

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ,
ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՍԱՀԱԿՅԱՆ Նինա Գագիկի

**ԵՐԿԱԹՈՎ ԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ MAX-ՖԱԶԱՅԻՆ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՈՎ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե 16.02 - «Մետալուրգիա» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ՏԱԱԿՅԱՆ Նինա Գագիկովնա

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ С МАХ-ФАЗОВОЙ
СТРУКТУРОЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ И КРЕМНИЕМ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.02 - "Металлургия"

ԵՐԵՎԱՆ 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) գիտական խորհրդի կողմից:

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Վիլենա Հակոբի Մարտիրոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Հենրիկ Ռուբենի Դրմեյան
տ.գ.թ., դոցենտ Դավիթ Գազիկի Վարդանյան
Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Մ.Գ. Մանվելյանի անվան
Ընդհանուր և անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ (ք. Երևան)

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է՝ 2026թ. փետրվարի 20-ին ժամը 15⁰⁰-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ՀՀ ԲԿԳԿ-ի «Մետալուրգիա և նյութագիտություն» մասնագիտական խորհրդի (թվանիշ՝ 031) «Մետալուրգիա» ենթախորհրդի (թվանիշ՝ Ե.16.02) նիստում:

Հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է «20» հունվարի 2026թ.-ին:

031 մասնագիտական խորհրդի գիտական
քարտուղար, տ.գ.դ., պրոֆեսոր

Ա.Մ. Հովհաննիսյան

Тема диссертации утверждена ученым советом Национального политехнического университета Армении (НПУА).

Научный руководитель: д.т.н., профессор

Вилена Акоповна Мартиросян

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор
к.т.н., доцент

Генрих Рубенович Дрмеян
Давид Гагикович Варданян

Ведущая организация: Институт общей и неорганической химии им. М.Г. Манвеляна НАН РА (г. Ереван)

Защита диссертации состоится "20" февраля 2026г. в 15⁰⁰ч. на заседании подсовета "Металлургии" (шифр 05.16.02) Специализированного совета "Металлургия и материаловедение" (шифр 031) КВОН РА, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан "20" января 2026г.

Ученый секретарь Специализированного
совета, д.т.н., профессор

А.М. Оганесян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը և հրատապությունը: Արդի գիտության և տեխնիկայի արագ զարգացումը պահանջում է գործառական հատկություններով նոր նյութերի ստեղծում: Այդ առումով առանձնահատուկ հետաքրքրություն են ներկայացնում MAX-ֆազերը, որոնք հանդիսանում են նոր դասի կոմպոզիտային նյութեր և միավորում են մետաղների ու կերամիկական նյութերի դրական հատկանիշները: Այս նյութերը ներկայացվում են $M_{n+1}AX_n$ ընդհանուր բանաձևով ($n=1, 2, 3, \dots$), որում M-ը անցումային d-մետաղ է (օրինակ՝ Ti, Fe, Ni, Co, V, Cr, Mo և այլն), A-ն՝ p-տարր (Si, Ga, Ge, Al, Sn և այլն), իսկ X-ը՝ ածխածին կամ ազոտ: Բազմաշերտ կառուցվածքի շնորհիվ՝ MAX-ֆազերը դրսևորում են բարձր ամրություն, պլաստիկություն, ջերմահաղորդականություն, քիմիական և ջերմային կայունություն, ունեն հալման բարձր ջերմաստիճան, ջերմային ընդարձակման ցածր գործակից ու չեն կորցնում իրենց կայունությունը 1000°C -ից բարձր ջերմաստիճաններում, ինչպես նաև կայուն են բարձրջերմաստիճանային օքսիդացման նկատմամբ, հեշտ ենթարկվում են մեխանիկական մշակման և այլն: Նշված հատկությունները պայմանավորված են այս նյութերի կառուցվածքային առանձնահատկություններով. պարունակում են կարբիդներ, սիլիցիդներ, միջմետաղական միացություններ, որոնք ձևավորում են կայուն շերտավոր կառուցվածքներ:

MAX-ֆազերի շարքում, որպես տեխնիկական առումով ուշագրավ նյութ, առանձնանում է Ti_3AlC_2 -ը, որը կարող է դառնալ բարձրջերմաստիճանային պայմաններում աշխատող կոմպոզիտային նյութերի մայրակ: Նման նյութերի ստացման հեռանկարային մեթոդներից մեկը բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզն է (ԲԻՍ), որն իրականացվում է $1700\ldots 2000^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանային միջակայքում: ԲԻՍ գործընթացին մասնակցող տարրերից յուրաքանչյուրը կատարում է որոշակի գործառույթ: Օրինակ՝ C-ն հանդիսանում է որպես վերականգնիչ և նպաստում է գազային պղպջակների առաջացմանը՝ նյութին հաղորդելով ծակոտկենություն և նվազեցնելով խտությունը: Ti-ը հանդիսանում է առանցքային տարր և փոխազդելով ածխածնի ու պլումինի հետ՝ ձևավորում է TiC և Ti-Al միացություններ, որոնք հետագայում փոխազդում են՝ առաջացնելով Ti_3AlC_2 և հարակից ֆազեր: Al-ը նույնպես ունի էական նշանակություն. նպաստում է անհրաժեշտ ջերմային պայմանների ստեղծմանը և մեծացնում է սինթեզի ակտիվությունը:

Բացի նշվածից, վերջին տարիներին աճել է հետաքրքրությունը ֆերոմագնիսական հատկություններով օժտված MAX-ֆազերի նկատմամբ, որոնք պարունակում են Fe, Ni, Co տարրեր և մեծ կիրառություն են գտել միկրոէլեկտրոնիկայի և սպինտրոնիկայի ոլորտում: Կարող են կիրառվել նաև բարձր

ջերմաստիճաններում աշխատող սարքերում, էլեկտրական կոնտակտների ծածկույթներում, ինչպես նաև ատոմային էներգետիկայում:

Վերը նշվածը վկայում է, որ աշխատանքն ունի կիրառական մեծ նշանակություն և բխում է ինչպես արդի տեխնիկական պահանջներից, այնպես էլ Հայաստանի գիտատեխնիկական զարգացման հեռանկարներից: MAX-ֆազերի ստացման, հատկությունների կառավարման և որոշակի ուղղությամբ կատարվող հետազոտությունները կարող են հիմք հանդիսանալ ժամանակակից մետալուրգիական և նյութագիտական մեթոդներով այդ նյութերի ստացման համար, որոնց պահանջարկը մեծ է բարձր տեխնոլոգիաների ոլորտում:

