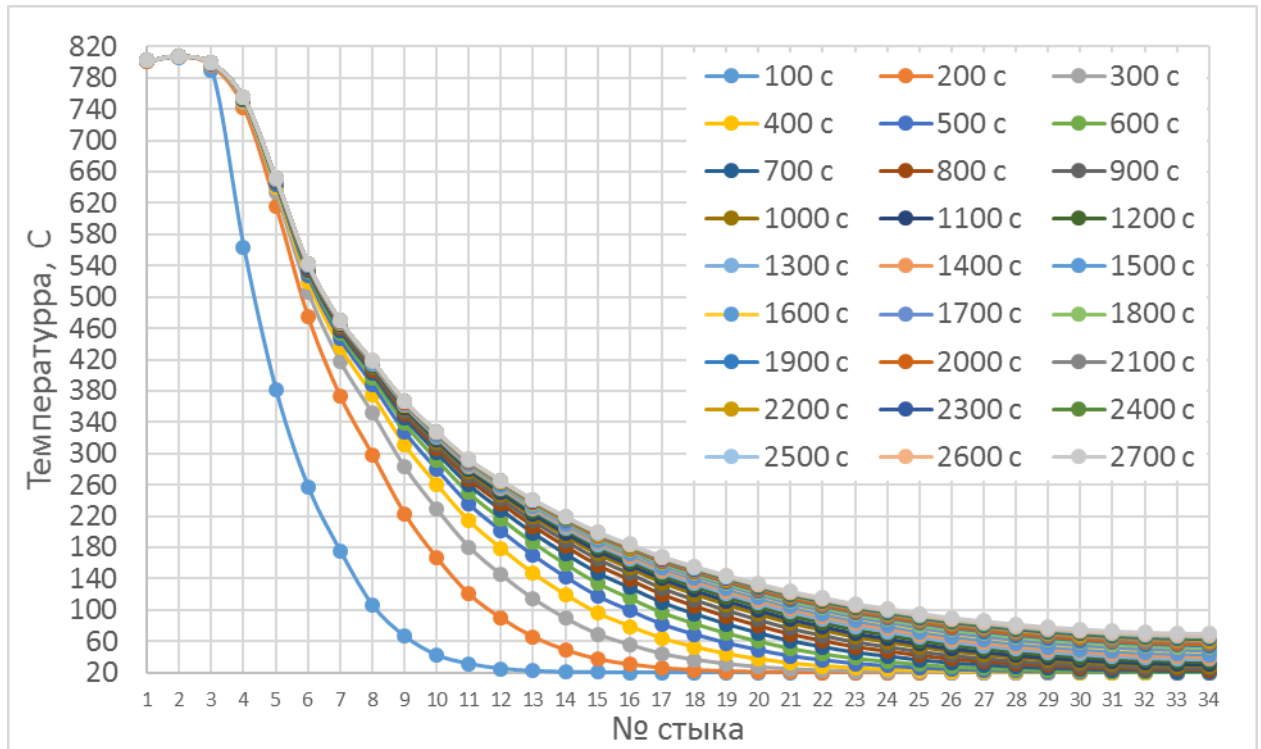
ընթացքում նրանք տաքացվում են: Զոդման ժամանակ մակերևույթների միացության գոյացումը տեղի է ունենում միացվող մետաղների հալման ջերմաստիճանից ավելի ցածր ջերմաստիճանով տաքացմամբ, թրջելով մակերևույթները զոդանյութով, որից հետո տեղի է ունենում զոդանյութի հոսքը դեպի բացակ, և այնուհետև զոդանյութը բյուրեղանում է[56]: Պղնձե արագացնող կառուցվածքի դետալների միացման համար օգտագործվող տաքացման մեթոդի ընտրության համար պետք է հաշվի առնել բոլոր մեթոդների առավելություններն ու թերությունները, և այստեղ ինդուկցիոն տաքացման մեթոդը ունի մի շարք առավելություններ ի համեմատ ճառագայթման մեթոդի, որը հիմնականում օգտագործվում է վառարաններում: Առավելությունները հետևյալներն են՝

- Զգալիորեն կրճատվում է զոդանյութի տաքացման ժամանակահատվածը
- Դետալների տաքացման պրոցեսը տեղի է ունենում պաշտպանիչ խցիկի միջոցով, այսինքն այնպիսի նյութերով, որոնք շատ քիչ են կլանում էլեկտրամագնիսական ալիքները և չեն տաքանում սարքավորման աշխատանքի ընթացքում, ինչպես նաև բացառվում է տաքացվող դետալների աղտոտումը:

Կատարվել է համակարգչային մոդելավորում պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդման ջերմաստիճանի բաշխման և վերահսկման հետազոտության համար [86]: Ինչպես նաև մոդելավորման ժամանակ հաշվի է առնվել այն փաստը, որ պղնձե դետալները տաքացվում են ինդուկցիոն տաքացման համակարգի միջոցով: Հաշվարկը և մոդելավորումը կատարվել է պղնձե դետալների մաքսիմալ քանակի համար, որոնք կարող են միաժամանակ տեղավորվել նոր վակուումային զոդման սարքավորման կվարցե խցիկի մեջ: Զոդման գործընթացը տեղի է ունենում վերևից դեպի ներքև և ամենավերևի երեք դետալների մաքսիմալ տաքացման ժամանակը մինչև զոդանյութի հալման ջերմաստիճան ընտրվել է 2700վրկ (45ր): Արդյունքում ստացվել են ջերմաստիճանային դաշտի բաշխման տվյալներ՝ արագացնող կառուցվածքի ողողությամբ դեպի ներքև: Նկար 4.1-ում ներկայացված են ջերմաստիճանային փոփոխությունը զոդման գոտիներում:

Մոդելավորման տվյալների հետազոտությունից պարզ երևում է, որ պղնձե դետալների համեմատաբար ավելի կարճ տաքացման ժամանակի դեպքում(100-

200վրկ) ջերմաստիճանային դաշտի տարածումը դեպի ներքևի դետալներ շատ ցածր է և հասնում է մինչև 9-14-րդ դետալներին: Դետալների տաքացման ժամանակի երկարացման հետ մեկտեղ երևում է, որ ջերմահաղորդականության շնորհիվ բարձրանում է նաև ջերմային հոսքի ներթափանցելիությունը:



Նկ. 4.1 Ջերմաստիճանային փոփոխությունը զոդման գոտիներում

Սակայն կա տաքացման ժամանակի մի այնպիսի արժեք, որի ժամանակ ջերմաստիճանի ներթափանցելիության ինտենսիվությունը զգալիորեն ընկնում է և չի մեծանում տաքացման ժամանակի բարձրացման դեպքում: Նկար 4.1-ից երևում է, որ այդ սահմանային գոտին է համարվում 900-1000վրկ տաքացման ժամանակը: Դետալների 1000վրկ տաքացման ժամանակից ավելի բարձրներում տաքացման պրոցեսը կարելի է համարել ստատիկ, հարկ է նաև նշել, որ հաշվի մեջ չեն մտնում ամենաներքևի դետալների 60-100°C:

Մեր դեպքում, երբ արագացնող կառուցվածքների զոդման համար օգտագործվում է ինդուկցիոն տաքացման մեթոդը, զոդման պրոցեսի ընթացքում կարևորագույն խնդիրներից մեկն է համարվում ինդուկտորի տեղաշարժման արագության որոշումը, որը հնարավորություն կտա ապահովել հավասարաչափ ջերմաստիճանային պայմաններ ողջ կառուցվածքի համար: Ինդուկտորի

տեղափոխության արագության որոշման համար օգտագործվել են վերը նշված ջերմային դաշտի տարածման տվյալները:

Որպես որոշիչ պարամետր ընդունում ենք ջերմության քանակը, որը փոխանցվում է տաքացվող դետալներին ինդուկտորից: Տարբեր տաքացման ժամանակների համար կստանանք ջերմության փոխանցման արագությունը Q/t : Ինչպես նաև հաշվարկին պետք է ավելացնել ջերմության փոխանցման արագությունը $\Delta Q/t$, որն առաջանում է ջերմահաղորդականության շնորհիվ: Ելնելով վերը նշված հանգամանքներից, կարելի է ստանալ ինդուկտորի տեղափոխման արագության հաշվարկման հավասարումը՝ կախված պահպանման ժամանակից:

$$V_{ind} = \frac{\frac{L}{Q'}}{\frac{n \cdot c_{cu} \cdot \Delta T \cdot \frac{m_{cu}}{t}} + \frac{Q^{\max} - Q_{n+1}}{3}} \quad (4.1)$$

L - ինդուկտորի երկարությունը

n - միաժամանակ տաքացվող պղնձե դետալների քանակը

c_{cu} - պղնձի ջերմունակությունը

m_{cu} - միաժամանակ տաքացվող պղնձե դետալների մասսան

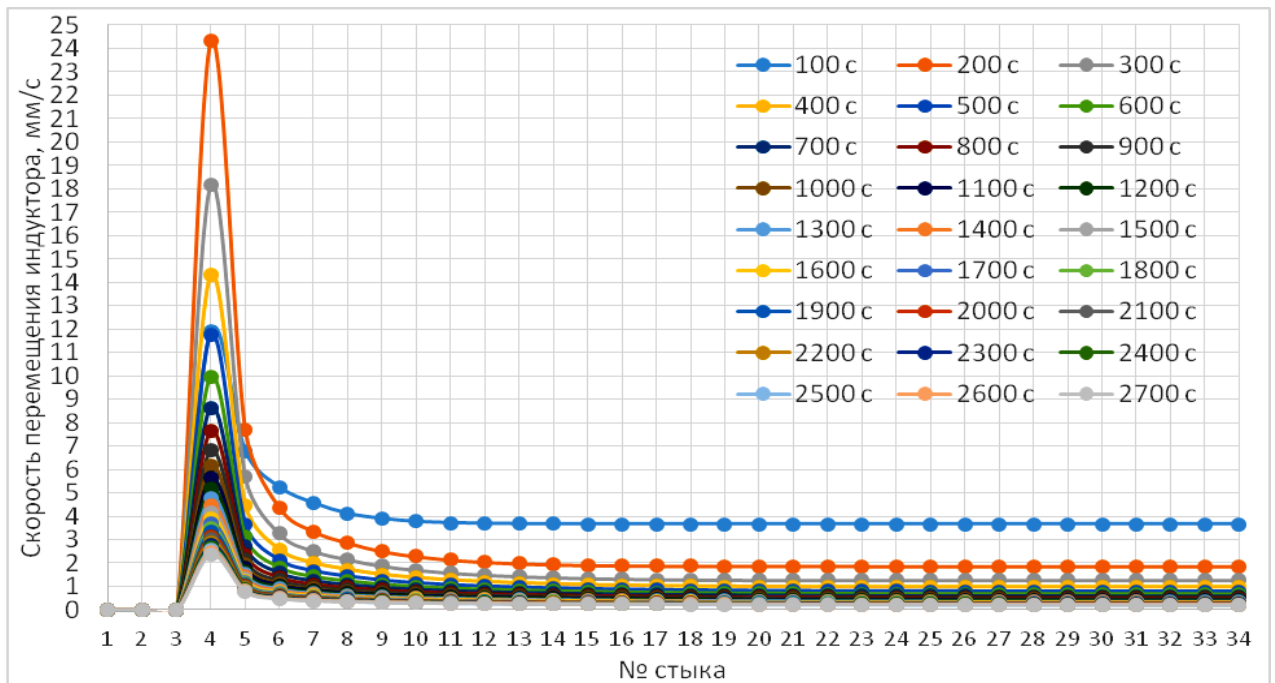
t - պահպանման ժամանակը

Q' - յուրաքանչյուր հաջորդ դետալի տաքացման համար անհրաժեշտ ջերմության քանակը

$Q^{\max}$ - մեկ դետալի տաքացման համար անհրաժեշտ ջերմության քանակը, մինիմալ ջերմաստիճանից մինչև պահանջվող

Q_{n+1} - ջերմահաղորդականությունից ստացված ջերմության քանակը

Այս հավասարման շնորհիվ հաշվարկվել է ինդուկտորի տեղափոխության արագությունը բոլոր միացման զոնաների համար, որի արդյունքները բերված են նկար 4.2-ում: Նկար 4.2-ից երևում է, որ ինդուկտորի տեղափոխման արագությունը միացման գոտիների համար տարբեր է: Սկզբնական շրջանում նրա տեղափոխման արագությունը համեմատաբար պետք է լինի ավելի արագ, քանի որ ամենավերևի պղնձե դետալները պղնձի բարձր ջերմահաղորդականության շնորհիվ կլինեն բավականին տաք:



Նկ. 4.2 ինդուկտորի տեղափոխման արագության փոփոխման արդյունքներ

Այնուհետև ինդուկտորի տեղափոխման արագությունը աստիճանաբար փոքրանում է և 13-15-րդ միացման գոտիներից հետո նրա արագությունը դառնում է հաստատուն: Հաշվարկում նաև հաշվի է առնված այն հանգամանքը, որ միաժամանակ տաքանում են պղնձե երեք դետալեր: Դա նշանակում է, որ տաքացման սկզբնական և վերջնական շրջաններում ինդուկտորի արագությունը հավասար է զրոյի:

4.2 Արագացնող կառուցվածքների վակուումային ինդուկցիոն զոդում

Ներկայումս գոյություն ունեցող արագացնող կառուցվածքների միացման հիմնական եղանակների(զոդում և դիֆուզիոն եռակցում) կիրառման ժամանակ հարկավոր է նրանց տաքացնել, որը իրականացվում է մի շարք տեխնոլոգիական պրոցեսների միջոցով: Նրանց տաքացման համար օգտագործվում են, հիմնականում, էլեկտրական վառարաններ և որոշակի դեպքերում կիրառվում են նաև ինդուկցիոն տաքացման սարքավորումներ:

Ավելի լայն տարածում գտած էլեկտրավառարանները իրարից տարբերվում են հետևյալ հանգամանքներով՝ կոնստրուկցիայի առանձնահատկություններով, աշխատանքային միջավայրով և ջերմաստիճանային տիրույթով:

Ըստ կոնստրուկցիայի տիպերի էլեկտրավառարանները, որոնք կիրառվում են արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար, հիմնականում, լինում են երկու տեսակի՝ հորիզոնական և ուղղահայաց: Ողջ ստրուկտուրան պատրաստելու համար ավելի լայն տարածում են գտել ուղղահայաց վառարանները, քանի որ այդ դեպքում կառուցվածքի վրա է գործում գրավիտացիոն ուժը, որը կառուցվածքի կշռի չափով, և հնարավորություն է տալիս լուծել ֆիքսացիոն խնդիրները: Սակայն այդ հանգամանքը նույնպես ունի իր թերությունները: Հորիզոնական վառարանները նույնպես անհրաժեշտ են արագացուցչային տեխնիկայում տարատեսակ գաբարիտային ոչ ստանդարտ դետալների միացման համար, և հատկապես այն դեպքում, երբ պղնձե արագացնող կառուցվածքների հիմնական առանցքին կան ուղղահայաց դիրքով տեղակայված դետալներ: Վերը նշված վառարանների աշխատանքային միջավայրերը, կախված միացվող դետալների պահանջներից, բոլոր հնարավոր տարբերակներից կարող են լինել երկու տիպի[53]՝

- վակուում
- պղնձի համար իներտ գազերի միաջավայր(արգոն, ջրածին և այլն)

Սակայն բացառությամբ որոշ դեպքերի, այդ վառարանները, հիմնականում, կարելի է օգտագործել և՛ վակուումային պայմանների, և՛ իներտ գազերի համար: Վակուումային վառարանները լինում են ցածր վակուումային (մինչև $1,33 \times 10^{-1}$ մԲար),

միջին վակուումային ($1,33 \times 10^{-1}$ - $1,33 \times 10^{-3}$ մԲար), բարձր վակուումային ($1,33 \times 10^{-4}$ - $1,33 \times 10^{-6}$ մԲար) և գերբարձր վակուումային ($1,33 \times 10^{-6}$ մԲար և բարձր): Իսկ ըստ աշխատանքային ջերմաստիճանային տիրույթի՝ այդ վառարանները տարբերվում են՝ միջին ջերմաստիճանային ($1100-1200^\circ\text{C}$) և բարձր ջերմաստիճանային ($> 1200^\circ\text{C}$) վառարանների[53]:

Ինդուկցիոն տաքացման եղանակի ամենակարևոր առավելություններից մեկն է հանդիսանում միացվող մետաղների համասեռ տաքացման հանգամանքը, քանի որ մետաղները տաքացվում են բարձր հաճախականության էլեկտրամագնիսական դաշտի էներգիայով: Ինդուկցիոն տաքացման ժամանակ էլեկտրական հոսանքի(Ֆուկոյի հոսանքները) ներթափանցելիության խորությունը, հիմնականում, որոշվում է զոդվող մետաղների բաղադրությունից, զոդման ջերմաստիճանից, ինչպես նաև հոսանքի հաճախականությունից: Աղյուսակ 4.1-ում բերված են որոշ մետաղների համար էլեկտրական հոսանքի ներթափանցելիության խորությունը 2 կՀց հաճախականության դեպքում: Հարկ է նաև նշել, որ մետաղների ինդուկցիոն տաքացման ժամանակ էլեկտրական հոսանքի հաճախականության մեծացմանը զուգընթաց կտրուկ իջնում է նրա ներթափանցելիության խորությունը, և օրինակի համար 300 կՀց հաճախության դեպքում մոտ 1,5 – 2 կարգով ավելի քիչ է, քան 2 կՀց-ի դեպքում:

Աղյուսակ 4.1 [53]

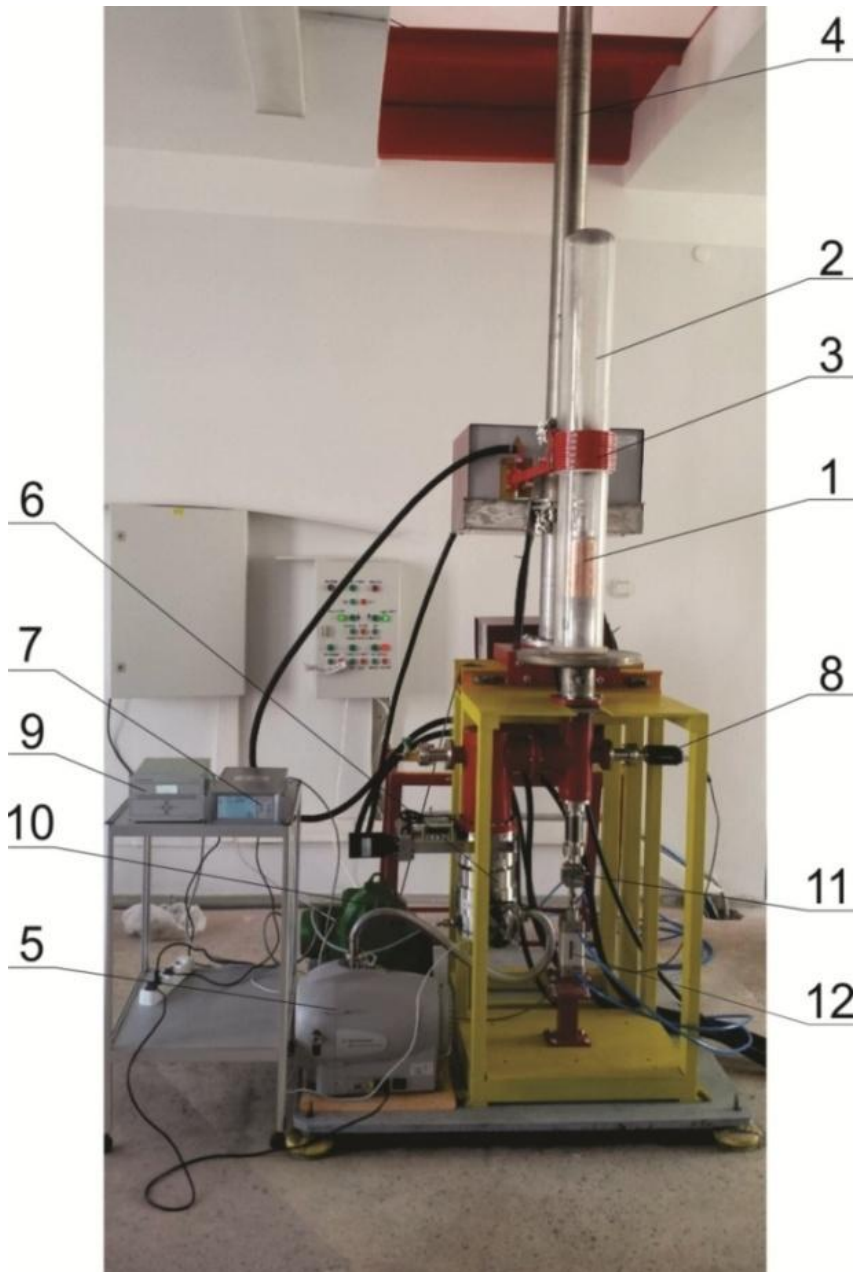
Մետաղ	Երկաթ		Պղինձ		Ալյումին		Լատուն	
Ջերմաստիճան $^\circ\text{C}$	20	1000	20	850	20	-	20	800
Խորություն մմ	0,7	12,3	1,49	3,56	1,98	-	2,93	4,85

Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման համար նախագծվել և պատրաստվել է վակուումային ինդուկցիոն զոդման նոր սարք, որը բերված է նկար 4.3-ում:

Սարքավորումը բաղկացած է հետևյալ համակարգերից՝

- ինդուկցիոն համակարգ
- վակուումային համակարգ
- ինդուկտորի շարժման համակարգ

- պնևմատիկ համակարգ
- չափիչ սարքեր



Նկ. 4.3 Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման վակուումային ինդուկցիոն զոդման նոր սարքավորում [87]; 1- Արագացնող կառուցվածք, 2- կվարցե խցիկ, 3- ինդուկտոր, 4- ուղղորդիչ, 5- նախավակուումային պոմպ, 6- տուրբոմոլեկուլային պոմպ, 7- վակուումաչափի կոնտրոլեր, 8- վակուումաչափ, 9- տուրբոմոլեկուլային պոմպի կոնտրոլեր, 10- ռեդուկտոր, 11- դինամոմետր, 12- պնևմոգլան

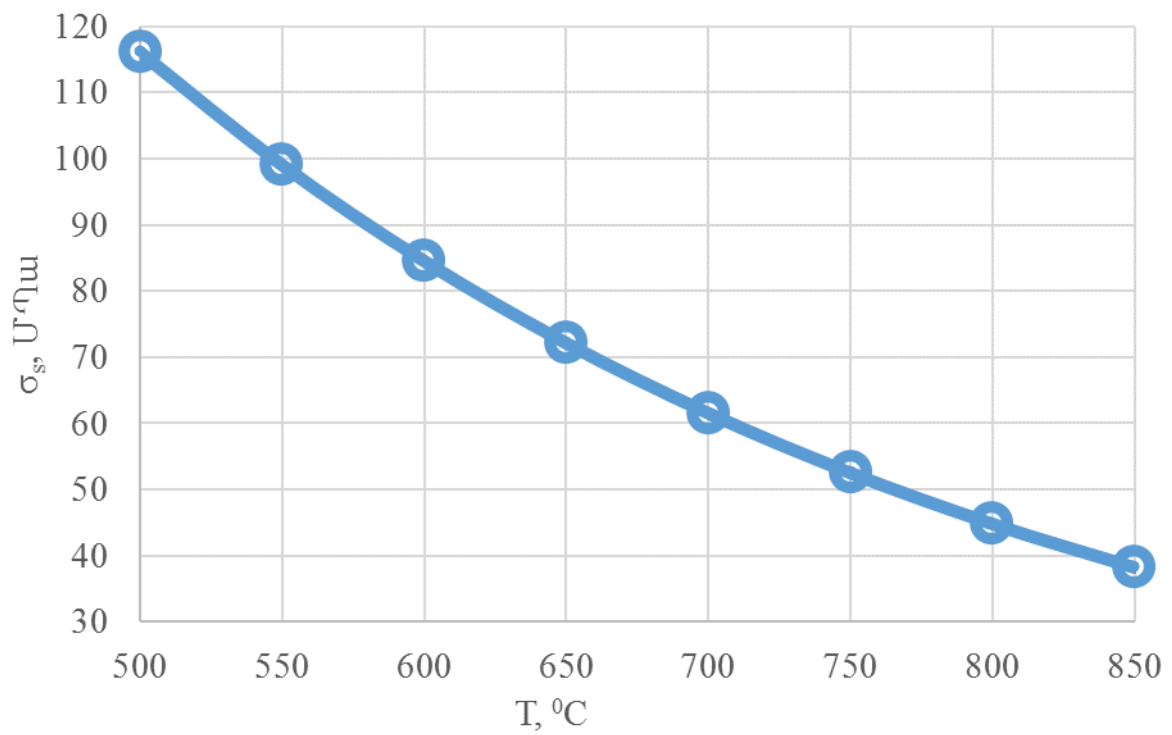
Քանի որ պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդման գործընթացը, հիմնականում, իրականացվում է ուղղահայաց դիրքով և այն էլ վակուումային

վառարաններում, ապա գոյություն ունի մի շատ կարևոր հանգամանք, որը կոչվում է գրավիտացիայի ազդեցություն: Դա նշանակում է, որ պղնձե դետալները(յուրաքանչյուրը մոտավորապես 1կգ և ավել), ուղղահայաց դիրքով մեկը մյուսի վրա տեղակայված, առաջացնում են քաշի տարբերություն յուրաքանչյուր միացվող զոնայում: Հիմնական տարբերությունն ակնհայտ կլինի ամենավերևի և ամենաներքևի դետալների միջև:

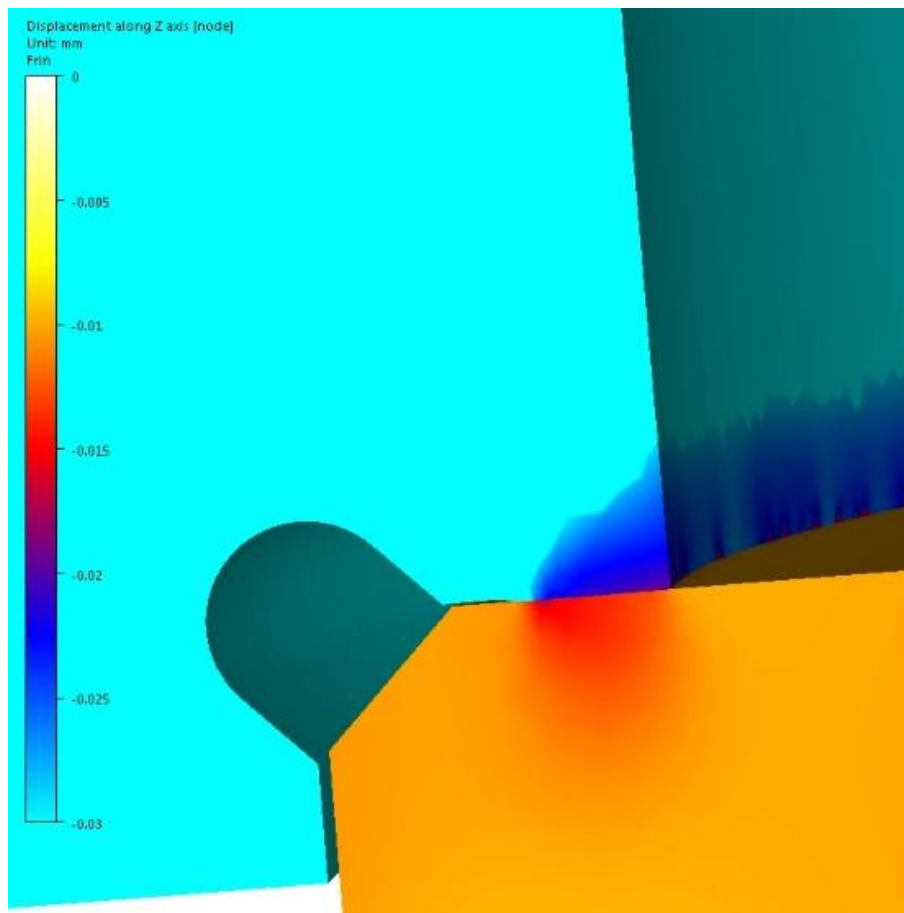
Պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդման համար գոյություն ունեցող գրեթե բոլոր սարքավորումներում և հետազոտություններում, կամ, անտեսվում է վերը նշված խնդիրը, կամ էլ բացակայում են առաջարկվող լուծումները: Գոյություն ունի հետազոտություն [39], որում բերված են նշված խնդրի և՛ լուծումը, և՛ համապատասխան սարքավորումը: Սակայն նշված խնդրի լիարժեք լուծման համար կան որոշակի թերություններ նշված սարքավորման մեջ, որոնք կապված են սարքավորման ճնշում ստեղծող համակարգի հետ: Դա պայմանավորված է նրանով, որ ինդուկտորի մագնիսական դաշտերը միանշանակ բավականին լուրջ ազդեցություն կթողնեն մագնիսական դաշտի միջոցով ճնշում ստեղծող սարքի աշխատանքի վրա, և արդյունքում խնդրի լուծումը կմնա չլուծված: Սարքի մոդեռնիզացիան և նշված խնդրի լիարժեք լուծումը իրականացվել է հետևյալ կերպ՝ գոյություն ունեցող մագնիսական դաշտի միջոցով ճնշում ստեղծող համակարգը փոխարինվել է պնևմատիկական ուժային սարքավորումներով, որոնց մեջ են մտնում պնևմոզլանը և օդի ճնշման կարգավորիչը: Վերջիններիս սահուն աշխատանքը համաձայնեցված է ինդուկտորի շարժման հետ, այն է, որ տաքացման գործընթացի սկսման հետ միասին ճնշումը տրվում է մաքսիմալ(նախապես հաշվարկված) չափով և ինդուկտորի իջեցման հետ միասին իջեցվում է յուրաքանչյուր պղնձե դետալի կշռի չափով պնևմոզլանի ճնշումը: Արդյունքում արագացնող կառուցվածքի պատրաստման ժամանակ բոլոր դետալները զոդվում են հավասարազոր պայմաններում: Ելնելով վերը նշված բոլոր հանգամանքներից, մեր բոլոր հետազոտությունների և պղնձե արագացնող կառուցվածքի պատրաստման ժամանակ կատարվել են համակարգչային մոդելավորումներ, որոնց միջոցով սահմանվել է զոդման պրոցեսի մի շարք կարևորագույն պարամետրեր, դրանցից են հետևյալները՝

- Դետալների տաքացման ժամանակը
- Տաքացված դետալների պահպանման ժամանակը՝ կախված դետալների զանգվածից
- Անհարաժեշտ սեղմող ուժը

Արագացնող կառուցվածքի վակուումային զոդման ժամանակ ամենագլխավոր խնդիրներից մեկն է համարվում պղնձե դետալների վրա գործող սեղմող ուժը, քանի որ այդ սեղմող ուժի շնորհիվ է բացառվում զոդանյութի ներթափանցումը դեպի արագացնող կառուցվածքի ներքին մակերևույթ: Ուստի շատ կարևոր է որոշել այդ ուժի չափը, քանի որ ոչ ճիշտ ուժի կիրառման դեպքում կառաջանան հայտնի երկու խնդիրներից մեկը, այսինքն՝ մեծ ուժի դեպքում կմեծանան դեֆորմացիաները(քանի որ դետալները տաքացվում են), կամ էլ քիչ կիրառված ուժի դեպքում դետալների զոդվող մակերևույթների միջև եղած բացակը չի փակվի և զոդանյութը կներթափանցի կառուցվածքի ներքին մակերևույթ: Արդյունքում օպտիմալ ուժի որոշման համար կատարվել է համակարգչային մոդելավորում արագացնող կառուցվածքի երեք դետալների համար: Զոդման գործընթացը իրականացվում է պղնձի համար բավականին բարձր ջերմաստիճաններում, և այդ ջերմաստիճանային պայմաններում պղինձը ունի ցածր հոսունության սահման: Ստորև բերված նկար 4.4-ում ներկայացված է թթվածնազրկված պղնձի հոսունության սահմանի կախումը ջերմաստիճանից: Ինչպես երևում է նկար 4.4-ից ջերմաստիճանի բարձրացման հետ մեկտեղ պղնձի հոսունության սահմանը իջնում է և 850°C -ի դեպքում այն դառնում է $38 \text{ ՄՊա}(3,87 \text{ կգ/մմ}^2)$: Այստեղից էլ ակնհայտ երևում է, որ կիրառվող ուժի նույնիսկ շատ փոքր փոփոխության դեպքում անխուսափելի է դառնում դեֆորմացիաների առաջացումը: Մոդելավորման ողջ պրոցեսի համար նկար 4.5-ում ներկայացված է ուժային պարամետրերի փոփոխությունը:

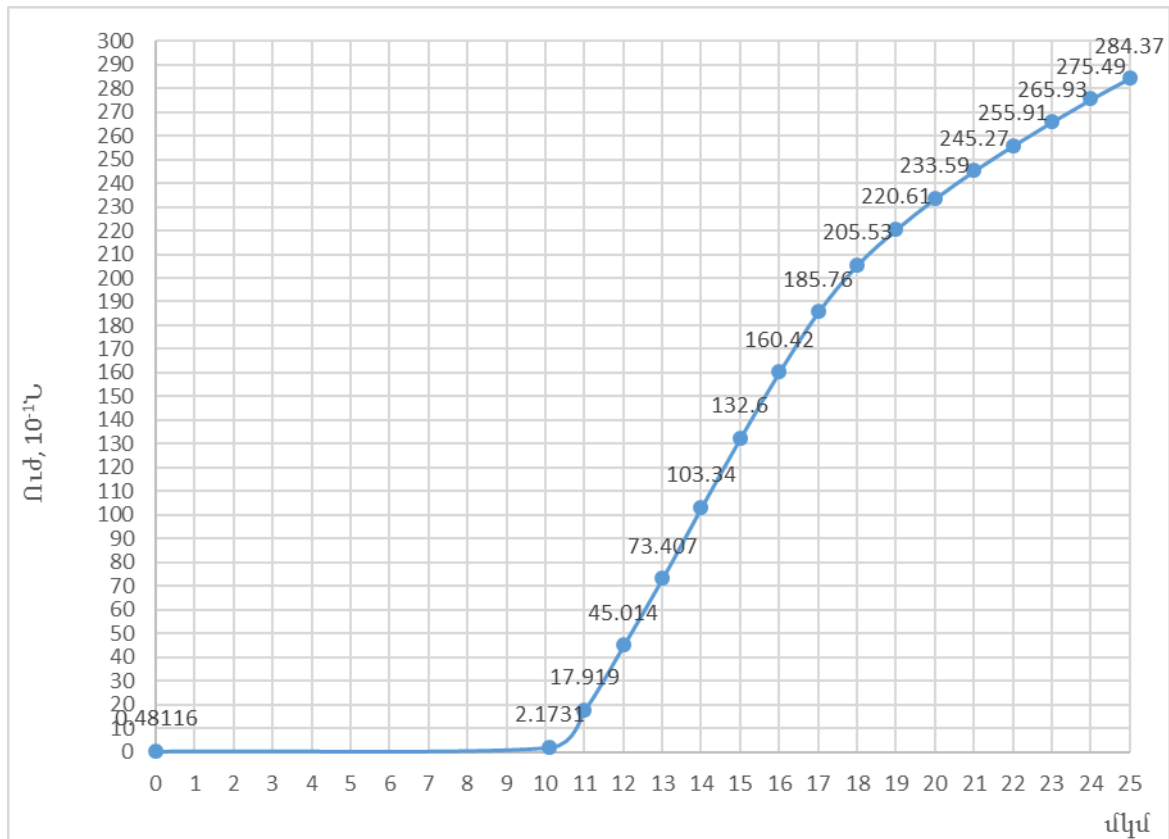


Նկ. 4.4 Թթվաձնազրկված պղնձի հոսունության սահմանի և ջերմաստիճանի կապը



Նկ. 4.5 Պղնձե դետալների դեֆորմացիոն պրոցեսները մոդելավորման արդյունքներով

Ինչպես երևում է նկար 4.6-ից երկու պղնձե դետալների համան մասում առաջացած դեֆորմացիոն պրոցեսները կարելի է բաժանել երկու բաղադրիչների՝ առաձգական և պլաստիկ: Մինչև 185կգ հատվածը, կորը ուղղագիծ տեսքի է, որը նշանակում է, որ մինչ այդ առկա են առանձգական դեֆորմացիաները, և դրանից հետո դիագրամայի կորագիծ լինելը ցույց է տալիս, որ այդ կետից սկսվում են պլաստիկ դեֆորմացիաները:



Նկ. 4.6 Տեղափոխությունների կախումը ուժի չափից

Մոդելավորման վերը նշված արդյունքներից պարզ դարձավ, որ մեր պղնձե արագացնող կառուցվածքների դիզայնին համապատասխանող դետալների վակուումային զոդման գործընթացի համար կիրառվող ուժը չպետք է գերազանցի 185կգ, որպեսզի չառաջանան ավելորդ դեֆորմացիաներ:

Այնուամենայնիվ, արագացնող կառուցվածքի պղնձե դետալների պատրաստման ժամանակ այդ դետալներն ունեն որոշակի տեխնիկական պահանջներ, որոնցից են մակերևույթների փոխուղղահայացությունն ու զուգահեռությունը, և հիմնականում, այդ պահանջներից է բխում, թե զոդման գործընթացի ժամանակ ինչքան է հարկավոր ուժ կիրառել այդ դետալների վրա,

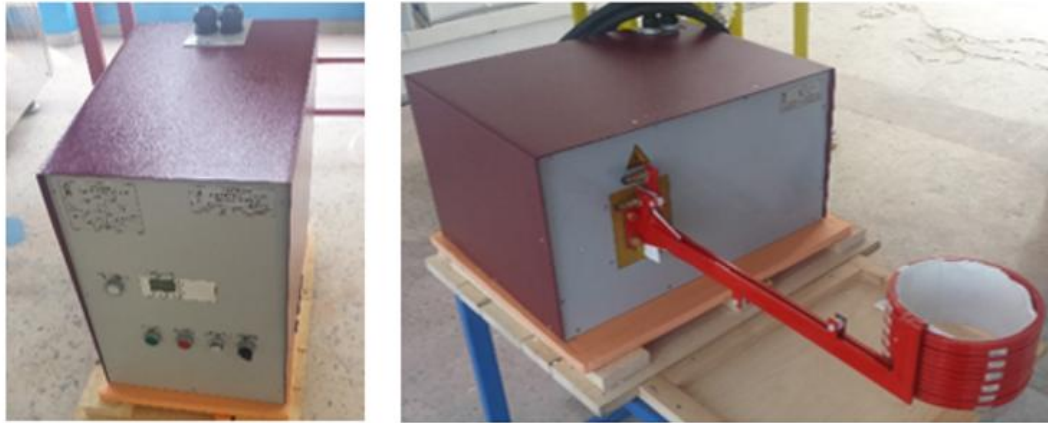
որպեսզի ապահովվի երկու մակերևույթների ամբողջական հպում՝ բացառելով ցանկացած տիպի բացակների առկայությունը: Վերը նշվածներից հետևում է, որ մեր դեպքում պղնձե դետալների վակուումային զոդման համար անհրաժեշտ է կիրառել այնպիսի մի ուժ, որը կհամապատասխանի որակյալ զոդման համար բոլոր անհրաժեշտ պահանջներին:

Քանի որ պղնձե արագացնող կառուցվածքների վակուումային զոդման համար անհրաժեշտ է 5×10^{-5} մբար-ից ոչ ավելի վակուում, ապա նկար 4.3-ում բերված վակուումային ինդուկցիոն սարքավորումը նույնպես պետք է համապատասխաներ այդ պահանջին, և ուստի այն համալրված է բարձր վակուումային ստանդարտներին համապատասխանող սարքավորումներով: Սարքավորման բարձր վակուումային պայմաններն ապահովելու համար ընտրվել է տուրբոմոլեկուլային պոմպ: Նշված տուրբոմոլեկուլային պոմպերի լիարժեք աշխատանքի համար գոյություն ունեն իրենց տեխնիկական պարամետրերին համապատասխան նախավակուումային պոմպեր:

Ինչպես մեքենաշինության բոլոր ոլորտներում, այնպես էլ արագացուցչային և վակուումային տեխնիկայում գործընթացի ընթացքում յուրաքանչյուր կարևոր պարամետր պետք է չափվի և ստուգվի չափիչ գործիքներով, կամ, սարքավորումներով: Վակուումային պայմանների ստուգումն ու չափումը իրականացվում է տարատեսակ վակուումաչափերով: Պղնձե արագացնող կառուցվածքների տաքացմանը զուգընթաց մեծանում է վակուումային խցիկում գտնվող ցանկացած դետալի գազաբացթողնման գործակիցը: Այդպիսի հանգամանքի առկայության դեպքում վակուումաչափերի դերը բավականին մեծանում է, քանի որ կարիք կա չափել վակուումը ողջ զոդման պրոցեսի ժամանակ: Ըստ այդմ էլ պղնձի տաքացման պրոցեսը պետք է համաձայնեցնել վակուումային պայմանների հետ, որպեսզի զերծ մնանք օքսիդացիոն շերտերից: Արագացնող կառուցվածքների զոդման սարքի վակուումի չափման համար կիրառվել է FRG720 տիպի գերբարձր վակուումաչափ:

Պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդման համար նախատեսված ինդուկցիոն տաքացման սարքավորումը հաշվարկվել, նախագծվել և պատրաստվել է, որը բաղկացած է տաքացման բլոկից (ինդուկտորից) և գեներատորային բլոկից:

Վերջիններս(իրենց տեխնիկական տվյալներով) բերված են նկար 4.7-ում:



Լարում	Հաճախություն	Հզորություն	Ա ₂ . Հաճախություն	Քաշ
380 Վ	50 Հց	60 ԿՎտ	6.8 – 16.2 ԿՀց	97 Կգ

Նկ. 4.7 ինդուկցիոն տաքացման սարքավորում

Սարքավորման ուժային սիստեմը բաղկացած է պնևմոգլանից, նրան միացված ուժաչափից, ճնշում ստեղծող կոմպրեսորից և օդի ճնշման կարգավորիչից: Վերջինիս միջոցով կարգավորվում է օդի ճնշումը պնևմոգլանում, որի շնորհիվ էլ հնարավոր է դառնում նվազեցնել պղնձե կառուցվածքի վրա ազդող ուժն ինդուկտորի իջեցման հետ մեկտեղ: Արդյունքում հնարավոր է դառնում արագացնող կառուցվածքի յուրաքանչյուր միացման գոտիում պահպանել միևնույն սեղմող ուժը: Զերմաստիճանի կարգավորման համար կիրառվել է լազերային պիրոմետր, իսկ մնացած բոլոր փորձանմուշների զոդման համար կիրառվել են տարբեր տեսակի թերմոզույգեր:

4.3 Արագացնող կառուցվածքների պատրաստման որակի վերահսկում

Արագացուցչային տեխնիկայում և, ընդհանրապես, մեքենաշինության գրեթե բոլոր ոլորտներում հանդիպող յուրաքանչյուր ճշգրիտ հանգույցի պատրաստման գործընթացը բավականին բարդ պրոցես է: Հատկապես, արագացնող կառուցվածքների պատրաստման գործընթացը բարդ է այն պատճառով, որ նրանց դետալների տեխնիկական պահանջները բավականին բարձր են և գիտության զարգացման հետ զունգընթաց այդ պահանջները էլ ավելի են խստանում: Հետևաբար, այդ տեխնիկական պահանջների բարձրացման հետ մեկտեղ խստանում և բարդանում է այդ պահանջների ստուգումն ու վերահսկումը: Հասկանալի է, որ այդպիսի դետալների ստուգումն իրականացնելու համար անհրաժեշտ են այնպիսի սարքավորումներ, որոնք իրենց ճշտությամբ պետք է լինեն առնվազն մեկ կամ մի քանի կարգով ավելի ճշգրիտ, քան այդ դետալների պահանջներն են: Հարկ է նաև նշել, որ նշված դետալների բարդության պատճառով անհրաժեշտություն կա նրանց տեխնիկական պահանջների վերահսկումը և ստուգումը կատարել մի քանի անգամ, և որոշ դեպքերում էլ այն իրականացնել դետալների պատրաստման բոլոր փուլերում:

Արագացուցչային տեխնիկայում օգտագործվող հանգույցների կամ սարքավորումների համար գոյություն ունեն մի քանի կարևոր հանգամանքներ, ըստ որոնց որոշվում է նրանց պիտանելիությունը հետագա աշխատանքի համար: Այդ հանգամանքները հիմնականում իրենցից ներկայացնում են տարատեսակ չափումներ: Արագացնող կառուցվածքների դետալների մեխանիկական մշակումից հետո կատարվում է նրանց երկրաչափական չափսերի ստուգում: Այնուհետև որոշակի սեղմող հարմարանքների միջոցով այդ դետալները սեղմվում են, և իրականացվում են ռադիոդինամիկական չափումները: Մեր դեպքում այդ չափումները իրականացվել են ընդամենը հինգ դետալից կազմված արագացնող կառուցվածքի համար և այդ պատճառով է, որ այդ չափումը իրականացվել է որոշակի սեղմող հարմարանքի միջոցով: Հակառակ դեպքում, այսինքն, երբ դետալների քանակը հասնում 10-60 և ավելի, այդ չափումները կատարվում են ավելի լուրջ հարմարանքների միջոցով՝ հիմնականում, օգտագործվում են հիդրավլիկ մամլիչներ:

Պղնձե դետալների ֆիզիկական չափումներից անմիջապես հետո հաջորդում է

դետալների զոդման գործընթացը, և որից հետո գրեթե ամենակարևոր չափումներն են հանդիսանում ստորև նշվածները՝

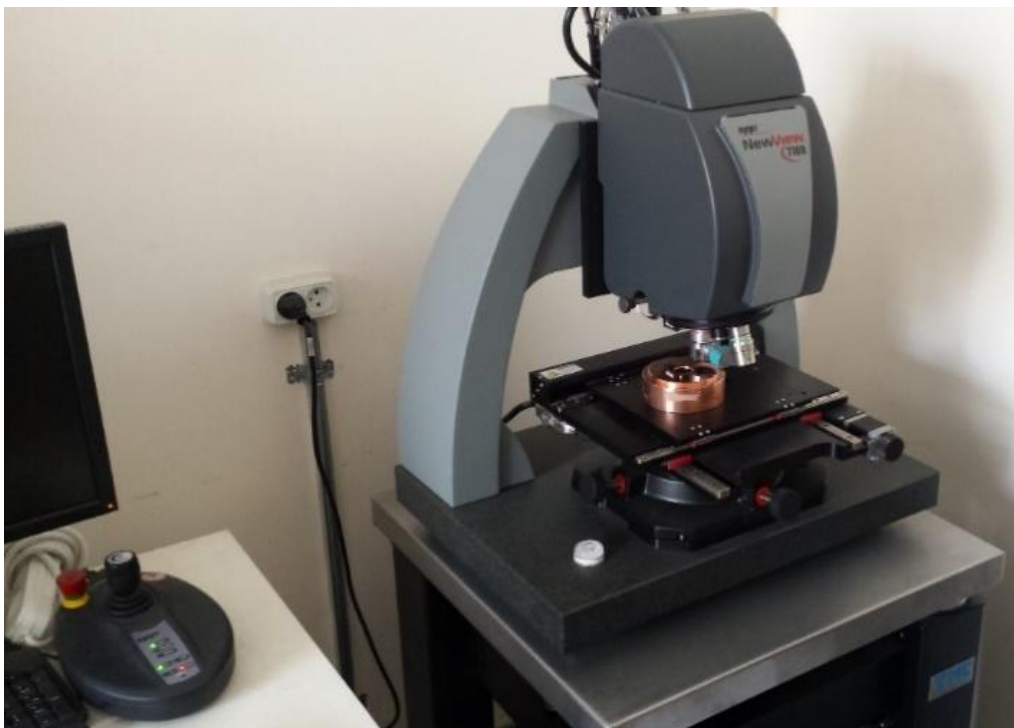
- Միացման զոնայի ամրության ստուգումը
- Վակուումա-հերմետիկության ստուգումը
- Վերջնական էլեկտրոդինամիկական չաումները

Միացման զոնայի վերը նշված երկու կարևոր չափումները, վակուումա-հերմետիկության և ամրության, կատարվում են հատուկ նրանց համար նախատեսված էքսպերիմենտալ ստենդների միջոցով, որոնք կազմված են համապատասխանաբար վակուումային և ուժային չափումներ կատարելու համար անհրաժեշտ սարքավորումներով:

Պղնձե դետալների մեխանիկական չափումների մեջ մտնող մակերևույթային խորդուբորդությունների պահանջները ներկայումս հասնում են ընդուպ մինչև $Ra0,015\text{մկմ-ի}$ [30]: Այդպիսի մակերևույթային խորդուբորդությունների ստացման դժվարությունն, հիմնականում, կայանում է նրանում, որ խստորեն արգելված է այն ստանալ տարատեսակ փոշիների փայլեցման միջոցով: Հետազոտությունների համար պատրաստված պղնձե արագացնող կառուցվածքի դետալներից մեկը, որը բերված է նկար 4.8-ում, լիովին համապատասխանում է գծագրերով սահմանված տեխնիկական պահանջներին: Պղնձե դետալի մակերևույթային խորդուբորդությունները չափվել են Zygo 7100 մակնիշի ճշգրիտ պրոֆիլոմետրի միջոցով, որը բերված է նկար 4.9-ում իր տեխնիկական տվյալներով: Ի համեմատ մնացած մեթոդների (ասեղի հպմամբ), այս սարքավորման միջոցով հնարավոր է դառնում ստանալ բավականին ճշգրիտ արդյունքներ և լիովին կազմել պատկերացում, թե ինչպիսի տեսք ունի մշակված մակերևույթը: Քանի որ նշված պրոֆիլոմետրի մակերևույթի խորդուբորդությունների որոշման մեթոդը ոչ կոնտակտային է, ապա հնարավոր է դառնում կատարել չափումներ համեմատաբար ավելի բարձր դետալների դեպքում էլ նույնպես:



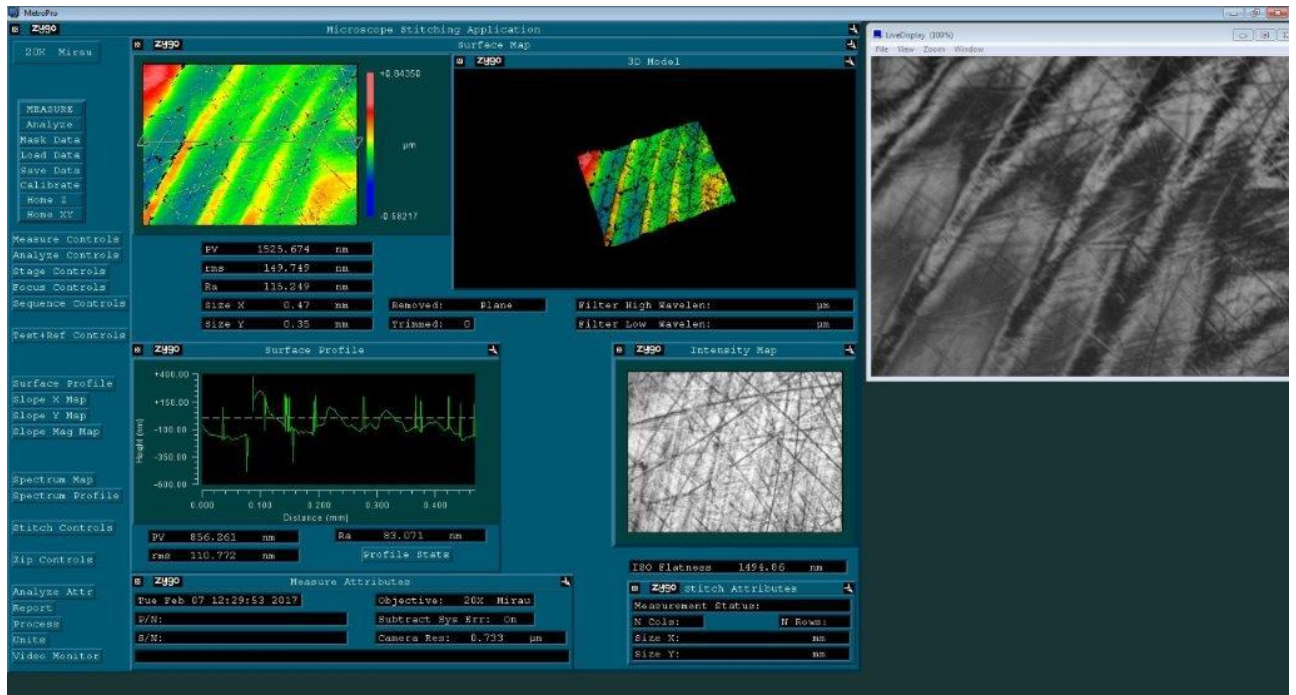
Նկ.4.8 Պղնձե արագացնող կառուցվածքի դետալ



Նկ.4.9 Zygo 7100 մակնիշի ճշգրիտ պրոֆիլոմետրի ընդհանուր տեսքը

Նկար 4.10-ում ներկայացված է վերը նշված պրոֆիլոմետրի միջոցով ստացված արդյունքները: Այնտեղից երևում է, որ նշված պղնձե դետալի մակերևույթի խորդուբորդությունը ստացվել է $Ra0,08\text{մկմ}$, իսկ այդ դետալի մակերևույթի խորդուբորդության պահանջն է $Ra0.2\text{մկմ}$:

Պղնձե դետալի մնացած տեխնիկական պահանջների ստուգումը իրականացվել է Դուո-1 չափիչ մանրադիտակի միջոցով, որի ընդհանուր տեսքը բերված է նկար 4.11-ում:

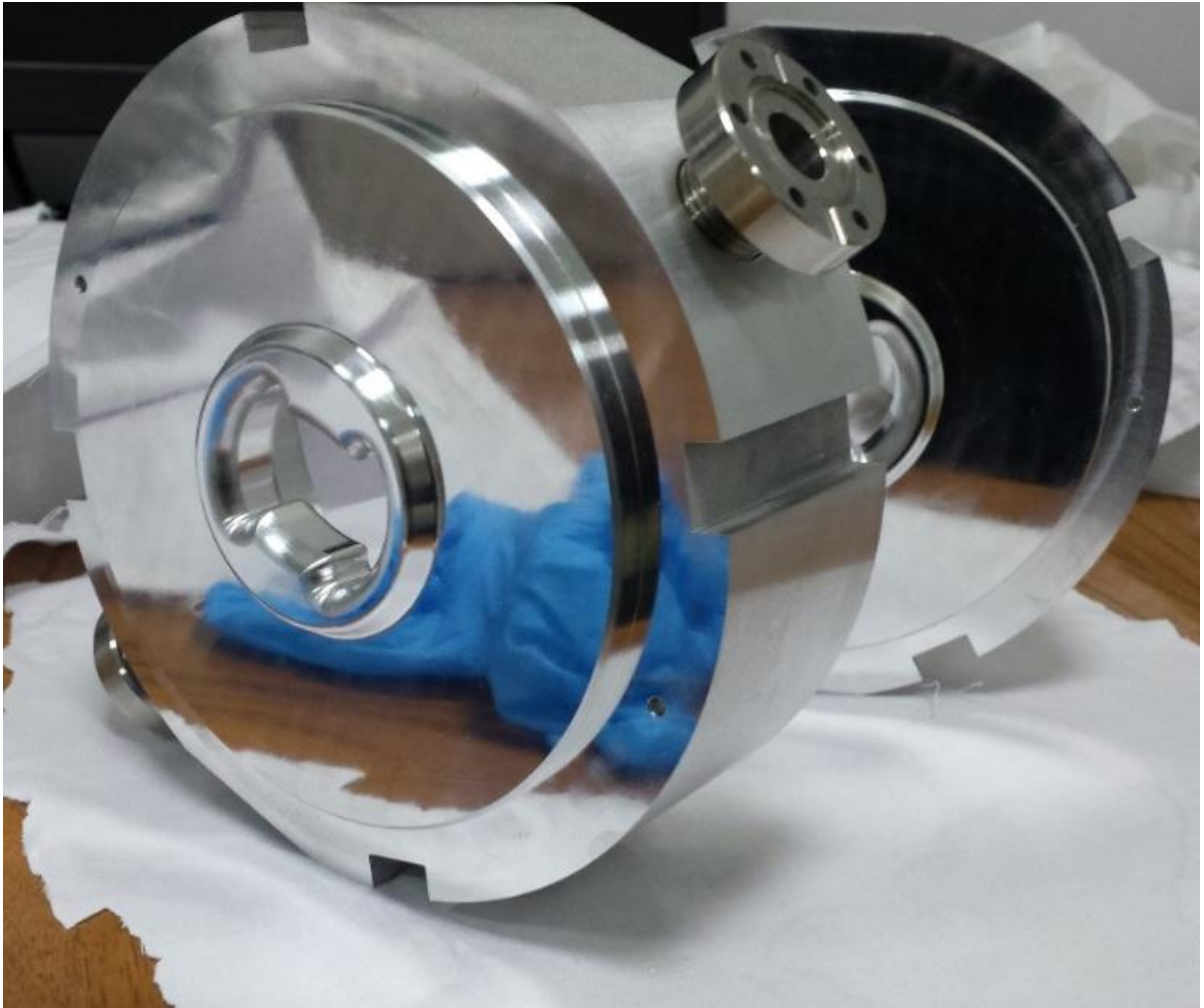


Նկ. 4.10 Zygo 7100 ճշգրիտ պրոֆիլոմետրից ստացված արդյունքները



Նկ. 4.11 Դուո-1 չափիչ մանրադիտակի ընդհանուր տեսքը

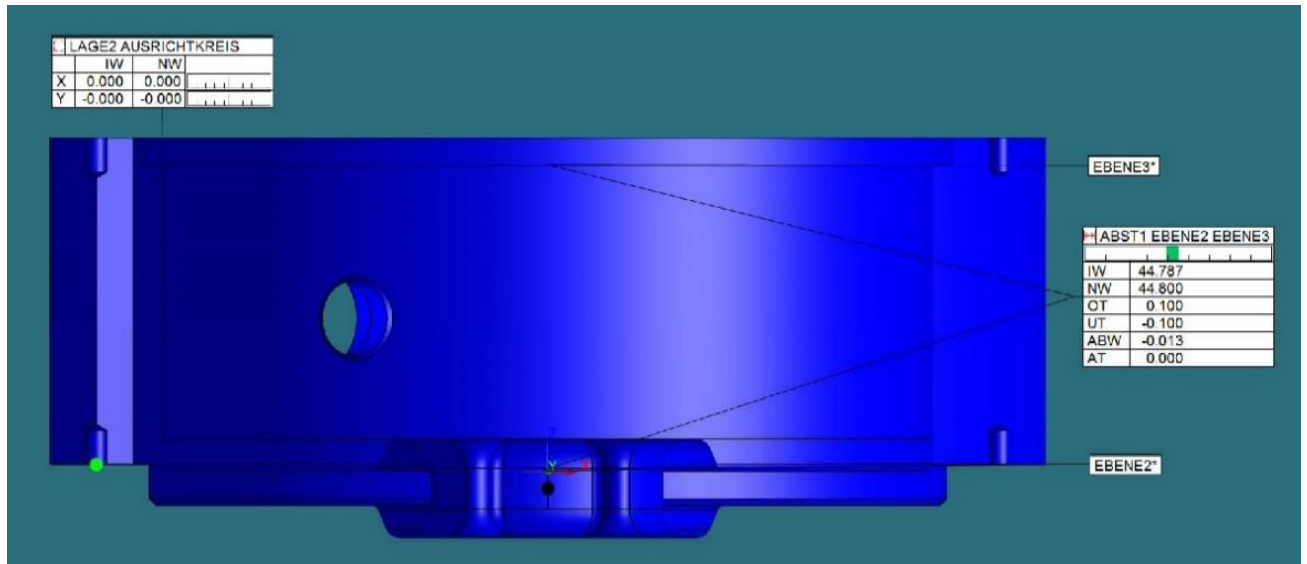
Չափումների արդյունքում պարզ դարձավ, որ նշված պղնձե դետալը լիովին բավարարում է տեխնիկական պահանջներով սահմանված թույլտվածքներին: 20մմ $\pm 0,02$ մմ թույլտվածքով սահմանված դետալի փոքր տրամագիծը սատցվել է 19,995մմ, իսկ 79.63 +0.03մմ ներքին տրամագիծը ստացվել է 79,642մմ:



Նկ. 4.12 TDS ռեզոնատորի ալյումինե նախատիպի դետալների ընդհանուր տեսք

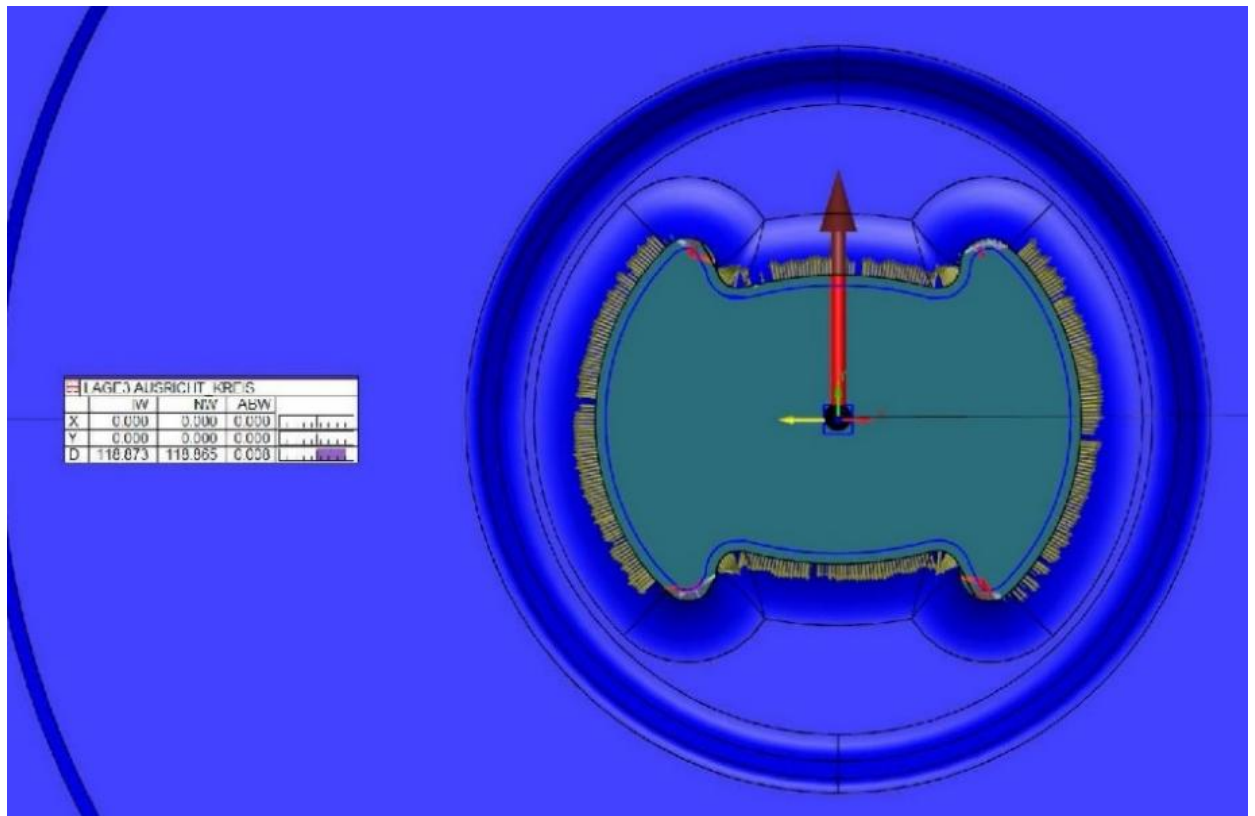
Վերը նշված պղնձե դետալի չափումների վերահսկումը անց է կացվել Հայաստանում գտնվող սարքերի շնորհիվ, սակայն նմանատիպ և կարելի է ասել այդ դետալից մի քանի կարգով ավելի բարդ դետալների(TDS ռեզոնատորի), որը բերված է նկար 4.12-ում, տեխնիկական պահանջների ստուգումն ու վերահսկումը իրականացվել է DESY միջազգային արագացուցչային կենտրոնում: Ստորև բերված են նոր TDC-ի չափման արդյունքները: Նկար 4.13-ում պատկերված է դետալի եռաչափ մոդելի համեմատությունը իրական պատրաստված դետալի հետ: Այս նկարում ցույց է տրված մոդելի և իրական դետալի ներքին խորության չափի համապատասխանելիությունը,

որը ինչպես երևում է նկարից 13մկմ է, իսկ այդ չափի թույլտվածքը 20մկմ է:



Նկ. 4.13 Դետալի մոդելի համեմատությունը իրական պատրաստված դետալի հետ

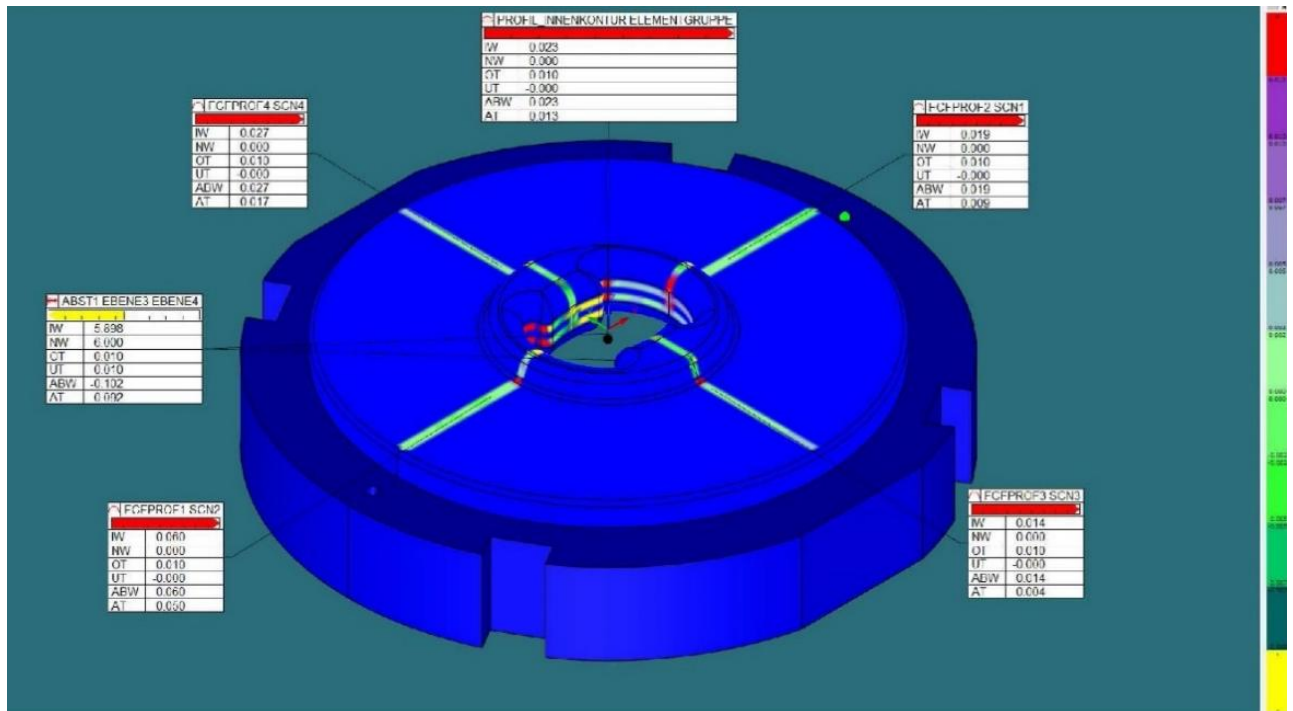
Հաջորդ նկարում (նկար 4.14-ում) պատկերված է ներքին տրամագծի չափման արդյունքը, որից երևում է, որ նախասահմանված մոդելի և պատրաստի դետալի միջև առկա է ընդամենը 8մկմ-ի տարբերություն, որի թույլտվածքը հավասար է ± 20 մկմ:



Նկ. 4.14 Ներքին տրամագծի չափման արդյունքները

TDC ռեզոնատորի-ի ալյումինե նախատիպի չորս դետալներից երկուսը իրենցից

ներկայացնում են բավականին բարդ դետալներ և հատկապես, այդ երկուսի չափումներն են շատ կարևոր: Ստորև բերված է(նկար 4.15-ում) երկրորդ դետալի չափումների կոմպլեքս արդյունքները:

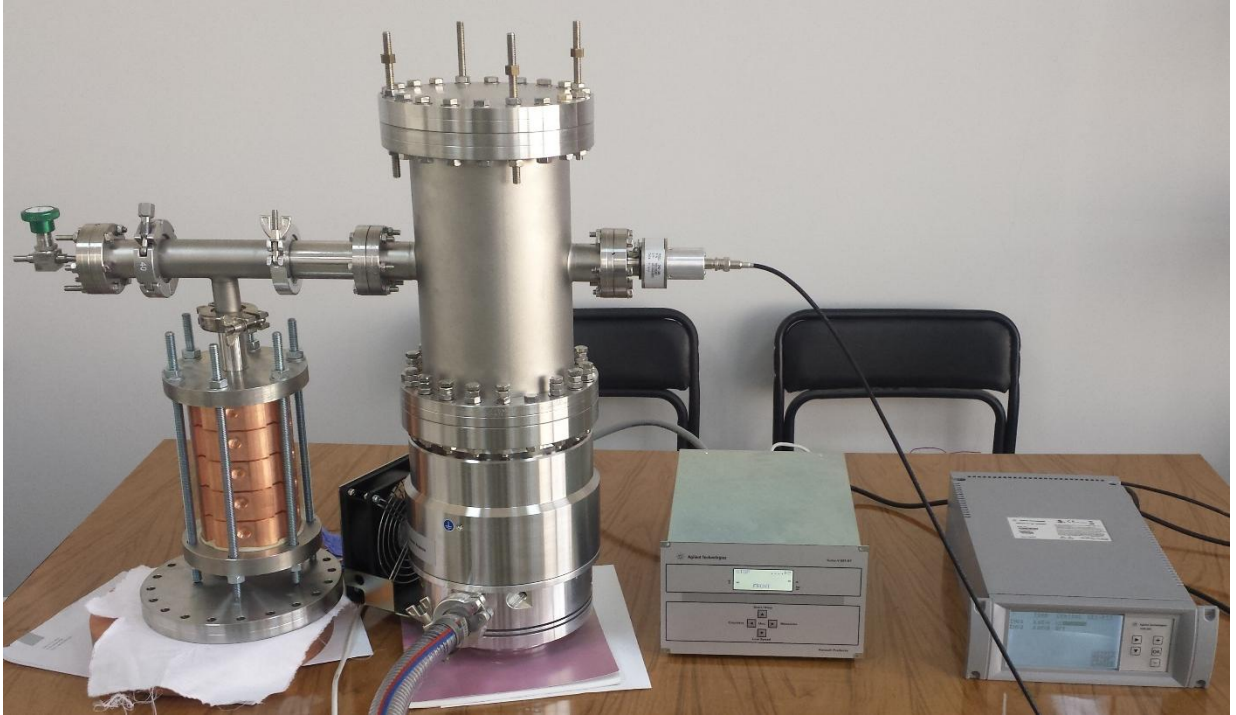


Նկ. 4.15 Երկրորդ դետալի չափումների կոմպլեքս արդյունքները

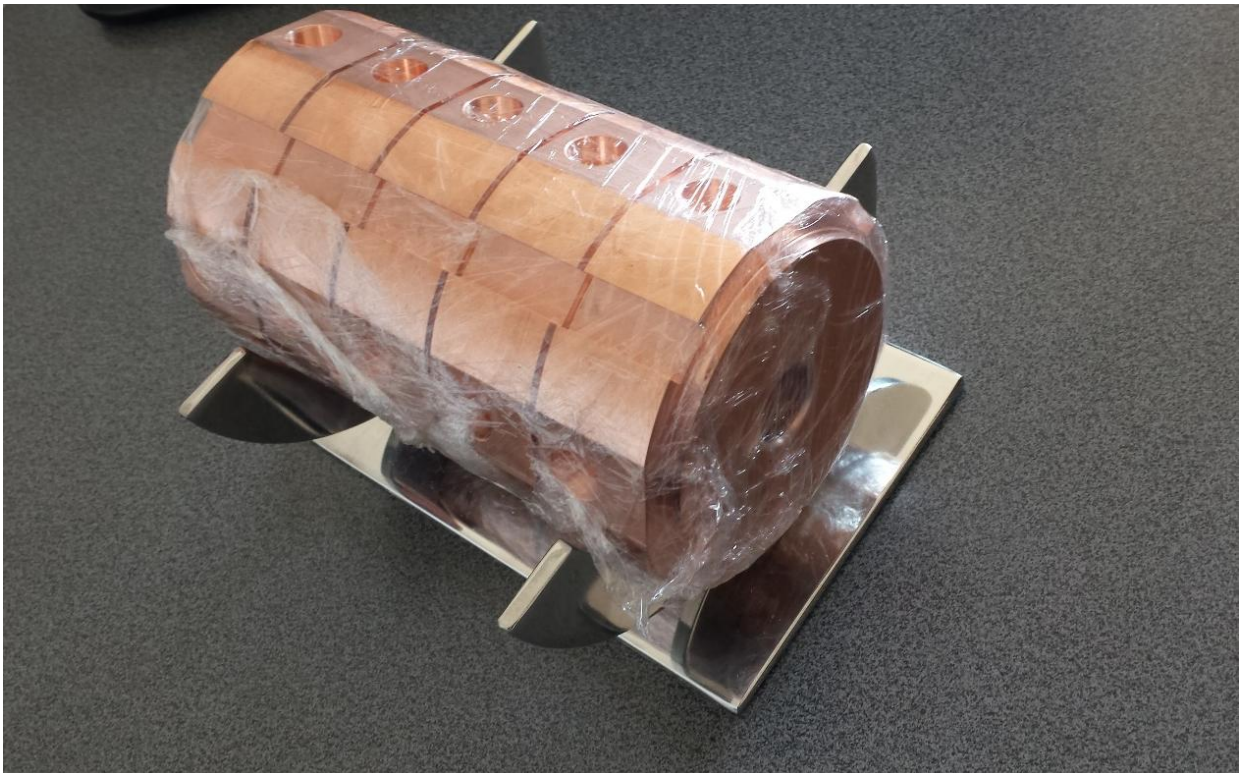
Երկրորդ դետալի չափման արդյունքները ցույց են տալիս, որ այս դետալի որոշակի չափերը դուրս են եկել սահմանված տեխնիկական թույլտվածքներից, սակայն խոսքը գնում է միկրոնների մասին, որոնք, իհարկե, քիչ ազդեցություն չեն ունենում տվյալ սարքի ճշգրիտ աշխատանքի համար: Այնուամենայնիվ, հարկ է նշել, որ այդ շեղումները այնպիսի շեղումներ են, որոնք կարելի է վերացնել պղնձե դետալների պատրաստման ժամանակ:

Վակուումային զոդման գործընթացի իրականացման հաջողությունը կարելի է ներկայացնել երկու պարամետրերի միջոցով՝ վակուումահերմետիկությամբ և մինիմալ դեֆորմացիաների առաջացմամբ: Նշված հանգամանքներից առաջինի ստուգումը իրականացվում է հատուկ նախագծված վակուումային ստենդի միջոցով, որը հագեցված է նորագույն տեխնոլոգիաներով՝ վակուումային պոմպով, վակուումաչափով և տարատեսակ վակուումային միացման հանգույցներով: Նկար 4.16-ում բերված է զոդված պղնձե արագացնող կառուցվածքի համար նախագծված և պատրաստված վակուումային ստենդը, որի միջոցով ստուգվել է արագացնող կառուցվածքի

վակուումահերմետիկությունը:



Նկ. 4.16 Արագացնող կառուցվածքների վակուումահերմետիկության ստուգում

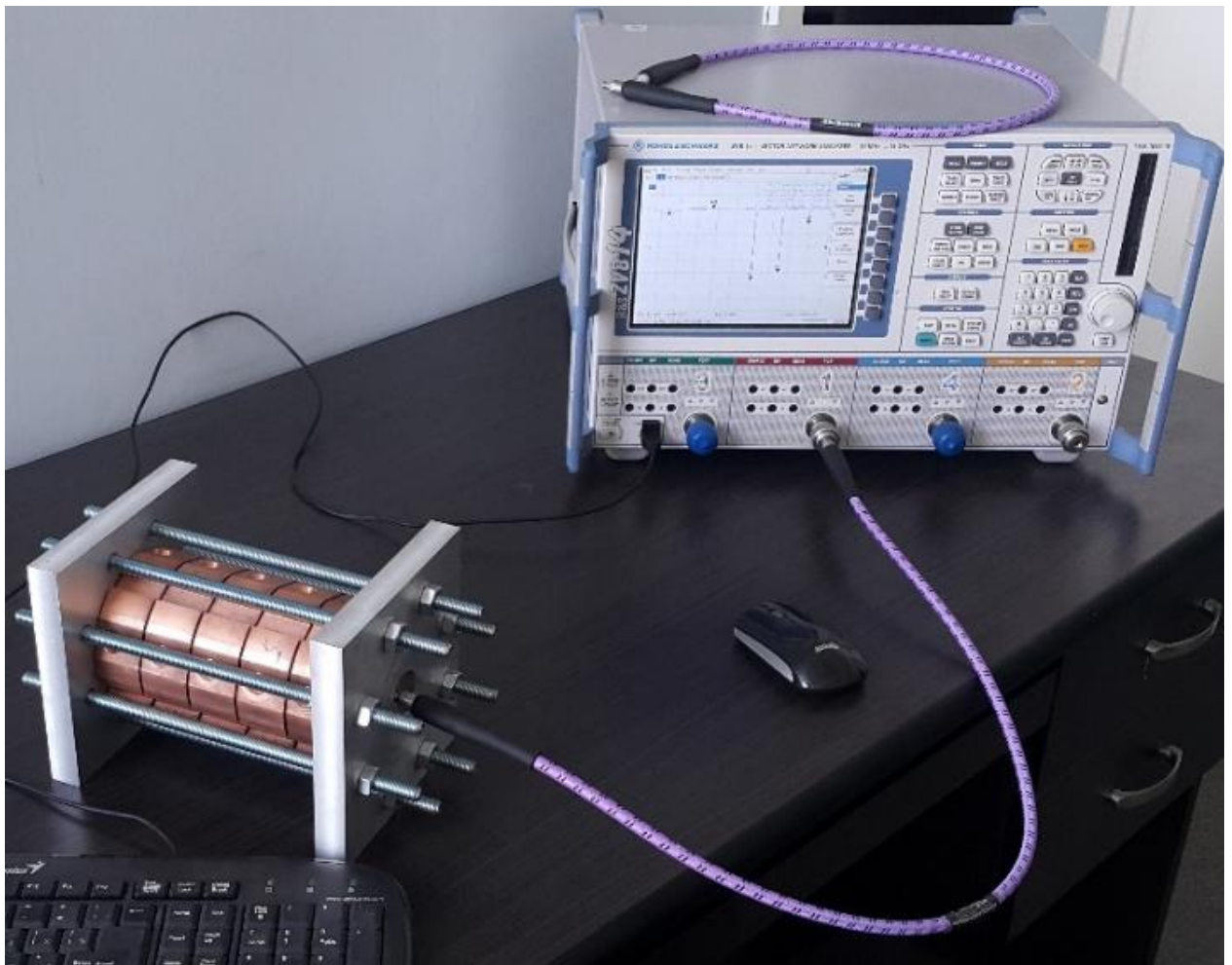


Նկ. 4.17 Պղնձե արագացնող կառուցվածքի ընհանուր տեսքը(պատրաստված «Քենդլ» ՍՀՈՒՄ)

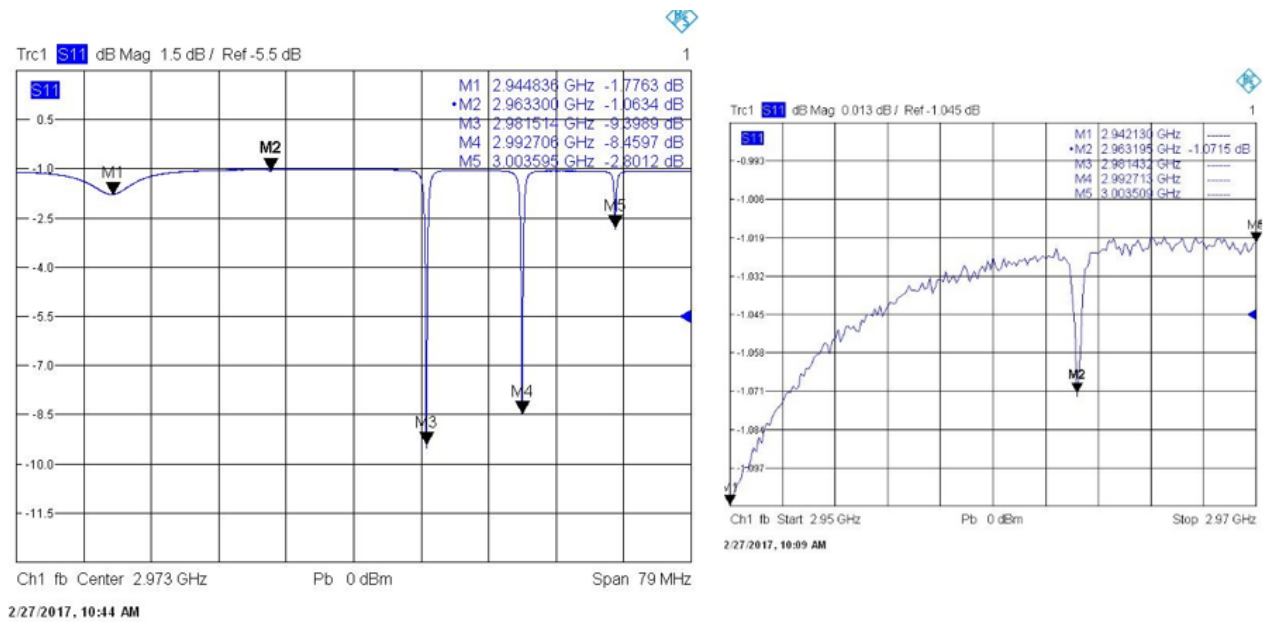
Երկրորդ կարևորագույն չափումը զրդումից հետո հանդիսանում է պատրաստի

արագացնող կառուցվածքի էլեկտրադինամիկական չափումները, որի համար ևս նախագծվում և պատրաստվում են հատուկ հարմարանքներ, որոնք պղնձե դետալների շատացման հետ միասին բավականին բարդանում են: Նկար 4.18-ում ներկայացված է էլեկտրադինամիկական չափման ընդհանուր տեսքը մինչև զոդումը:

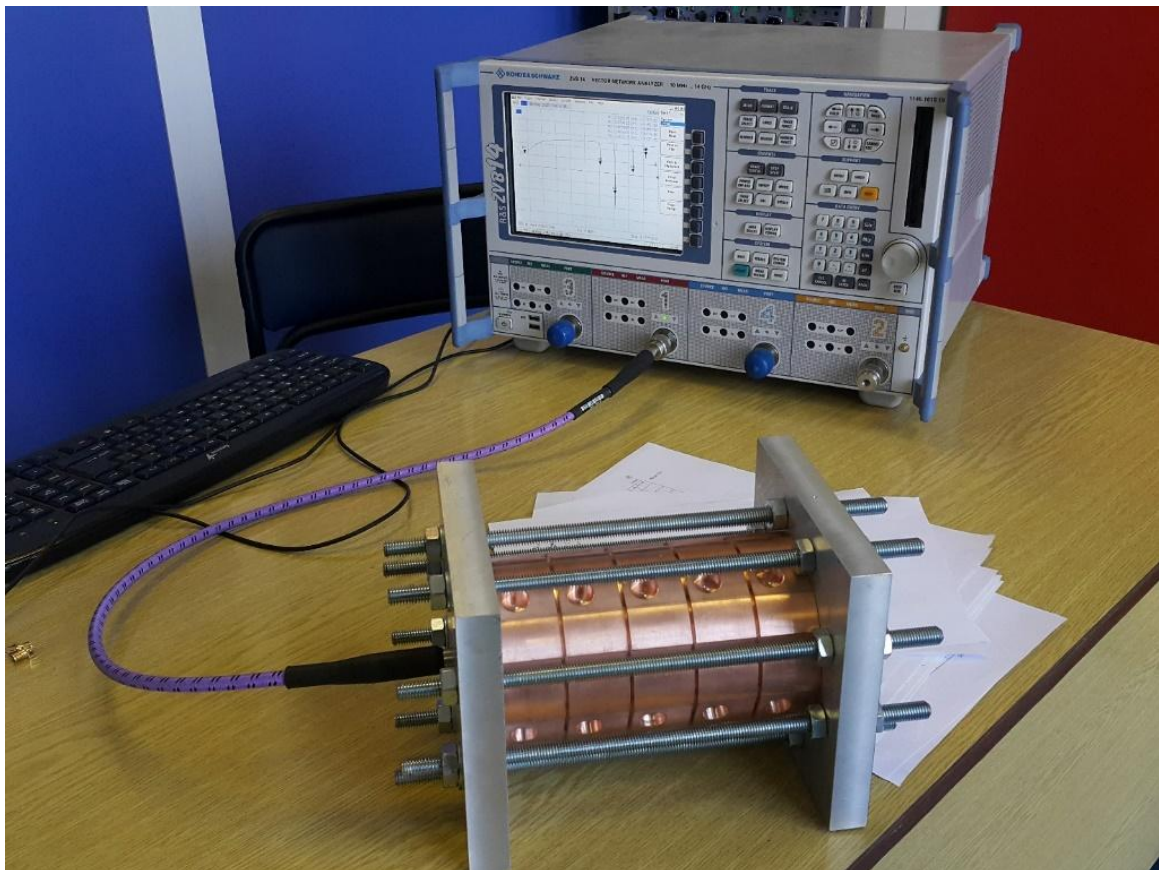
Չափումները կատարվել են R&S 14 վեկտորային ցանցային անալիզատորով, որը թույլ է տալիս մեծ ճշտությամբ գրանցել համակարգի բնութագրիչ պարամետրերը 10 կՀց-ից մինչև 14 գՀց տիրույթում: Մասնավորապես, մեզ հետաքրքրում են անցումային և անդրադարձման գործակիցները, որոնց միջոցով կարելի է գնահատել ինչպես համակարգի էլեկտրադինամիկական հատկությունները, այնպես էլ եզրակացություններ անել համակարգի մեխանիկական հատկությունների մասին(զոդման և դետալների պատրաստման որակի): Նկար 4.19-ում չափված է անդրադարձման S_{11} գործակիցը ըստ հաճախության, մինչև զոդումը:



Նկ. 4.18 Արագացնող կառուցվածքի էլեկտրադինամիկական չափումները մինչև վակուումային զոդումը



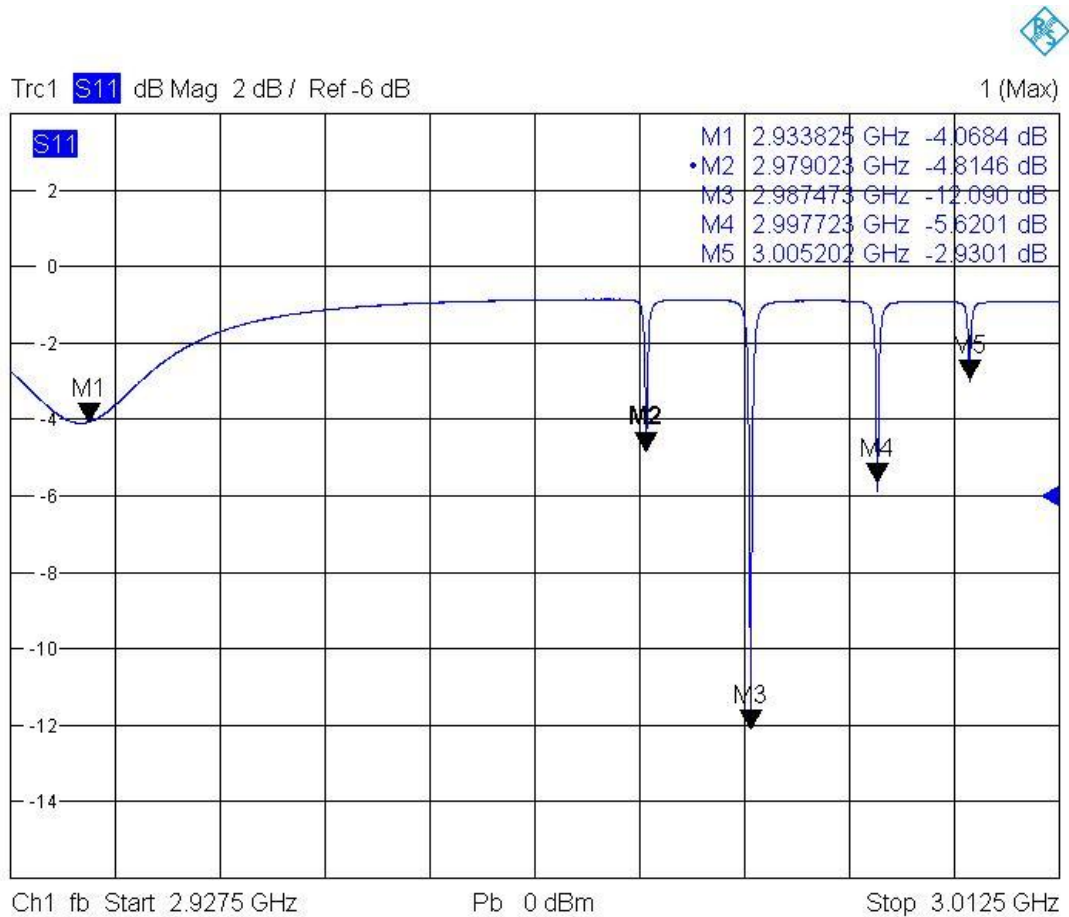
Նկ. 4.19 Էլեկտրադինամիկական չափումների արդյունքները զոդումից առաջ



Նկ. 4.20 Արագացնող կառուցվածքի էլեկտրադինամիկական չափումը զոդումից հետո

Նկար 4.20-ում ներկայացված է էլեկտրադինամիկական չափման ընդհանուր տեսքը զոդման գործընթացից հետո: Չափելով միայն անդրադարձման S_{11} գործակիցը տեսնում ենք միներալներ, որոնք ցույց են տալիս համակարգի ռեզոնանսային

հաճախությունների պատկերը:



3/24/2017, 9:03 AM

Նկ. 4.21 Էլեկտրադինամիկական չափումների արդյունքները զոդումից հետո

Մեզ հետաքրքրող $2\pi/3$ մոդան 2-րդ մինիմումն է (նկար 2.21), որը, ինչպես և ակնկալվում էր, զոդումից հետո մոտեցել է նախագծային 2,98 ԳՀց արժեքին: Հետագա կարգավորումները արդեն հնարավոր է կատարել աշխատանքային ջերմաստիճանի փոփոխման և կարգավորման անցքերի դեֆորմացնելու միջոցով: Չափման արդյունքները զոդումից հետո ցույց տվեցին գերազանց համընկնում նախօրոք կատարված էլեկտրադինամիկական հաշվարկների հետ, ինչպես նաև հաստատեցին, որ պղնձե դետալները պատրաստվել են բավարար ճշտությամբ:

4.4 Միամոդային երկշերտ (պղինձ-գերմանիում) արագացնող կառուցվածքի փորձարարական հետազոտություններ

Մասնիկների արագացման համար բարձր հաճախականության ոչ ավանդական արագացնող կառուցվածքների ուսումնասիրությունը կարևոր հիմնահարց է ապագա կոմպակտ արագացուցիչների կոնցեպցիաների զարգացման համար [88,89]: Միամոդային երկշերտ գլանաձև մետաղական ալիքատարը բարձր հաճախականության միամոդային արագացնող կառուցվածքների խոստումնալից տարբերակներից մեկն է: Գլանաձև մետաղական երկշերտ խողովակի երկայնական իմպեդանսի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ այս համակարգը կարող է ծառայել որպես բարձր հաճախականության միամոդային արագացնող կառուցվածք, երբ ներքին շերտի հաղորդականությունը շատ ավելի ցածր է, քան արտաքին շերտինը, և ներքին շերտի հաստությունը շատ ավելի փոքր է, քան արտաքին շերտի հաստությունը [10,90,91]: Բարձր հաճախականության դեպքում երկայնական իմպեդանսը ունի նեղ-շերտ(narrow-band) ռեզոնանս, պայմանավորված սինքրոն TM_{01} ֆունդամենտալ մոդայով: Ռեզոնանսային հաճախականությունը ω_0 պայմանավորված է խողովակի շառավղով r_0 և շերտի հաստությամբ d որպես $\omega_0 = c\sqrt{2}/r_0d$, որտեղ c -ն լույսի արագությունն է:

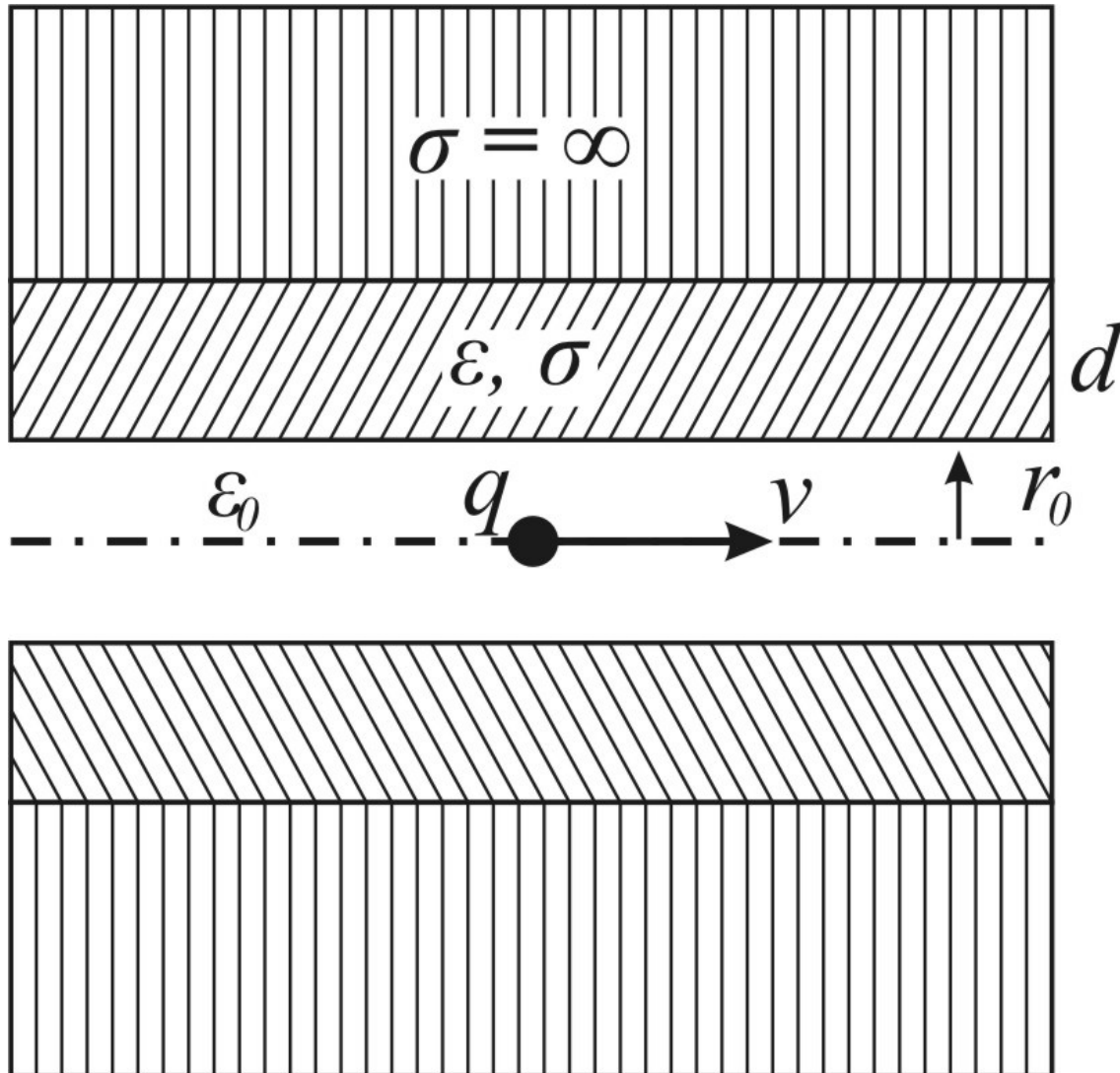
Առաջին չափումները արված են ուղղանկյունաձև պղնձե ռեզոնատորի համար, որի վերին և ստորին ներքին մակերևույթներին ամրացված են գերմանիումի(Ge) շերտեր: Վերը նշված չափումների արդյունքները պետք է համեմատվեն հաշվարկային տվյալների հետ: Ռեզոնատորի նյութի և ձևի ընտրությունը պայմանավորված է առկա չափող սարքավորման (14GHz) հաճախության տիրույթի ունակությամբ:

Նկար 4.22-ում ներկայացված է միամոդային երկշերտ արագացնող ալիքատարի սխեմատիկ տեսքը, որի արտաքին շերտը դիտարկվում է կատարյալ հաղորդիչ, իսկ ներքին շերտի(մետաղական) հաղորդականությունը(σ) հնարավորին սահմաններում պետք է լինի փոքր:

Երբ ներքին շերտի հաստությունը փոքր է սկին-շերտի խորությունից, ապա վերը նշված ալիքատարի երկայնական իմպեդանսը ընդունում է հետևյալ տեսքը՝

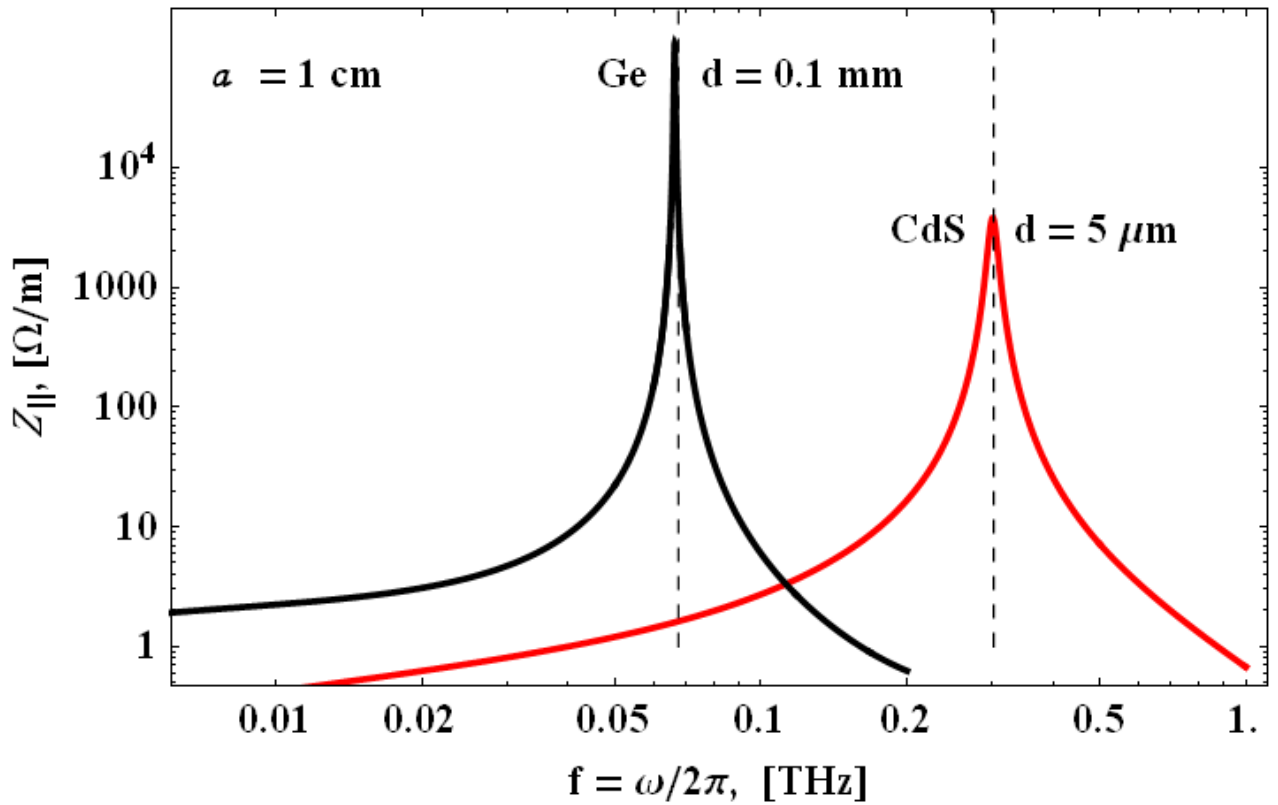
$$Z_{||}^0(\omega) = R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]^{-1} \quad 4,2$$

Որտեղ $\omega_0 = c \sqrt{2/r_0 d}$ ռեզոնանսային հաճախությունն է, R -ն զուգահեռ իմպեդանսն է, իսկ Q -ն բարորակությունը:



Նկ. 4.22 միամոդային երկշերտ արագացնող ալիքատարի սխեմատիկ տեսքը

1սմ շառավղով պղնձե երկշերտ ալիքատարի երկայնական իմպեդանսի հաշվարկային մոդելավորման արդյունքները ներկայացված են նկար 4.23-ում: Տվյալ դեպքում որպես ալիքատարի ներքին շերտ դիտարկվել են երկու տարբեր նյութեր՝ (Ge)գերմանիում(0,1 մմ հաստությամբ) և (CdS)կադմիումի սուլֆիդ(0,005մմ հաստությամբ): Հարկ է նաև նշել, որ վերը նշված նյութերի հաղորդականությունները հետևյալներն են՝ $\sigma = 2 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ [92] գերմանիումի և $\sigma = 600 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ [93] սուլֆիդ կադմիումի համար: Նկար 4,23-ում կետագծերով նշված են կանխատեսված անալիտիկ ռեզոնանսային հաճախականությունները, որոնք համապատասխանում են մոդելավորման տվյալների հետ 1%(CdS) և 4%(Ge) ճշտությամբ:



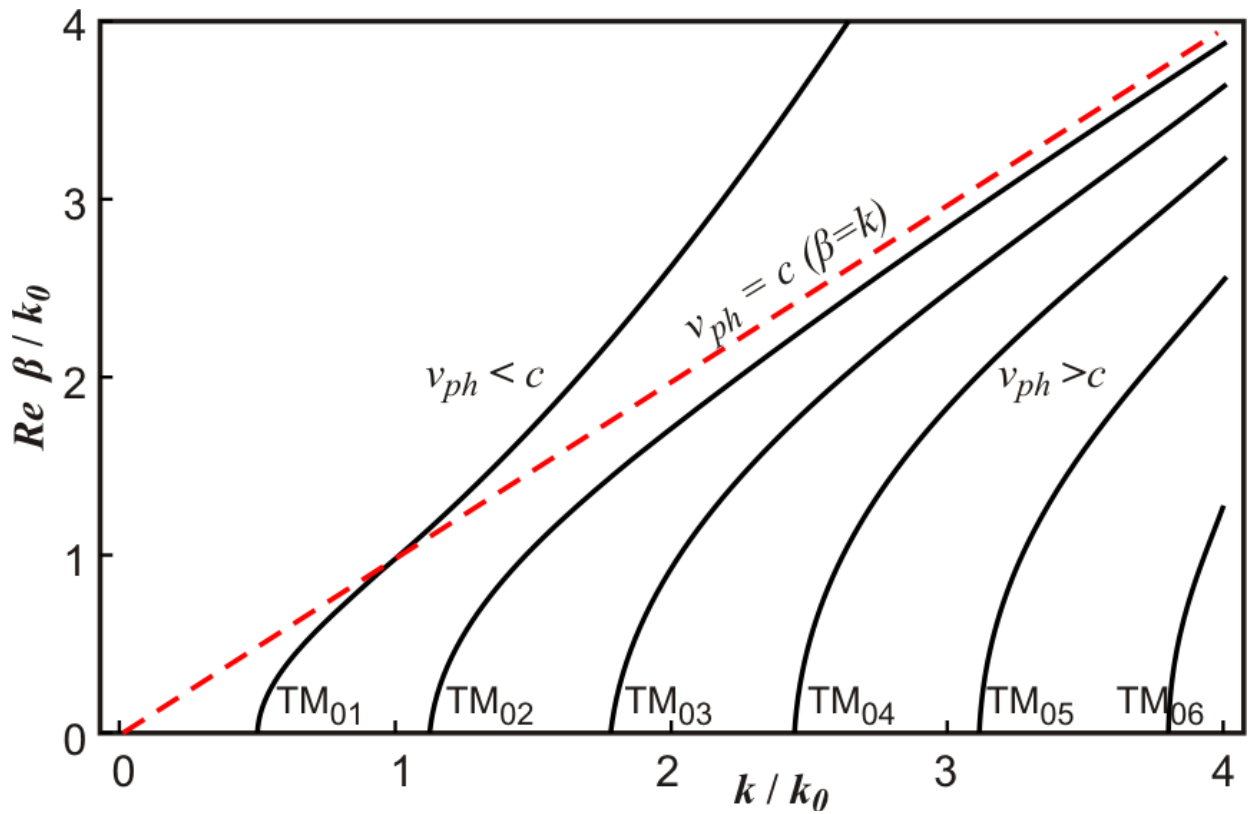
Նկ.4.23 երկշերտ ալիքատարի երկայնական իմպեդանսի հաշվարկային մոդելավորման արդյունքները

Վերը նշված արագացնող կառուցվածքի դիսպերսիոն առնչությունները $d \ll \delta \ll r_0$ հաճախականային տիրույթում կարող են ներկայացվել հետևյալ տեսքով՝

$$\frac{1}{\nu_{0n} r_0} \frac{J_1(\nu_{0n} r_0)}{J_0(\nu_{0n} r_0)} = \frac{1}{k^2 r_0 d} \quad (4,3)$$

Որտեղ՝ $J_0(x)$; $J_1(x)$ ֆունկցիաները զրո և առաջին կարգի Բեսսելի ֆունկցիաներն են: Նկար 4.24-ում ներկայացված են դիսպերսիոն կորերը, որտեղից երևում է, որ TM_0 ($n > 1$) մոդաների փուլային արագությունները վակուումում լույսի արագությունից մեծ են: Ինչպես նաև երևում է, որ TM_0 ֆունդամենտալ մոդայի կորը հատում է սինքրոն գիծը

$\omega_0 = c\sqrt{2}/r_0 d$ հաճախականության դեպքում: Արդյունքում, վերը նշված ալիքատարը հանդիսանում է միամոդային դանդաղ տարածվող ալիքով կառուցվածք:



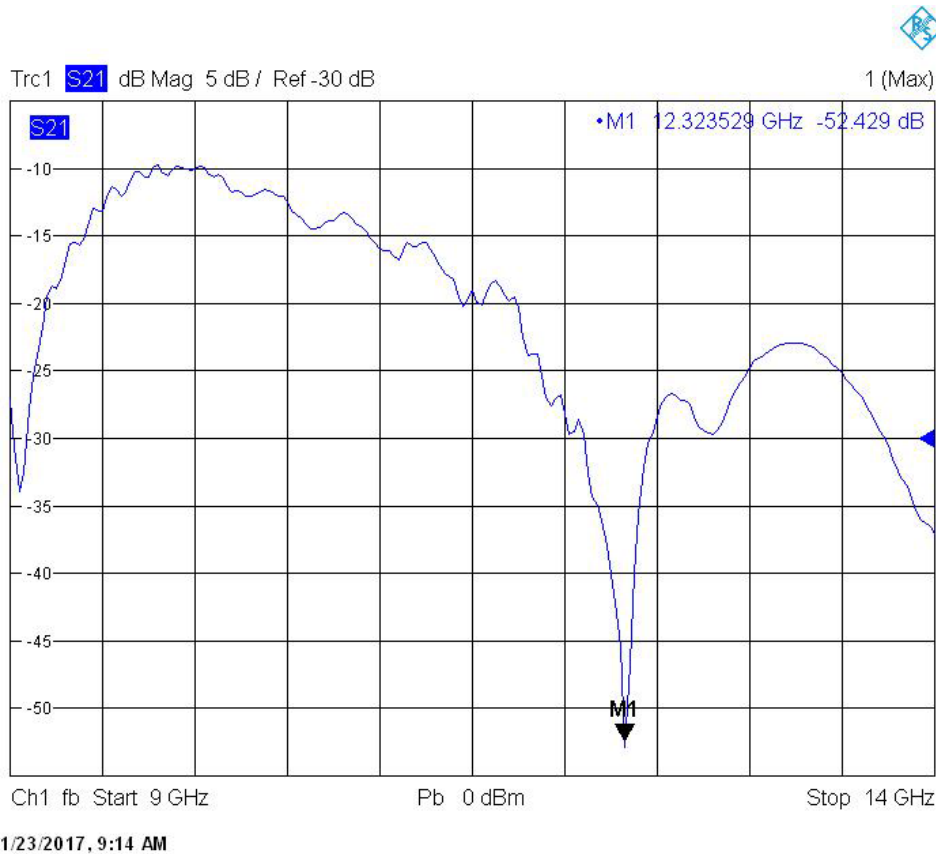
Նկ. 4.24 TM_{01} և բարձր TM_0 ֆունդամենտալ մոդաների դիսպերսիոն կորերը

Միամոդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի ռեզոնանսային հատկությունները հետազոտվել են, օգտագործելով ZVB14 վեկտորային ցանցային անալիզատորը, չափելով ռեզոնատորի փոխանցման S -պարամետրի S_{21} բաղադրիչը: Չափումները կատարվել են ուղղանկյունաձև պղնձե ռեզոնատորի համար $d = 1$ մմ հաստությամբ գերմանիումի ներքին շերտերով, որոնք ամրացված են կառուցվածքի վերին և ստորին ներքին մակերևույթներին: Նախագծված կառուցվածքը հնարավորություն է տալիս իրականացնել չափումներ տարբեր ուղղահայաց բացվածքներով (2 սմ, 3 սմ, և 4 սմ): Կառուցվածքի երկարությունն ու լայնությունը համապատասխանաբար 30 սմ և 6սմ են: Ընդ որում գերմանիումի շերտը ունի $\sigma = 2 \text{ } \Omega^{-1}\text{մ}^{-1}$ հաղորդականություն և $\epsilon' = 16\epsilon_0$ դիէլեկտրիկ կոնստանտ:

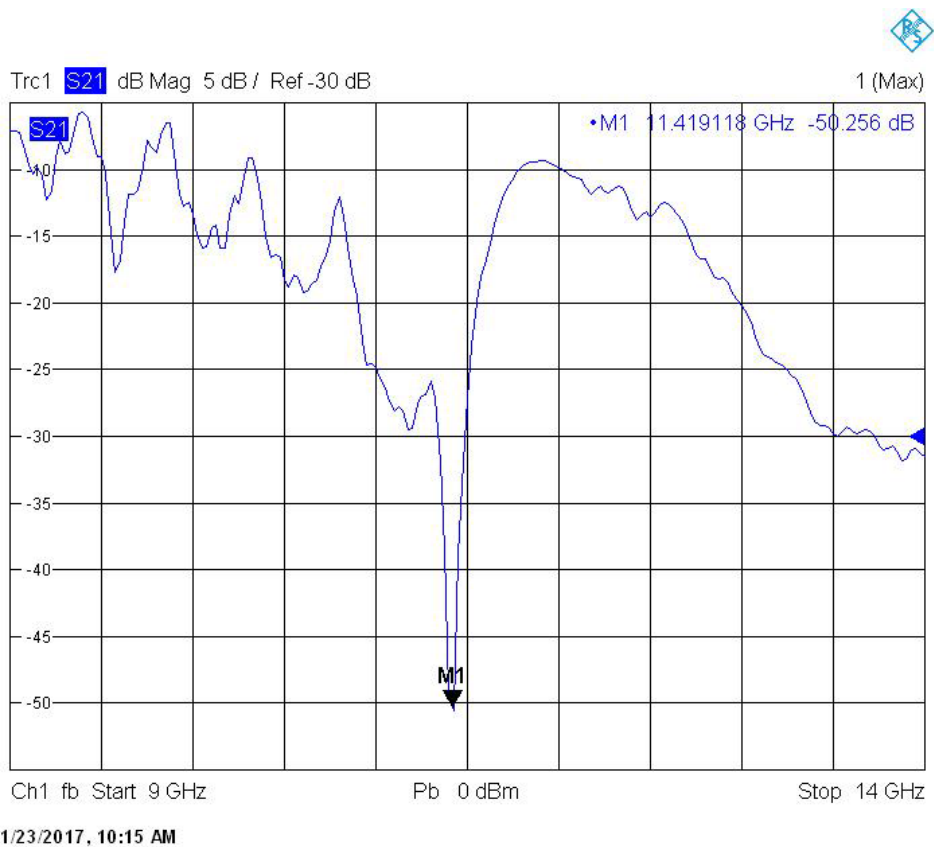
Գերմանիումի շերտի հաստության և կառուցվածքի ուղղահայաց բացվածքի չափի ընտրությունը պայմանավորված է վեկտորային ցանցային անալիզատորի չափվող հաճախականության տիրույթով, որը սահմանափակված է 14 ԳՀց-ով: Վերը նշված ուղղահայաց բացվածքի և գերմանիումի շերտի հաստության համար ռեզոնանսային հաճախականության վրա սկին-շերտի խորությունը մեծ է գերմանիումի

շերտի հաստությունից ավելի քան 3 անգամ ($\delta/d > 3$): Երկու զուգահեռ շերտերի կանխատեսված ռեզոնանսային հաճախականությունը համապատասխանում է գերբարձր հաճախականային տիրույթին՝ 9-15 ԳՀց:

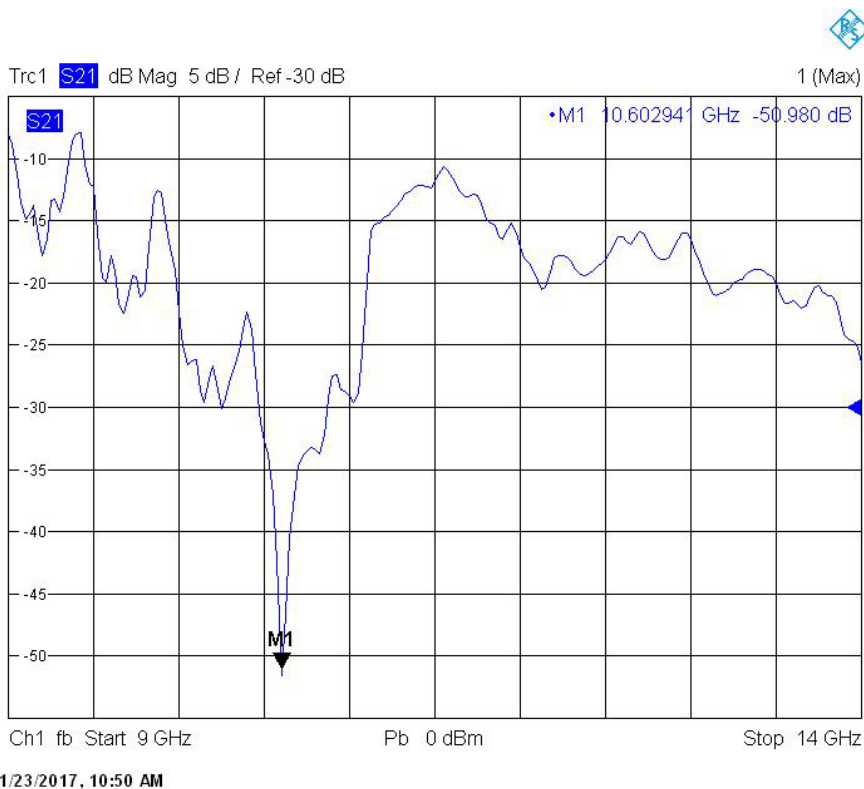
Նկար 4.25(ա,բ և գ)-ում ներկայացված է 1մմ հաստությամբ գերմանիումի ներքին շերտով 2սմ, 3սմ և 4սմ ուղղահայաց բացվածքներով պղնձե կառուցվածքի փոխանցման պարամետրերի հաճախականության սպեկտրը: Արդյունքները ներկայացնում են լոգարիթմային սանդղակով ներմուծման կորուստները $I_{\text{loss}} = -20 \log |S_{21}|$ (dB) [94], ըստ հաճախականության: Հատկանշական ռեզոնանսները կարելի է տեսնել $f = 10.6$ ԳՀց, 11.42 ԳՀց և 12.32 ԳՀց (նշված M1 տեղորոշիչով) հաճախությունների դեպքում համապատասխանաբար 4սմ, 3սմ և 2 սմ կառուցվածքի ուղղահայաց բացվածքների համար: Հարկ է նշել, որ վերը նշված կառուցվածքի հաշվարկային տվյալները հետևյալն են՝ 9.9 ԳՀց, 11.03 ԳՀց և 12.65 ԳՀց: Արդյունքում հաշվարկային և փորձարարական հաճախականությունների միջև հարաբերական տարբերությունները 1%- ից ցածր են



Նկար 4.25(ա) Ներմուծման կորուստը S_{21} ներքին գերմանիումի շերտով պղնձե ռեզոնատորի համար, որի կիսաբացվածքը՝ $a = 1$ սմ, իսկ գերմանիումի շերտի հաստությունը $d = 1$ մմ է:

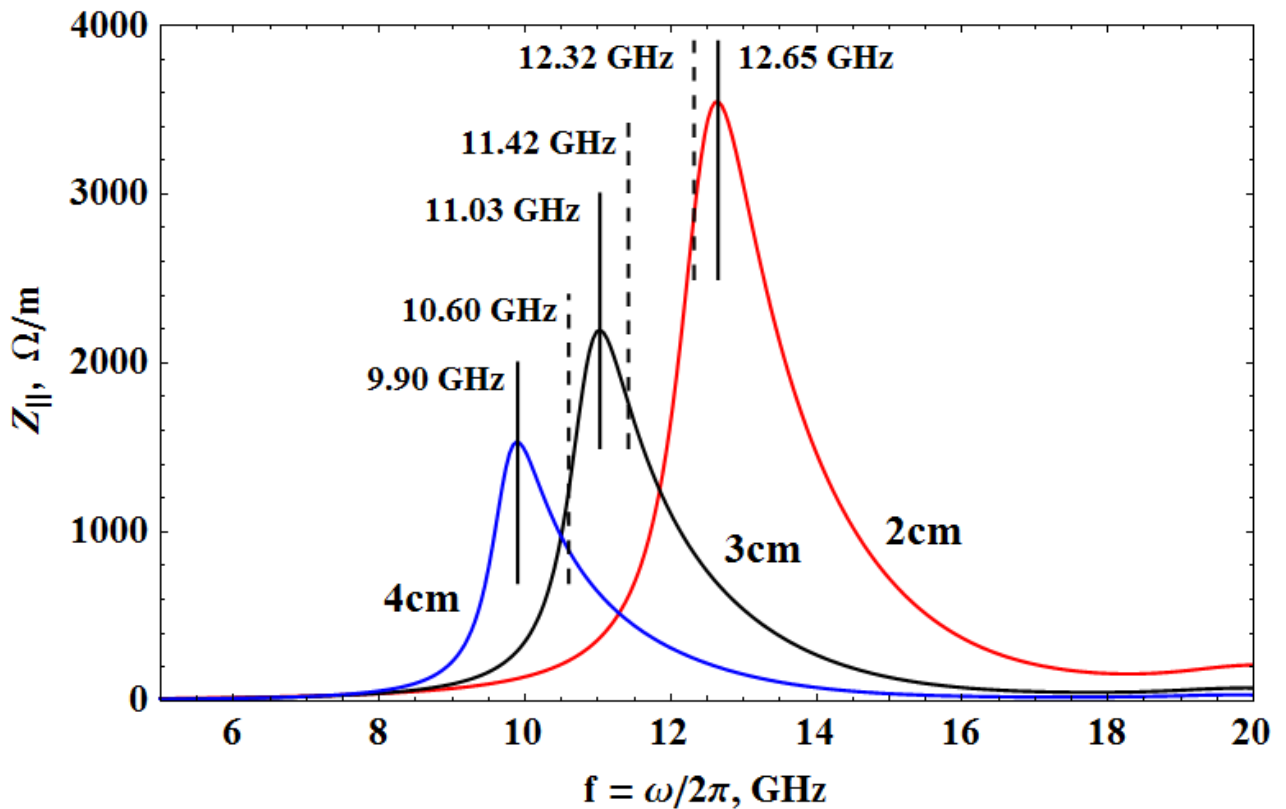


Նկար 4.25(բ) Ներմուծման կորուստը S_{21} ներքին գերմանիումի շերտով պղնձե ռեզոնատորի համար, որի կիսաբացվածքը՝ $a = 1.5$ սմ, իսկ գերմանիումի շերտի հաստությունը $d = 1$ մմ է:



Նկար 4.25(գ) Ներմուծման կորուստը S_{21} ներքին գերմանիումի շերտով պղնձե ռեզոնատորի համար, որի կիսաբացվածքը՝ $a = 2$ սմ, իսկ գերմանիումի շերտի հաստությունը $d = 1$ մմ է:

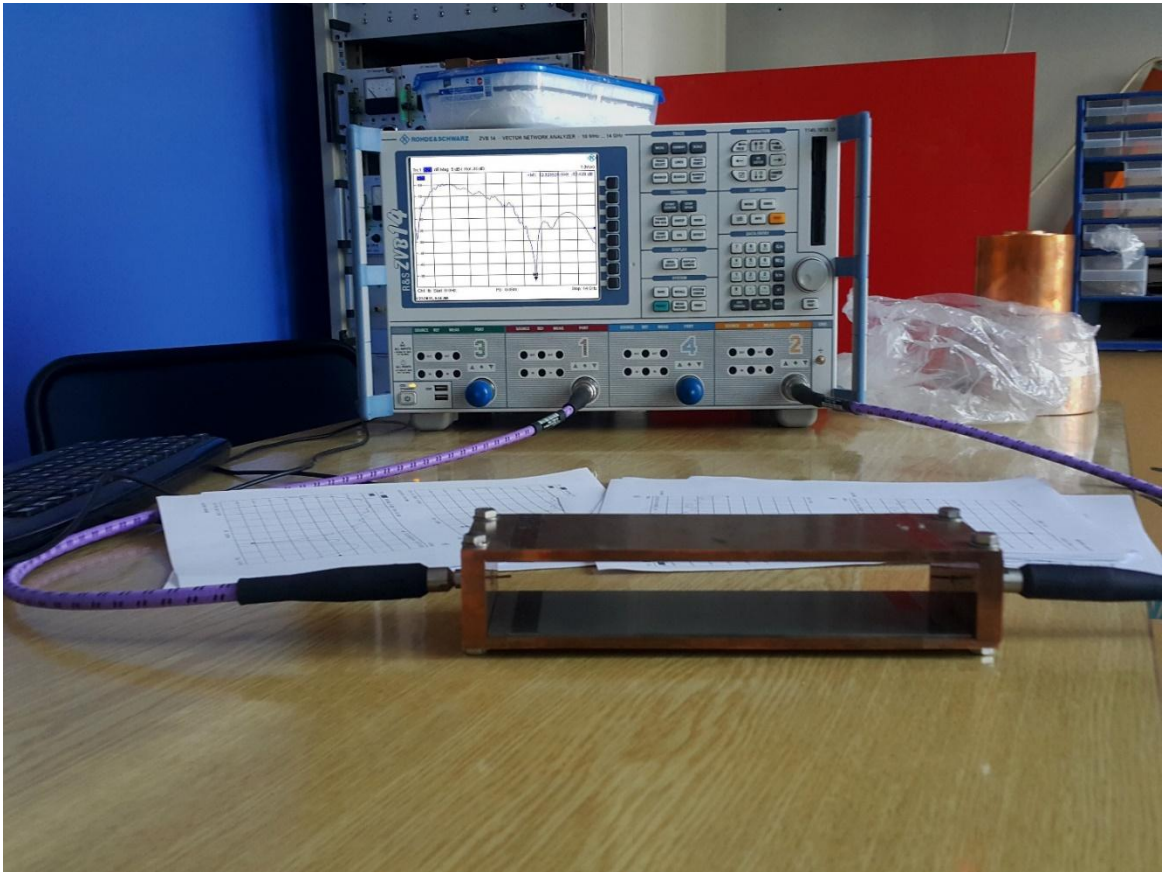
Նկար 4.26-ում ներկայացված են երկու զուգահեռ գերմանիումի անվերջ շերտերի հաշվարկային երկայնական իմպեդանսի և միամոդային եկշերտ արագացնող կառուցվածքի(ուղղանկյուն ռեզոնատոր) չափված ռեզոնանսային տվյալները: Ինչպես նաև բերված է(նկ.4.27) միամոդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի համար նախագծված և պատրաստված ուղղանկյուն ռեզոնատորը: Աղյուսակ 4.2-ում բերված է միամոդային ալիքատարի հաշվարկային և փորձարարական տվյալների համեմատությունը:



Նկ. 4.26 Երկու զուգահեռ գերմանիումի անվերջ շերտերի հաշվարկային երկայնական իմպեդանս(կետագիծ) և միամոդային եկշերտ արագացնող կառուցվածքի(ուղղանկյուն ռեզոնատոր) չափված ռեզոնանսային տվյալները(հոծ գիծ): Գերմանիումի շերտերի հաստությունը $d=1\text{մմ}$, իսկ շերտերի միջև հեռավորություններն են՝ $a=2, 3$, և 4սմ :

Աղյուսակ 4.2

Բացվածքի չ.	Հաշվարկային տվ.	Փորձարարական տվ.
$a = 2 \text{ սմ}$	12.65 ԳՀց	12.32 ԳՀց
$a = 3 \text{ սմ}$	11.03 ԳՀց	11.42 ԳՀց
$a = 4 \text{ սմ}$	9.9 ԳՀց	1.60 ԳՀց



Նկ.4.27 Միամուդային երկշերտ արագացնող կառուցվածքի(ուղղանկյուն ռեզոնատոր) ընդհանուր տեսքը ռեզոնանսային չափումների կատարման ժամանակ:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ.

1. Հետազոտությունների արդյունքում ակնհայտ դարձավ, որ պղնձե դետալների մեխանիկական մշակման ժամանակ անհրաժեշտություն կա կիրառել լրացուցիչ մեթոդներ, որոնք կնպաստեն դետալների արդյունավետ սառեցմանը և տաշեղների հեռացմանը մշակման գոտուց:
2. Հաշվարկային և փորձարարական եղանակների միջոցով որոշվել են պղնձե դետալների ջերմային դեֆորմացիաները այն դեպքում, երբ նրանք դիրքավորված են երրորդ էլեմենտով՝ տեխնոլոգիական բույթով: Հետազոտությունների արդյունքում տեխնոլոգիական բույթի նյութ է ընտրվել 316L մակնիշի չժանգոտվող պողպատը, որի ջերմային ընդարձակման գործակիցը բավականին մոտ է պղնձի ջերմային ընդարձակման գործակցին:
3. Մշակվել է վակուումում պղնձե դետալների զոդման տեխնոլոգիական գործընթաց, ինչպես նաև իրականացվել են հետևյալները՝
 - Փորձարարական արդյունքների միջոցով որոշվել է պղնձե դետալների միջև եղած զոդանյութի բացակի օպտիմալ չափը, որը անհրաժեշտ է զոդանյութի հոսքի համար:
 - Ապահովված է վակուումային զոդման միացության ստացումը՝ հնարավորինս նվազեցնելով պղնձե դետալների դեֆորմացիաները:
 - Որոշվել է պղնձե դետալների ներքին մակերևույթների օպտիմալ հեռավորությունը զոդանյութի բացակի եզրային կետից, որի շնորհիվ հնարավոր է դառնում բացառել զոդանյութի ներթափանցումը դեպի արագացնող կառուցվածքի ներքին մակերևույթ:
4. Նախագծվել և պատրաստվել է վակուումային զոդման նոր տեխնոլոգիական սարքավորում, որի միջոցով իրականացվել է պղնձե դետալների վակուումային զոդում: Հարկ է նշել, որ այս սարքավորման միջոցով արագացնող կառուցվածքների վակուումային զոդումը իրականացվում է հետևյալ երկու կարևորագույն խնդիրների լուծմամբ՝

- Պղնձե դետալների տաքացման ժամանակ առկա ջերմային դաշտի բաշխումը՝ համապատասխան պղնձի ջերմահաղորդականությանը
- Պղնձե դետալների ուղղահայաց դասավորվածության հետևանքով, առաջացած ճնշման տարբերությունը տարբեր միացման գոտիներում:

5. Փորձարարական եղանակի միջոցով կատարվել են երկմետաղական(պղինձ-գերմանիում) ռեզոնատորի ռեզոնանսային հատկությունների հետազոտությունները՝ հաշվարկային և փորձարարական տվյալների բավարար համընկնումով:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Status of 3 GEV Intermediate Energy Light Source Project CANDLE in Republic of Armenia / V. Tsakanov, G. Amatuni, V. Avagyan et al // Proc. of European Particle Accel. Conf. EPAC 2002. - Paris, France. - P. 763-765.
2. 3 GeV CANDLE Synchrotron Light Source, Design Report, ASLS-CANDLE, R-001-02 / A. Abashian, M. Aghasyan, G. Amatuni, V. Arakelyan, V. Avagyan et al. - Yerevan, 2002. - 267 p.
3. Wille K. The Physicus of Particale Acceleration. - New York: Oxford University Press, 2000. - 314 p.
4. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, International Basic Safety Standards. - International Atomic Energy Agency. - Vienna, 2014. - 471 p.
5. Turner S. CAS CERN Accelerator School, Vacuum Technology, CERN 99-05. - Geneva, 1999. - 326 p.
6. Bayesteh Sh., Floettmann K., Delsim-Hashemi H. Transverse EMITTANCE Measurement At Regae // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany, THPME119. - P. 3515-3517.
7. McKenzie J., Angal-Kalinin D., Jones J., Militsyn B. VELA (FORMERLY EBTF) Simulations and First Beam Commissioning // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC. - 2013. - Shanghai, China, MOPFI065. - P. 431-433.
8. AREAL Low Energy Electron Beam Applications In Life And Materials Sciences / V. Tsakanov, R. Aroutiounian, G. Amatuni et al // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. - 2016. - Vol. 829. - P. 248-253.
9. AREAL Test Facility for Advanced Accelerator and Radiation Source Concepts / V. Tsakanov, G. Amatuni, Z. Amirkhanyan et al // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 829. - 2016. - P. 284-290.
10. High Frequency Single Mode Traveling Wave Structure for Particle Acceleration / M. Ivanyan, V. Danielyan, B. Grigoryan et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 2016. - Vol. 829. - P. 187-189.
11. On the Resonant Behavior of Laminated Accelerating Structures / M. Ivanyan,

- V. Avagyan, V. Danielyan et al // Journal of Instrumentation. -N 12, P03019. - 2017.
12. Advanced Research Electron Accelerator Laboratory Based on Photocathode RF Gun, TUPC031 / B. Grigoryan, G. Amatuni, V. Avagyan et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2011. - San-Sebastian, Spain. - P. 1066 -1068.
 13. Beam Diagnostics And Control For AREAL RF Photogun Linac, THPME079 / G. Amatuni, B. Grigoryan, A. Lorsabyan et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 3418 - 3420.
 14. Yb Doped High-Energy UV Ultrafast Laser For AREAL Facility, WEPME060 / A. Lorsabyan, A. Gevorgyan, B. Grigoryan et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 2412 - 2414.
 15. Beam Phase-Space Study For AREAL RF Photogun Linac, TUPC032 / B. Grigoryan, G. Amatuni, I. Margaryan et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC 2011. - San-Sebastian, Spain. - P. 1069-1071.
 16. Delsim-Hashemi H., Floettmann K. Dark Current Studies At Relativistic Electron Gun For Atomic Exploration – REGAE, MOPRI027 // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 649 - 651.
 17. Design and Commissioning of S-Band RF Station For AREAL Test Facility, THPRI031 / A. Vardanyan, B. Grigoryan, L. Hakobyan et al // Proc. of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 3834 - 3836.
 18. AREAL Solenoid, Dipole and Steering Magnets Design and Performance, TUPRO078 / A. Tsakanyan, B. Grigoryan, A. Gevorgyan et al // Proc. of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 1223 - 1225.
 19. Status of AREAL RF Photogun Test Facility, MOPRI017 / B. Grigoryan, G. Amatuni, V. Avagyan et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2014. - Dresden, Germany. - P. 620 - 623.
 20. APLHA – The THz Radiation Source Based On AREAL, TUP083 / T. Vardanyan, G. Amatuni, V. Avagyan et al // Proc. of FEL2014. - Basel, Switzerland. - P. 561-563.
 21. Machining and Brazing of Accelerating RF Cavity / S. Ghodke, R. Barnwal, J. Mondal et al / International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum

- (ISDEIV), 14769640. - 2014, 28 Sept.- 3 Oct. - Mumbai, India. - P. 101-104.
22. Design, Fabrication and Measurement of the First Rounded Damped Detuned Accelerator Structure (RDDS1), TUA03 / J. Wang et al / XX International Linac Conference 2000. - Monterey, California. - P.377-379.
 23. Design and Fabrication of CLIC Test Structures, TUP057 / R. Zennaro, A. Grudiev, G. Riddone et al // Proc. Of Linear Accelerator Conference LINAC2008. - Victoria, BC, Canada. - P. 533-535.
 24. Design Concept, Manufacturing and Performance of Test Structures (6 GHz or C-band) for the Linear Accelerator of the SwissFEL X-ray laser system, V 425 072005 / U. Ellenberger, M. Bopp, H. Fitze et al // 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI), 2012.
 25. Fabrication of The CERN/PSI/ST X-Band Accelerating Structures, MOPC012 / M. Dehler, S. Atieh, S. Gudkov et al // Proc. Of International Particle Accelerator Conference IPAC2011. - San Sebastián, Spain. - P. 86-88.
 26. Status report on SALAF technical activity on vacuum brazing on X-band linear accelerating structures and RF deflector of the SPARC project at Frascati Laboratories SPARC-RF-07/004 / S. Bini, A. Clozza, P. Chimenti et al. - June 11, 2007. - P. 2-3.
 27. Wang W., Lewandowski R., Van Pelt W. Fabrication Technologies of The High Gradient Accelerator Structures At 100MV/m Range, THPEA064 // Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC 2010. - Kyoto, Japan. - P. 3819-3821.
 28. Hanna S. RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications, 2012. - 215 p.
 29. Fabrication OF X-BAND Accelerating Structures At Fermilab, MOPLT119 / T. Arkan, C. Boffo, E. Borissov et al // Proc. Of European Particle Accelerator Conference EPAC. - 2004. - Lucerne, Switzerland. - P. 815-817.
 30. Status of the Manufacturing Process For the SwissFEL C-Band Accelerating Structures, TUPSO17 / U. Ellenberger, L. Paly, H. Blumer et al // Proc. of FEL 2013.

- New York, NY, USA. - P. 245-249.
31. Engineering Design And Fabrication Of X-Band Damped Detuned Structure For The CLIC Study, MOPC037 / V. Soldatov, D. Gudkov, A. Samoshkin et al // Proc. of IPAC 2011. - San Sebastián, Spain. - P. 156-154.
32. The SwissFEL C-Band RF Pulse Compressor: Manufacturing And Proof Of Precision By RF Measurements, THP056 / U. Ellenberger, H. Blumer H., M. Bopp et al // Proc. of FEL 2014. - Basel, Switzerland. - P. 859-863.
33. Accelerator Structure Development for NLC / H. Hoag, H. Deruyter, C. Pearson et al // Proc. of PAC 1993. - Washington, DC, USA. - P. 907-909.
34. Precise Fabrication of 1.3M-Long X-Band Accelerating Structure, THP47 / T. Higo, H. Sakai, Y. Higashi et al // Proc. of Linear Accelerator Conference LINAC 1996. - Geneva, Switzerland. - P. 767-769.
35. Brazing Techniques for Side-Coupled Electron Accelerator Structures / L. Hansborough, H. Clark, R. DePaula et al // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. - Volumes 24-25, Part 2. - 1987. - P. 863-867.
36. Higo T. Progress OF X-Band Accelerating Structures, FR104, Proc. of Linear Accelerator Conference LINAC 2010. - Tsukuba, Japan. - P. 1038-1042.
37. Elmer J., Klingmann J. and Van Bibber K. Diffusion bonding and brazing of high purity copper for linear collider accelerator structures // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. - Vol. 4, 053502. - 2001.
38. Barrera D. C-Band LINAC For a Race Track Microtron. - Madrid, Spain, 2010. - P. 179-200.
39. Avagyan V. Development Of Technology For Brazing And Diffusion Welding Of Copper Accelerating Structures // Physical Review Special Topics. - Accelerators and Beams. - Vol. 9, 083501. - 2006.
40. Авагян В., Бабаян А., Тунян И. Вакуумная индукционная установка для пайки ускоряющих структур // Изв. НАН РА и ГИУА. - 2010 - Т. LXIII, №1. - С. 55-62.
41. A C-band Accelerator for an X-ray Free-Electron Laser (XFEL) Facility / K. Okihira, S. Miura, N. Ikeda, et al // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. - 2012. - Vol.

- 49, N 2. - P. 27-31.
- 42.Design and Fabrication of an X-Band Traveling Wave Deflection Mode Cavity for Longitudinal Characterization of Ultra-Short Electron Beam Pulses, TUPC072 / A. Murokh, R. Agustsson, S. Boucher et al // Proc. Of European Particle Accelerator Conference EPAC 2008. - Genoa, Italy. - P. 1215-1217.
- 43.Jensen E. Fabrication and Testing of RF Structures. - Geneva, Switzerland. - 2003. - P. 1-25.
- 44.Development of X-band Accelerating Structures for high gradients / S. Bini, V. Chimenti, A. Marcelli et al // Chinese Physics C.-2012.-Vol. 36, № 7.-P. 639-647.
- 45.Mass Production Report Of C-Band Choke Mode Accelerating Structure and RF Pulse Compresso, TUP110 / K. Okihira, F. Inoue, T. Hashirano et al // Proc. of Linear Accelerator Conference LINAC 2010. - Tsukuba, Japan. - P. 668-670.
- 46.Сучков Д. Медь и ее сплавы. – М.: Металлургия, 1967. - 248 с.
- 47.Комар Е. Основы ускорительной техники. – М.: Атомиздат, 1975. - 368 с.
- 48.Справочник по диафрагмированным волноводам / О. Вальднер, М. Собенин и др. - М.: Атомиздат, 1977. – 286 с.
- 49.Вахрушин Ю. Линейные индукционные ускорители.- М.: Атомиздат, 1978.- 245 с.
- 50.Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения: Учеб. пособие / М.А. Вишняков, Ю.А. Вашуков. - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2005. - 83 с.
- 51.Humphries S. Principles of Charged Particle Acceleration. QC787.P3H86 1986. – 561 p.
- 52.Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.- 366 с.
- 53.Плисковский В. Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. – М.: Машиностроение, 1976. - 64 с.
- 54.ГОСТ 5632 – 72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Государственный стандарт СССР.
- 55.Грошковский Я. Техника высокого вакуума. – М.: Мир, 1975. - 622 с.

- 56.Лашко С., Лашко Н. Пайка металлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
- 57.Колев К. Точность обработки и режимы резания. – М.: Машиностроение, 1968. – 130 с.
- 58.Лашнев С., Борисов А., Емельянов С. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: Монография. – Курск, 1997. – 391 с.
- 59.Петрухин С. Основы проектирования режущей части металлорежущих инструментов. – М.: Машгиз, 1960. – 162 с.
- 60.Справочник инструментальщика / И. Ординарцев, Г. Филиппов, А. Шевченко и др.; Под общ. ред. И. Ординарцева – Л., Изд-во “Машиностроение”, 1987. – 846 с.
- 61.Справочник по обработке металлов резанием / Ф. Абрамов, В. Коваленко, В. Любимов и др. – М., 1983. – 239 с.
- 62.Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Под ред. А. Дальского, А. Косиловой, Р. Мещерякова, А. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 912 с.
- 63.Стрелец А., Фирсов В. Размерные расчёты в задача оптимизации конструкторско-технологических решений. – М.: Машиностроение, 1988. – 120 с.
- 64.Трент Е. Резание металлов / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
- 65.Шатин В., Шатин Ю. Справочник конструктора-инструментальщика. – М.: Машиностроение, 1975 – 323 с.
- 66.Анурьев В. Справочник конструктора машиностроителя. – М.: Машиностроение, 1979. – Т 1. – 729 с.
- 67.Աղբալյան Ս., Ալայան Ա., Ավինյան Յու. Նյութագիտություն. Ճարտարագիտական մասնագիտությունների լաբորատոր աշխատանքների մեթոդական ցուցումներ. – Երևան, 2004. – 118 էջ:
- 68.Гуляев А. Металловедение. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
- 69.Геллер Ю., Рахштадт А. Металловедение методы анализа лабораторные работы и задачи. – М.: Metallurgy, 1983. – 384 с.
- 70.Самохоцкий А., Кунявский М. Лабораторные работы по металловедению. – М.:

- Машиностроение, 1971. – 184 с.
71. Солнцева Ю. Металловедение и технология металлов. – М.: Металлургия, 1988. – 512 с.
 72. Технология металлов и материаловедение / Б. Кнорозов, Р. Усова, А. Третьяков и др. – М.: Металлургия, 1987. – 800 с.
 73. Даниелян В., Дехтярев В., Мкртчян Т. Формирование тонких пленок германия на медных подложках // Вестник инженерной академии Армении. – 2017. – Т.14, № 1. – С. 121-123.
 74. Design & fabrication of the experimental diffusion welding machine / A. Gevorgyan, V. Avagyan, V. Danielyan et al // Proc. of International conference. Advanced materials and technologies, 21-30 October. – Tbilisi, Georgia, 2015. – P. 311-313.
 75. Диффузионная сварка сегодня / В. Авагян, В. Даниелян, В. Дехтярев и др // Вестник инженерной академии Армении. – 2016. – Т.13, №2. – С. 291-295.
 76. Физика и техника сверхвысокого вакуума. Сборник статей под общей редакцией Г.Л. Саксаганского. – Л.: Машиностроение, 1968. – 190 с.
 77. Вакуумная техника / Е. Фролов, В. Минайчев, А. Александрова и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
 78. Иванов В. Безмасляные вакуумные насосы. – Л., Машиностроение, 1980. – 160 с.
 79. Лившиц Б. Металлография: Учебник для вузов, 3-е изд. – М.: Металлургия, 1990. – 236 с.
 80. Սալտիկով Ա., Մամյան Ս. Խմբ.՝ Պողոսյան Ի. – 1976. -Երևան. - 355 էջ:
 81. Исследование Микротвердости в Зоне Соединения Титана Со Сталью / В.Авагян, А. Геворгян, В. Варданян и др. // Сварка и диагностика. – 2014. – №1 – С. 22-26.
 82. Avagyan V., Babayan A., Dobrovolski N., Tunyan I. Diffusion Welding of Heterogeneous Materials in Accelerating Technique // Proceeding of EPAC 2004. – Lucerne, Switzerland, 5-9 July. – 2004. – P.1586-1587.
 83. Avagyan V., Mikaelyan R., Petrosyan A. Vacuum Diffusion Bonding of Flange-foils for X-ray Windows // Proceedings of AIP Conference. – 2007. – V. 879. – P. 1046-1048.

- 84.Конюшков Г., Копылов Ю. Диффузионная сварка в электронике. – М.: Энергия, 1974. – С. 71-73.
- 85.Danielyan V.A. Development of the Vacuum Brazing Process of Copper Accelerating Structures // Proceedings of Engineering Academy of Armenia. – 2016. – Vol. 13, № 2. – P. 304-307.
- 86.Авагян В.Ш., Даниелян В.А. Некоторые вопросы и технологические особенности изготовления ускоряющей структуры // Вестник инженерной академии Армении.- 2017. – Т. 14, № 1 – С. 99-104.
- 87.Գյուլսի արտոնագիր, № 3025A. Վակուումային զոդման սարք / Վ.Շ.Ավագյան, Վ.Ա.Դանիելյան, Վ.Ս.Դեխտյարով և այլք, 2016:
- 88.High Power Radio Frequency Generation by Relativistic Beams in Dielectric Structures / P. Schoessow et al // J. Appl. Phys. 84, 1998. – P. 663.
- 89.High Frequency, High Gradient Dielectric Wakefield Acceleration Experiments at SLAC and BNL / J. Rosenzweig et al // American Institute of Physics Conference Proc., 1299. – 2010. – P. 364.
- 90.Ivanyan M. and Tsakanov V. Longitudinal impedance of two-layer tube // Phys. Rev. Special Topics. – Accelerator and Beams 7, 114402. – 2004.
- 91.Narrow-band impedance of a round metallic pipe with a low conductive thin layer / M. Ivanyan et al // Phys. Rev. Special Topics. – Accelerator and Beams 7, 021302. – 2014.
- 92.Sze S. Physics of Semiconductor Devices. – New York, U.S.A.: John Wiley and Sons, 1981.
- 93.Anbarasi M., Nagarethinam V. and Balu A. Studies on the Physical Properties of CdS Thin Films with Different S/Cd Molar Ratios Fabricated by Spray Pyrolysis Technique Using Perfume Atomizer, 2015. – IJASER 4. – P. 135.
- 94.Collin R. Foundations for Microwave Engineering. – New York, U.S.A.: John Wiley and Sons, 2001.