Հետազոտության նպատակը և խնդիրները: Ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի եղանակով մշակել երկաթով և սիլիցիումով լեգիրված MAX-ֆազային կառուցվածքով համաձուլվածքների ստացման տեխնոլոգիա և հետազոտել Ti-ի, FeSi-ի և Al-ի մետաղափոշիների ու ածխածնափոշու էկվիմոլյար խառնուրդից սինթեզված Ti_3AlC_2 համաձուլվածքի հիմքով $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ MAX-ֆազի կառուցվածքագոյացման ու հատկությունների ձևավորման գործընթացները:

Նշված նպատակին հասնելու համար աշխատանքում առաջարկվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

1. MAX-ֆազերի ստացման գործընթացի և առանձնահատկությունների բացահայտումը և առաջարկվող տեխնոլոգիայի հիմնավորումը:

2. Երկաթի և տիտանի կարբիդների ու սիլիցիդների ստացման գործընթացի թերմոդինամիկական հիմնավորումը:

3. Բովախառնուրդի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման և դրանից MAX-ֆազերի ստացման բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի մեխանիզմի, կինետիկայի և կառուցվածքագոյացման սկզբունքների հիմնավորումը:

4. Բովախառնուրդի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման և ստացված արգասիքի այլոմինաթերմային վերականգնման եղանակով MAX-ֆազերի ստացման տեխնոլոգիական սխեմայի մշակումը և առաջարկված տեխնոլոգիայի տեխնիկատնտեսական հիմնավորումը:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները.

1. MAX-ֆազերի ստացման գործընթացի սկզբունքները, առանձնահատկություններն ու տեխնոլոգիան:

2. Երկաթի և տիտանի կարբիդների ու սիլիցիդների ստացման գործընթացի թերմոդինամիկական:

3. Բովախառնուրդի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման և դրանից MAX-ֆազերի ստացման բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի մեխանիզմը, կինետիկան և կառուցվածքագոյացման սկզբունքները:

4. Բովախառնուրդի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման և ստացված արգասիքի այլոմինաթերմային վերականգնման եղանակով MAX-

ֆազերի ստացման տեխնոլոգիական սխեման և առաջարկված տեխնոլոգիայի տեխնիկատնտեսական հիմնավորումը:

Աշխատանքի գիտական նորույթը: Առաջին անգամ սինթեզվել է տիտանի կարբոսիլիցիդի հիմքով նոր MAX-ֆազ՝ $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$, որում տիտանի մի մասը փոխարինվել է երկաթով, իսկ այլումինի մի մասը՝ սիլիցիումով: Այն, բացի մետաղներին և կոմպոզիտային նյութերին բնորոշ հատկություններից, դրսևորում է նաև արժեքավոր ֆերոմագնիսական հատկություններ: Բացի այդ, երկաթը և սիլիցիումը ներմուծվում են համաձուլվածքի մեջ ոչ թե մաքուր մետաղների, այլ մետալուրգիական գործարանների թափոնախարամներից ստացված և էժան FeSi լիգատուրայի ձևով: Շնորհիվ երկաթի և սիլիցիումի առկայության՝ ստացված MAX-ֆազի մեջ առաջանում են Fe_5Si_3 , Fe_3Si և FeSi ֆազեր, որոնք համաձուլվածքին հաղորդում են լրացուցիչ ֆերոմագնիսական հատկություններ: Արդյունքում միաժամանակ ձևավորվում են տիտանի և երկաթի թե՛ սիլիցիդներ և թե՛ կարբիդներ:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը: Առաջին անգամ սինթեզվել է բարդ կառուցվածք ունեցող $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ հիմքով և լրացուցիչ մագնիսական հատկություններով օժտված նոր MAX-ֆազ, որը կարող է օգտագործվել միկրոէլեկտրոնիկայում և հատուկ տեխնիկայում: Նշված MAX-ֆազից ստացված փոշիներից փոշեմետալուրգիական եղանակով կարող են պատրաստվել տարբեր արտադրատեսակներ՝ բարձր ամրությամբ, հրակայունությամբ, կոռոզիակայունությամբ, մաշակայունությամբ, շերտավոր, գրաֆիտանման կամ լամինատային ծակոտկեն կառուցվածքով ու միաժամանակ կունենան մագնիսական և էլեկտրական հատկություններ:

Ատենախոսության տեսական, տեղեկատվական և մեթոդական հիմքերը: Ատենախոսության համար հիմք են հանդիսացել հայրենական և արտասահմանյան ժամանակակից աշխատությունները: Հետազոտությունների համար տեղեկատվական հիմք են հանդիսացել հրատարակված պաշտոնական տեղեկատուները և տեղեկագրերը, պարբերականները, արտոնագրերը, ԳՕՍՏ-երը և այլն: Հետազոտությունների արդյունքում կիրառվել են մետաղագրական, ռենտգենաֆազային և այլ վերլուծական մեթոդներ:

Աշխատանքի արդյունքների փորձարկումը և հրապարակումները: Ատենախոսության հիմնադրույթները և գործնական հանձնարարականները զեկուցվել ու քննարկվել են միջազգային, հանրապետական, ինչպես նաև Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի 2018...2025 թթ. տարեկան գիտաժողովներում: Ատենախոսության արդյունքները հրատարակվել են 14 աշխատանքներում, որոնցից 10-ը գիտական հոդվածներ են, ընդ որում՝ երկուսն առանց համահեղինակների, իսկ 4-ը՝ արտոնագրեր:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, հինգ գլխից, ընդհանուր եզրակացությունից և

157 անուն օգտագործված գրականության ցանկից: Այն շարադրված է համակարգչային տպագիր 145 էջի վրա, պարունակում է 43 նկար և 18 աղյուսակ:

ԱՏԵՆԱՆՈՍՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածությունում հիմնավորվել են թեմայի արդիականությունը և հրատապությունը, շարադրվել են նպատակը, առաջադրված խնդիրներն ու պաշտպանության ներկայացվող դրույթները, հետազոտության առարկան, ինչպես նաև ձևակերպվել են գիտական նորույթը և աշխատանքի կիրառական նշանակությունը:

Առաջին գլխում կատարվել է գրականության վերլուծություն: Ցույց է տրվել, որ MAX-ֆազերի ստացումը բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՍ) եղանակով խիստ արդիական է և հեռանկարային: Այն ավանդական մեթոդների համեմատ ունի մի շարք առավելություններ, հատկապես պետք է նշել ցածր էներգատարողությունը և բարձր արտադրողականությունը: ԲԻՍ եղանակը հնարավորություն է ընձեռում՝ ստանալու տարբեր բաղադրությամբ կոմպոզիտային նյութեր և համաձուլվածքներ, որոնցից են Ti_3SiC_2 , Ti_2AlC , Ti_3AlC_2 , Ti_2AlN և այլն: Հատկապես մեծ է հետաքրքրությունը $Ti-Si-Al-C$ համակարգի կոմպոզիտային նյութերի նկատմամբ, որոնք ցուցաբերում են կերամիկական և մետաղական նյութերին բնորոշ հատկություններ, կայուն են ջերմային տատանումների և օքսիդացման նկատմամբ, օժտված են բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ, ենթարկվում են մեխանիկական մշակման, օժտված են բարձր հարվածային մածուցիկությամբ և այլն:

Վերլուծության արդյունքում ցույց է տրվել, որ $Ti-Si-Al-C$ համակարգի կոմպոզիտային նյութերի գլխավոր թերությունը դրանց ցածր ֆերոմագնիսական թափանցելությունն է, ինչը, բնականաբար հանգեցնում է կիրառական հնարավորությունների նվազմանը: Հիմնավորվել է, որ ֆերոմագնիսական հատկությունների լավացման նպատակով MAX-ֆազերը պետք է լեզրիել երկաթով, նիկելով, կոբալտով կամ դրանց համաձուլվածքներով:

Երկրորդ գլխում ընտրվել և հիմնավորվել են հետազոտությունների համար անհրաժեշտ նյութերը, ուսումնասիրվել են դրանց բնութագրերը և ընտրվել հետազոտության մեթոդիկան:

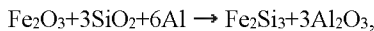
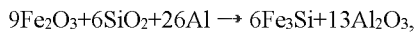
Կատարվել է բովանդակողի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացում և $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ MAX-ֆազի ստացում բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի եղանակով, որի համար նախագծվել և պատրաստվել է օդի մուտքը փոխազդեցության տարածք արգելափակող փորձնական սարքավորում: Տեխնոլոգիական ռեժիմների վերահսկման նպատակով ընտրվել են ժամանակակից չափիչ և հսկիչ սարքավորումներ:

Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի (ԲԻՍ) գործընթացի արդյունքների գնահատման նպատակով ընտրվել և հիմնավորվել են ֆազային փոխակերպությունների և կառուցվածքային վերլուծության, միկրոկառուցվածքի և բնութագրերի ուսումնասիրման, ֆիզիկաքիմիական և

թերմոդինամիկական հիմնավորման, մեխանաքիմիական ակտիվացման և մանրացման մեթոդներ ու սարքավորումներ:

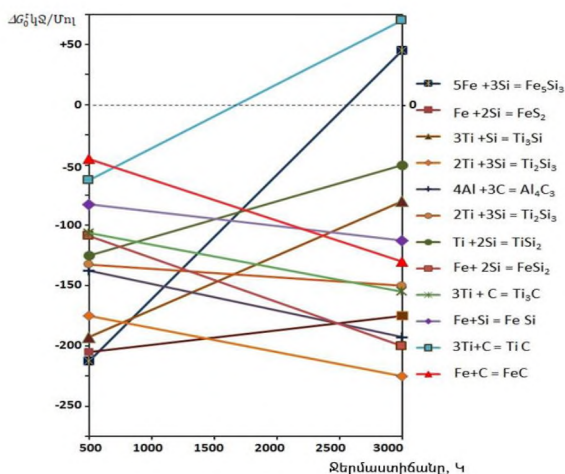
Երրորդ գլխում կատարվել է երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազերի բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի եղանակով ստացման գործընթացի թերմոդինամիկական հիմնավորում և փորձարարական հետազոտություններ: Ցույց է տրվել, որ MAX-ֆազերի ստացման գործընթացում երկաթն ու տիտանը կարող են մասնակցել կարբիդացման ($\text{Fe}+\text{C} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$, $\text{Ti}+\text{C} \rightarrow \text{TiC}$) և սիլիցիդացման ($\text{Fe}+\text{Si} \rightarrow \text{FeSi}$, $\text{Ti}+\text{Si} \rightarrow \text{TiSi}_2$ և այլն) ռեակցիաներին՝ թերմոդինամիկորեն գրեթե միևնույն հավանականությամբ:

Ըստ Fe-Si վիճակի դիագրամի՝ երկաթի և սիլիցիումի օքսիդների ալյումինաթերմային վերականգնման արդյունքում տեսականորեն հնարավոր է FeSi, Fe_3Si , Fe_2Si_3 և FeSi_2 ֆազերի ստացումը, ուստի թերմոդինամիկական հաշվարկները կատարվել են այդ նյութերի ստացումով ընթացող հետևյալ ռեակցիաների համար.



Նկ. 1-ում բերված են նշված ռեակցիաների համար Գիբսի էներգիաների փոփոխության արժեքները՝ կախված ջերմաստիճանից: Ինչպես երևում է գրաֆիկներից, կարբիդների և սիլիցիդների առաջացման ռեակցիաների հնարավորություններն ինչպես երկաթով, այնպես էլ տիտանով գրեթե նույնն են: Ռեակցիաների (ΔG_T^0) արժեքները բացասական են և գտնվում են 50...25 կՋ/մոլ սահմաններում: Այս հանգամանքը վկայում է, որ տարբեր տարրերի (Fe, Ti, Si, C) համակցված ներկայությունը չի արգելակում MAX-ֆազի ձևավորմանը, այլ կարող է նպաստել դրա ստացման արդյունավետությանը՝ պայմանով, որ պահպանվեն ռեակցիայի համամասնությունները և ճշգրիտ վերահսկվեն սինթեզի ջերմաստիճաններն ու միջավայրը: Բացի դրանից, միաֆազ նյութի ստացումը թերմոդինամիկորեն ավելի հավանական է՝ համեմատած բազմաֆազ համակարգերի հետ: Դա բացատրվում է նրանով, որ ռեակցիային մասնակցող մի քանի նյութերից (FeSi , Fe_3C , FeSi_3 , TiC , TiSi_2 և այլն) անցումը մեկ կայուն կառուցվածքային միացության՝ MAX-ֆազի ձևով, ուղեկցվում է ամբողջ համակարգի էնտրոպիայի նվազեցմամբ: Այսինքն՝ համակարգը դառնում է ավելի կարգավորված, ինչը, սովորաբար, կարող էր համարվել թերմոդինամիկորեն ոչ նպաստավոր, սակայն, հաշվի առնելով, որ նշված ռեակցիաները խիստ ջերմանջատիչ են ($\Delta H < 0$), ամբողջական ռեակցիայի Գիբսի էներգիան ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) մնում է բացասական: Այստեղից հետևում է, որ վերոնշյալ գործոնների համատեղ ազդեցության արդյունքում

MAX-ֆազի սինթեզը թերմոդինամիկորեն բարենպաստ և կայուն գործընթաց է, որը կարող է իրականացվել համապատասխան պայմանների ապահովման դեպքում:



Նկ. 1. Նշված ռեակցիաների համար Գիբսի էներգիայի (ΔG_T^0)

կախվածությունը ջերմաստիճանից

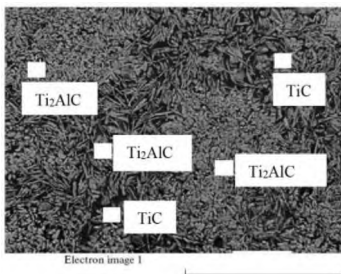
Չորրորդ գլխում կատարվել են քրոմ, տիտան, երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազերի բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի ալյումինաջերմային եղանակով ստացման գործընթացի փորձարարական հետազոտություններ: Ցույց է տրվել, որ Cr-Ti-Al-C համակարգի քրոմի և տիտանի տարբեր հարաբերությամբ բովախառնուրդի ԲԻՍ արդյունքում ձևավորվել է $(\text{Cr}_x\text{Ti}_{1-x})_3\text{AlC}_2$ տեսքի բարդ MAX-ֆազ, որը դրսևորել է լավագույն մեխանիկական ու քիմիական հատկություններ: Միկրոկառուցվածքը բաղկացած է երկու ֆազերից, որոնցից մեկն ունի վառ արտահայտված շերտավոր կառուցվածք, այսինքն պատկանում է MAX-ֆազերի ընտանիքին, իսկ մյուսը՝ բնութագրական է տիպիկ կլորավուն հատկներով կարբիդային ֆազերին: Բացահայտվել է, որ ռեակցիայի ընթացքում վերջնական նյութի ձևավորումը տեղի է ունենում փուլային՝ առաջին փուլում. ձևավորվում են տիտանի ալյումինիդ, այնուհետև տիտանի և քրոմի կարբիդներ, վայրկյաններ անց՝ $(\text{Cr}_x\text{Ti}_{1-x})_3\text{AlC}_2$ տիպի MAX-ֆազ:

Բացահայտվել է, որ ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի և ածխածնի դիսպերս փոշիների բովախառնուրդից սինթեզված MAX-ֆազը ստացվում է Ti_2AlC և Ti_3AlC_2 ֆազի գերակշռությամբ՝ 95%, իսկ 5%-ը՝ TiC կարբիդն է: Բովախառնուրդի նախնական մեխանակոտվածման դեպքում, ԲԻՍ գործընթացի ընթացքում հիմնական MAX-ֆազի ելքը բարձրանում է, ընդ որում,

ստացվում է Ti_3AlC_2 քիմիական բանաձևին համապատասխան գրեթե միաֆազ MAX-ֆազ:

Ti-Al-C համակարգում ֆազագոյացման գործընթացն ուսումնասիրելու նպատակով կատարվել են փորձեր, որի ընթացքում բովախառնուրդը հելիումի միջավայրում 150 աստ/րոպե տաքացման արագությամբ տաքացվել է մինչև $755^{\circ}C$ և ենթարկվել հետագա սառեցման: Ti-Al-C համասեռ բովախառնուրդի մոլային հարաբերակցությունը եղել է 1:1:1: Պարզվել է, որ $500^{\circ}C$ -ից բարձր ջերմաստիճանում ալյումինը սկսում է լուծվել տիտանի մեջ՝ առաջացնելով պինդ լուծույթ: Արդյունքում առաջանում է $TiAl_3$ -ով հարստացված միջմետաղական միացություններ, ինչպես նաև մնում են ազատ Ti և Al: Նմուշի տաքացման ցածր արագությունը նպաստում է բաղադրիչների հսկայական տեղամասերում միջմետաղական միացությունների դանդաղ առաջացմանը, որը հանդես է գալիս որպես դիֆուզիոն արգելք: Փորձի ընթացքում ջերմաստիճանի կորի վրա ստացվում է էկզոթերմիկ գագաթնակետ, որը կապված է Al-ի և Ti-ի միջև ընթացող ռեակցիայի հետ: Այն սկսվում է ալյումինի հալմամբ, ինչը հանգեցնում է $TiAl_3$ ֆազի առաջացմանը, և ավարտվում է $650^{\circ}C$ -ից ցածր ջերմաստիճանում՝ չլուծված ալյումինի սառեցմամբ և բյուրեղացմամբ: Տիտանը՝ որպես ավելի բարձր հալման ջերմաստիճան ունեցող տարր, ժամանակի պատճառով ամբողջությամբ չի լուծում ալյումինին: Արդյունքում առաջանում են միայն ալյումինով հարստացված $TiAl_3$ միջմետաղական միացություններ: Մինչև 200 մկմ հաստությամբ նմուշի մակերևութային շերտում տիտանի հետ ածխածնի ռեակցիայի արգասիքներ չեն հայտնաբերվել, սակայն, սինթեզված նյութի ծավալում ֆազային կազմը վերլուծելիս հայտնաբերվել են TiC, $TiAl_3$ և Ti_2AlC ֆազերը: Ti_2AlC ֆազն առաջանում է Ti-ով, C-ով և Al-ով հարստացած միջմետաղական միացությունների փոխազդեցությունից: Այն փաստը, որ ռենտգենաֆազային անալիզը ցույց է տալիս նմուշի մակերևութին եռակի ֆազի շատ փոքր առաջացում, բացատրվում է ջերմային կորուստներով, որոնք հանգեցնում են մակերևութային շերտում այրման արգասիքի արագ սառեցմանը, և հեղուկ ֆազի կարճատև տևողությամբ, ինչը ազդում է մինչև 200մկմ հաստությամբ մակերևութային շերտում ֆազի առաջացման գործընթացի վրա:

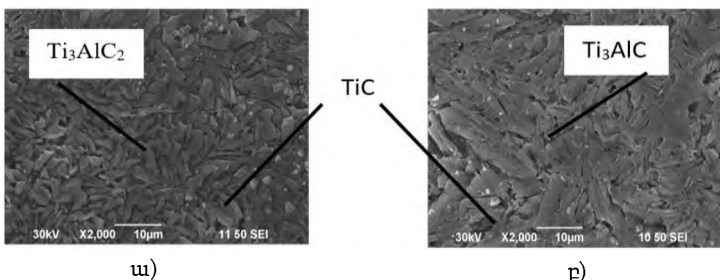
Սինթեզված նմուշի անցումային գոտու տիպիկ միկրոկառուցվածքը ներկայացված է նկ. 2-ում: Շերտավոր համակարգում $(Ti+Al)/(Ti+C)$ կատարված փորձերի արդյունքում $TiAl_3$ և TiC ֆազերից կազմված սկզբնական շերտերի $(Ti+Al)$ և $(Ti+C)$ միջև հաստատվել է $TiAl_3$ և TiC ֆազերից կազմված Ti_2AlC MAX-ֆազի վրա հիմնված անցումային շերտի ձևավորումը, որն ամրացնում է ստացված կառուցվածքը: Նյութի կառուցվածքը գնդաձև TiC կարբիդային ֆազի հատիկներ են ալյումինով հարստացված միջմետաղական մայրակում: Անցումային շերտը պարունակում է Ti_2AlC ֆազի երկարացված ասեղաձև հատիկներ:



Նկ. 2. Եռաֆազ Ti_2AlC տիրույթում անցումային շերտի միկրոկառուցվածքը

Ստացված նմուշների մեխանիկական փորձարկումները ցույց են տալիս, որ շերտավորված նմուշների քայքայումը տեղի է ունենում ոչ թե ԲԻՍ գործընթացում ձևավորված անցումային գոտում, այլ ավելի փխրուն շերտի ծավալում: $\text{Ti}+\text{Al}+\text{C}$ -ն ԲԻՍ մեթոդով սինթեզելիս ֆազերի հարաբերակցության պատկերը կտրուկ փոխվում է: Այս դեպքում ստացված MAX-ֆազում գերակշռում են Ti_3AlC_2 (95%), Ti_2AlC (3%) և TiC (2%): Ստացված արդյունքը ցույց է տալիս, որ Ti_2AlC կամ Ti_3SiC_2 -ի վրա հիմնված MAX-ֆազ պարունակող ձևավորված անցումային շերտն ունի ավելի բարձր ամրության բնութագրեր և բարձր կաշունություն $\text{Ti}-\text{Al}$ շերտին:

Նկ. 3-ում ցույց է տրված ԲԻՍ մեթոդով ստացված MAX-ֆազերի մակերևույթի միկրոկառուցվածքը: Ինչպես երևում է նկ. 3ա-ից և բ-ից, միկրոկառուցվածքն ավելի միատարր է և բաղկացած է հիմնականում 95% Ti_3AlC_2 -ից:

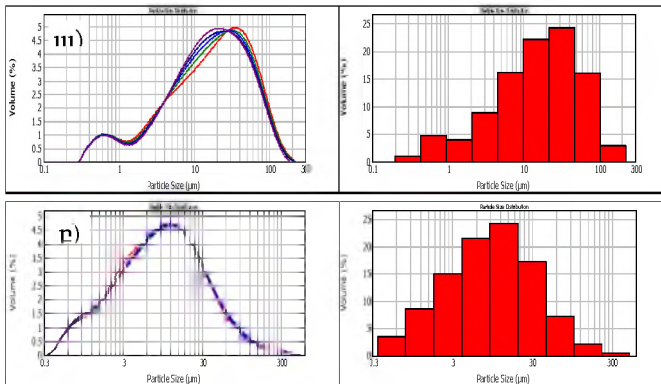


Նկ. 3. ԲԻՍ մեթոդով ստացված MAX-ֆազերի մակերևույթի միկրոկառուցվածքը

Բացահայտվել է, որ բովախառնուրդի մեխանաքիմիական ակտիվացման ժամանակ փոշեհատիկների դեֆորմացիայի պարամետրերը և առաջին հերթին դեֆորմացիայի արագությունը մեծ ազդեցություն ունեն նյութի կառուցվածքի ձևավորման վրա, ինչպիսիք են չափի փոփոխությունը, ձևը և հատիկների փոխադարձ դասավորությունը: Ցույց է տրվել, որ փոխելով այս պարամետրերը լայն տիրույթում, հնարավոր է փոխել ստացված փոշու որակը և դրա ձևաչափերը: Արդյունքում ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի և ածխածնի փոշիներից պատրաստված բովախառնուրդի մեխանաակտիվացմամբ և ԲԻՍ

եղանակով մշակմամբ ստացվել է ֆերոմագնիսական բնույթագրերով օժտված բաղադրանյութ, որը պարունակում է 93% $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$ տեսքի MAX-ֆազ և 5% խառնուրդներ, որոնք հարուստ են երկաթի սիլիցիդի (Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi) բյուրեղներով, ինչպես նաև 1% TiSi_3 և 1% TiC -ով:

$(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ -ը ներկայացնում է վեցանկյուն կառուցվածքով նյութ, որում Ti և Fe ատոմները տեղակայված են մետաղակարբիդային շերտում՝ կառուցվածքի մեջ ունենալով հավասարազոր դիրքեր: Վերջինիս մանրացման ճանապարհով ստացվում է MAX-ֆազային մանրափոշի, որը կարելի է օգտագործել փոշեմետալուրգիայում որպես երկաթով հարուստ սիլիցիդների պարունակությամբ մագնիսական MAX-ֆազեր: Մինչև ԲԻՍ եղանակով հիմնական մշակումը՝ բովախառնուրդը ենթարկվել է նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման: Նկ. 4-ի ա-ում ցույց են տրված չակտիվացված բովախառնուրդի հատիկաչափական կազմը, իսկ բ-ում՝ հատիկաչափական կազմը M30 տիպի լաբորատոր թրթռաղացում 30 րոպե տևողությամբ մշակումից հետո: Դիագրամների համեմատության արդյունքում պարզվել է, որ մեխանաակտիվացման գործընթացի հաճախականության և պտտման ժամանակի աճման ընթացքում մասնիկների միջին չափը նվազում է, իսկ մասնիկների համամասնության առավելագույն արժեքը տեղափոխվում է դեպի ներքև:



Նկ. 4. Բովախառնուրդի հատիկաչափական կազմը՝ չակտիվացված (ա) և ակտիվացումից հետո՝ (բ)

Մասնիկների միջին չափի փոքրացումը մեծացնում է շփման մակերեսը, նվազեցնելով ջերմաստիճանային գրադիենտը, ինչը դրական է ազդում բարձրորակ արտադրանք ստանալու գործընթացի վրա: Հաճախականության և պտտման ժամանակի անվերահսկելի աճը կարող է հանգեցնել «հագեցվածության շեմի», այսինքն՝ մինչև որոշակի արժեքների, մեխանաքիմիան կարող

է բացասաբար ազդել ԲԻՍ գործընթացի վրա: Այսպիսի օրինաչափությունների բացահայտման նպատակով կատարվել են հատիկների ձևից և չափերից կախված ուսումնասիրություններ, որոնք հաստատվել են հատիկաչափական վերլուծության արդյունքներով:

Աղ. 1-ում և 2-ում ներկայացված են ԲԻՍ-ի գործընթացների արդյունքում առաջացած արգասիքների քանակական համեմատության արդյունքները՝ բովախառնուրդի ակտիվացումից առաջ (աղ. 1) և հետո (աղ. 2): Ինչպես ցույց են տալիս աղյուսակային տվյալները, մինչև բովախառնուրդի մեխանիկական ակտիվացումը՝ ստացված MAX-ֆազը բավականին բազմաբաղադրիչ է (Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC , TiC , $TiAl_3$, C և $TiAl$), և հիմնական ֆազի միջինացված ելքը կազմում է 91,6%, իսկ մնացածը $TiC + TiAl_3 + C$ ֆազերն են:

Աղյուսակ 1

Մեխանաքիմիական ակտիվացման չենթարկված ԲԻՍ արգասիքների ֆազային կազմը

h/h	Ti_2AlC , %	Ti_3AlC_2 , %	TiC , %	$TiAl_3$, %	C , %	$TiAl$, %
1	36,5	38,8	5,1	–	–	19,6
2	24,5	56,0	5,0	–	>0	14,5
3	23, 7	59,9	–	11,3	5,1	–

Բովախառնուրդի նախնական ակտիվացումից հետո (աղ. 2.) փոխազդեցության արգասիքները հիմնականում երկուսն են, որոնցից մեկը $TiC-AlC$ -ի պինդ լուծույթն է՝ մոտավորապես 2,77% քանակությամբ, իսկ հիմնականը Ti_3AlC_2 ֆազն է, որի բաղադրությունը կազմում է 91,1%:

Աղյուսակ 2

Մեխանաքիմիական ակտիվացման ենթարկված ԲԻՍ արգասիքների ֆազային կազմը

h/h	Ti_2AlC , %	Ti_3AlC_2 , %	TiC , %	$TiAl_3$, %	C , %	$TiAl$, %
1	–	90,3	3,1	–	–	6,6
2	–	91,8	3,0	–	>0	5,2
3	–	96,5	2,2	–	>0	1,3

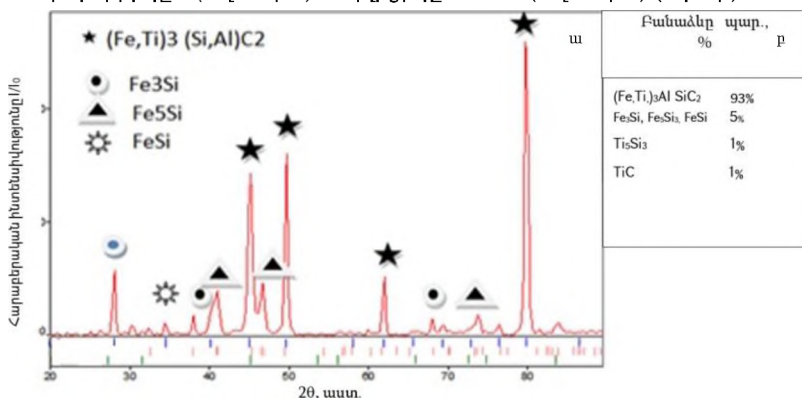
Ծանոթություն՝ փորձ 1-ում բովախառնուրդի ակտիվացումը տևել է 10 րոպե, 2-ում՝ 20 րոպե, իսկ 3-ում՝ 30 րոպե:

Բերված տվյալների համեմատությունը ցույց է տալիս, որ բովախառնուրդի նախնական ակտիվացումով ստացված հիմնական MAX-ֆազի միջին ելքն ավելանում է 51,6-ից մինչև 91,1%, արդյունքում ստացվում է գրեթե միաֆազ՝ Ti_3AlC_2 տեսքի միացություն:

Համալիր հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է, որ ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի և ածխածնի նախապես մեխանաակտիվացված բովախառնուրդի ԲԻՍ մեթոդով մշակումով հնարավոր է ստանալ մանրափոշու տեսքով համակցված բաղադրանյութ, որի մայր ֆազը՝ $(Fe,Ti)_3(AlSi)C_2$ բաղադրությամբ MAX-ֆազն է, որը կազմում է 93%: Այն պարունակում է նաև 5 զանգ.% երկաթի միացություններ՝ Fe_5Si_3 , Fe_3Si և $FeSi$,

որոնք արգասիքին հաղորդում են ֆերոմագնիսական հատկություններ: Բացի դրանից, վերջնանյութում պարունակվում են նշված ֆազում չլուծվող՝ 2%-ի չափով Ti_3Si_2 և TiC : Այստեղից հետևում է, որ ելանյութերի նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացումը դրական է ազդում է ԲԻՍ գործընթացի վարքի վրա, ինչը ելանյութերի հատիկների մասնիկների մակերևույթի մեծացման և ամորֆ մասնիկների չափի նվազման հետևանք է: Շնորհիվ նշվածի՝ տիտանի կարբոալյումինիդների սինթեզը տեղի է ունենում ցածր ջերմաստիճանների և ակտիվացման էներգիայի արժեքների դեպքում, որոնց արդյունքում ձևավորվում են բազմաթիվ բյուրեղացման կենտրոններ, որոնք միաժամանակ աճում են համեմատաբար ցածր ջերմաստիճաններում՝ մինչև հեղուկ ֆազի հայտնվելը:

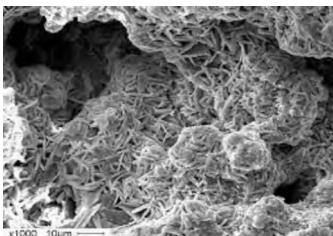
Կատարվել է ստացված MAX-ֆազի ռենտգենաֆազային վերլուծություն (ա) և ֆազային կազմի հետազոտություն (բ), որոնք բերված են նկ. 5-ում: Սինթեզի արդյունքում ստացված արգասիքներն են՝ հիմնական ֆազը - $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ (93 զանգ. %), երկաթի սիլիցիդները - (5 զանգ. %), ինչպես նաև տիտանի կարբիդը - (1 զանգ. %) և սիլիցիդը - Ti_3Si_2 (1 զանգ. %) (նկ. 5բ):



Նկ. 5. ԲԻՍ գործընթացով ստացված արգասիքի ռենտգենագիրը՝ $FeSi$ 30% ավելցուկի դեպքում (ա) և ֆազային կազմը (բ)

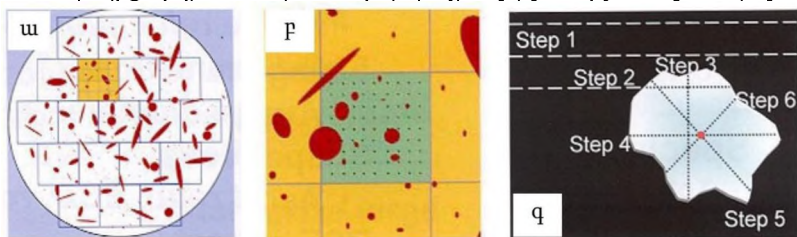
Նկ. 6-ում ցույց է տրված $Ti-Fe-Si-Al-C$ համակարգի ԲԻՍ մեթոդով ստացված հիմնական նյութի մակերևույթի միկրոկառուցվածքը:

Ինչպես ցույց են տալիս հետազոտությունները, մետաղական ֆազը բաղկացած է հիմնական ֆազերից և երկաթի սիլիցիդներից: Հոմոգենացման գործընթացում երկաթի սուլֆիդների ֆազային փոխազդեցությունն ուղեկցվում է $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ տիպի պինդ լուծույթների ձևավորմամբ՝ անկանոն կառուցվածքով: Երկաթի սիլիցիդներով հարստացված ֆազն առավելապես տեղակայված է մետաղի հատիկի սահմանի երկայնքով: Այդ ֆազերի հատիկները 25...50 մկմ չափսի են և հստակ պահպանում են իրենց սահմանները:



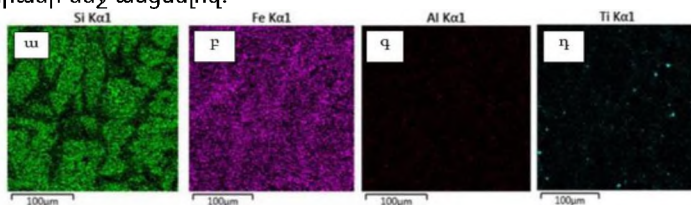
Նկ. 6. ՔԻՍ եղանակով ստացված՝ Ti-Fe-Si-Al-C համակարգին պատկանող բաղադրանյութի մակերևույթի միկրոկառուցվածքը՝ (x1000)

Ստացված արգասիքների առաջացման ընթացքը և ներդրված սիլիցիդների բաշխումն ըստ չափերի և ձևի ցույց է տրված նկ. 7-ում, որը կատարվել է ժամանակակից միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծության եղանակով:



Նկ. 7. Խառնուրդների ավտոմատ վերլուծությունը. ա - պատկերի բաժանումը դաշտերի, բ - էլեկտրոնների փնջի տեղափոխումը դաշտից դեպի գանգված, գ - մասնիկների չափերի որոշումը

Հետազոտվել է առանձին տարրերի բաշխումը MAX-ֆազի մեջ՝ ըստ սպեկտրների: Ցույց է տրված, որ համաձուլվածքում առանձին տարրերի բաշխումը նույնպես անհավասար է: Հիմնականում համաձուլվածքում գերակշռում են սիլիցիումը (նկ. 8ա), երկաթը (նկ. 8բ) և տիտանը (նկ. 8դ): Այլումինի քանակությունը փոքր է (նկ. 8գ), որը, ըստ երևույթին, պայմանավորված է նրա՝ խարամի մեջ անցնելով:



Նկ. 8. ՔԻՍ մեթոդով ստացված փորձանմուշում տարրերի բաշխվածությունը.

ա - Si, բ - Fe, գ - Al, դ - Ti

Միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծությամբ հիմնավորվել է, որ հիմնական ֆազերն են երկաթի, տիտանի և սիլիցիումի հիմքով միացությունները: Ցույց է տրված, որ երկաթով և սիլիցիումով լեգիրումը բազմակողմանի ազդեցություն ունի ֆազային հավասարակշռության վրա, ինչը հանգեցնում է ստաց-

ված համաձուլվածքների հատկությունների փոփոխությունների: Ուսումնասիրված նմուշների ռենտգենաֆազային վերլուծությունը ցույց է տվել, որ լեգիրող տարրերը՝ երկաթը և սիլիցիումը, բազմակողմանի ազդեցություն են ունենում Ti-Al-C համակարգի համաձուլվածքների ֆազային կայունության և կառուցվածքի վրա:

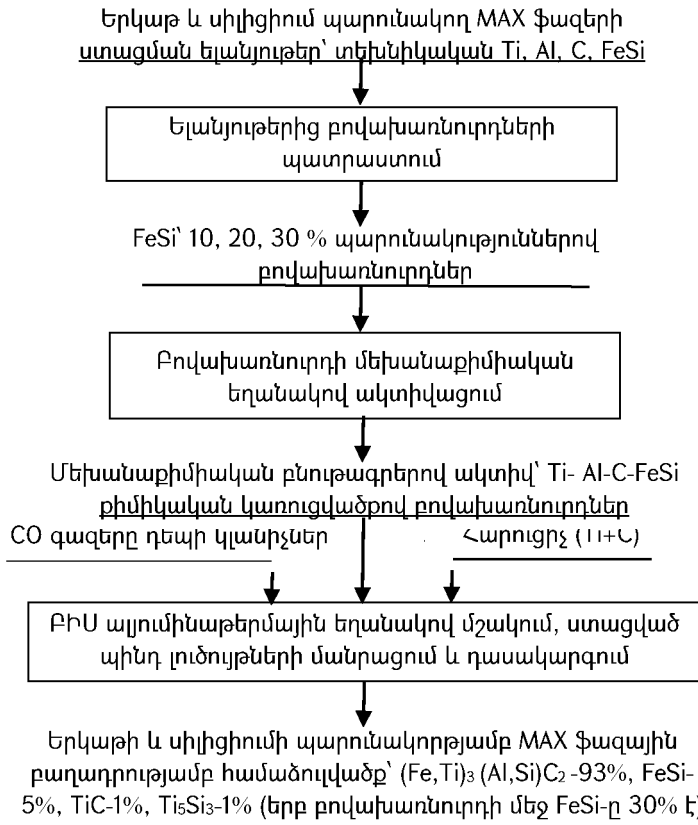
Ստացված նմուշների միկրոկառուցվածքային վերլուծությամբ բացահայտվել են միկրոկառուցվածքի ձևաբանության, ֆազային բաշխման օրինաչափությունների և հատիկների չափի հիմնական տարբերությունները՝ կախված լեգիրող տարրի տեսակից: Հիմնական շարքում կառուցվածքը դրսևորել է Ti_3AlC_2 -ին բնորոշ տիպիկ շերտավոր դասավորություն՝ հստակ սահմանված թիթեղանման հատիկներով, որոնք կողմնորոշված են որոշակի ուղղությամբ: MAX-ֆազային շերտերի միջև սահմանները կտրուկ ուրվագծված են, ֆազերը հավասարաչափ բաշխված, իսկ հատիկի միջին չափը կազմել է մոտավորապես 8,3 մկմ: Կոտրվածքազննության պատկերները ցույց են տվել MAX-ֆազային շերտերի երկայնքով առաջացող կոտրվածքներ, ինչը վկայում է բնորոշ շերտավոր փխրունության մասին: Երկաթի ավելացումը կտրուկ փոխել է միկրոկառուցվածքի դասավորությունը. այն դարձել է ավելի քառասյին՝ արտահայտված ֆազային մանրացվածությամբ: Մայրակի մեջ դիտվել են միջմետաղական ֆազերի և մանրահատիկ կարբիդների կլորացված ներառումներ, իսկ ֆազերի սահմանները հստակ չեն: Հատիկներն ավելի փոքր են և կազմում են մոտավորապես 5,7 մկմ: Որոշ հատվածներում երևում են երկրորդային ֆազի աճի հստակ նշաններ՝ խաթարելով հիմնական կառուցվածքի միատարրությունը: Սիլիցիումով լեգիրման շարքում կառուցվածքը պահպանել է իր շերտավոր բնույթը, սակայն Ti_3Si_2 միջմետաղական ֆազի սահմանները հստակ տեսանելի են հատիկների միջև, հիմնականում տեղայնացված շերտերի միացման կետերում: Այս դեպքում հատիկի միջին չափը կազմել է 6,9 մկմ: Այս առանձնահատկությունները ցույց են տալիս սիլիցիումի ազդեցությունը հատիկների աճի դանդաղեցման վրա՝ հատիկների սահմանի կայունացման միջոցով: Բացահայտվել են ֆազերի և տարրերի կառուցվածքի ձևի ձևավորման հիմնական օրինաչափությունները՝ MAX-ֆազային համաձուլվածքների՝ երկաթով և սիլիցիումով լեգիրման ընթացքում:

Տարբեր տարրերով լեգիրմամբ ստացված MAX-ֆազային համաձուլվածքների մեխանիկական հատկությունների ուսումնասիրման արդյունքները ցույց են տալիս ֆազային կազմի, միկրոկառուցվածքի ձևի, միկրոկարծրության, խտության և առաձգականության մոդուլի արժեքների միջև ուղիղ կապ:

Ուսումնասիրվել են MAX-ֆազային համաձուլվածքների գործառական բնույթագրերը՝ կախված տաքացման ջերմաստիճանից: Ցույց է տրված նաև, որ ջերմային ընդարձակման գործակիցը, էլեկտրահաղորդականությունը և

օքսիդացման կայունությունը սերտորեն կախված են նյութերի միկրոկառուցվածքային դասավորությունից, էլեկտրոնային կառուցվածքի և ֆազային կազմից:

Հինգերորդ գլխում կատարված համալիր հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է երկաթով և սիլիցիումով լեգիրված MAX-ֆազի կառուցվածքով համաձուլվածքների ստացման տեխնոլոգիա, որի ուրվագիծը ցույց է տրված նկ. 9-ում:



Նկ. 9. Երկաթով և սիլիցիումով լեգիրված MAX-ֆազային կառուցվածքով համաձուլվածքների ստացման տեխնոլոգիայի ուրվագիծը

Ստացված համաձուլվածքները ներկայացնում են բազմաֆազ նյութեր և պարունակում են մինչև 93 % $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ MAX-ֆազ, ինչպես նաև

բյուրեղային տեսքով երկաթի սիլիցիդ (Fe_3Si_3 , Fe_3Si , FeSi) և փոքր քանակությամբ Ti_3Si_3 , TiC ֆազեր:

Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի այլումինաթերմային եղանակով երկաթ և սիլիցիում պարունակող ($\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ բաղադրությամբ MAX-ֆազի ստացումը հիմնավորված է տեսական և փորձարարական մեթոդներով. այն ստեսապես շահավետ է և հնարավորություն է տալիս՝ ստանալու բարձր մաքրությամբ, մագնիսական և մեխանիկական հատկություններով օժտված կայուն փոշեզանգված: Ցույց է տրված, որ տարեկան տաս տոննա MAX-ֆազի արտադրության դեպքում մեկ տոննայի ինքնարժեքը կազմում է շուրջ 21052 հազ. դրամ և 10 տոննա արտադրության դեպքում շահույթը կազմում է 366980 հազ. դրամ, որը ապահովում է ավելի քան 174 % շահութաբերություն:

ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐ ԵՎ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Հայրենական և արտասահմանյան գրականության վերլուծության արդյունքում ցույց է տրվել, որ երկաթով և սիլիցիումով լեգիրված MAX-ֆազային կառուցվածքներ ստանալը բավականին բարդ և բազմափուլային գործընթաց է, որի հաջող ընթացքը մեծապես պայմանավորված է միջփուլային փոխակերպումներով, մասնավորապես՝ Fe-Si համակարգում կայուն և ֆերոմագնիսական հատկություններով օժտված սիլիցիդների գոյությամբ:

2. Թերմոդինամիկական հաշվարկների վերլուծությամբ և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքների համադրմամբ՝ հաստատվել է, որ բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի եղանակով կիրառելով այլումինաթերմային մեթոդը՝ հնարավոր է ստանալ ($\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ բաղադրությամբ MAX-ֆազեր, նախապես օգտագործելով համապատասխան չափաբաժիններով փոշեխառնուրդներ:

3. Բացահատվել է, որ մեխանաակտիվացման գործընթացը էական ազդեցություն է թողնում բարձրջերմաստիճանային ինքնատարաձվող սինթեզի արդյունավետության վրա: Այն ապահովում է մանրամետաղափոշիների ստացում, մակերևութային շերտի ակտիվացում և բյուրեղացման բազմակենտրոն ընթացք՝ ցածրջերմաստիճանային պայմաններում:

4. Բացահայտվել է, որ ստացված ($\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ ֆազը ներկայացնում է վեցանկյուն կառուցվածքով նյութ, որում Ti և Fe ատոմները տեղակայված են մետաղակարբիդային շերտում՝ կառուցվածքի մեջ ունենալով հավասարազոր դիրքեր: Վերջինիս մանրացման ճանապարհով ստացվում է MAX-ֆազային մանրափոշեզանգված, որը կարելի է օգտագործել փոշեմետալուրգիայում որպես երկաթով հարուստ սիլիցիդների պարունակությամբ մագնիսական MAX-ֆազեր:

5. Բացահայտվել է, որ սիլիցիումով լեգիրումը հանգեցնում է Ti-Al-C համաձուլվածքների մեխանիկական, կառուցվածքային և գործառական հատ-

կությունների բարելավմանը՝ համեմատած երկաթի հետ: Ցույց է տրված, որ Si-ն հանդիսանում է արդյունավետ լեգիրող տարր՝ կայուն MAX-ֆազային կոմպոզիտներ մշակելու համար, որոնք բնութագրվում են բարձր ջերմակայունությամբ և ուղղորդված ամրությամբ: Երկաթը, չնայած կարծրության տեղայնացված աճ ապահովելու ունակությանը, առաջացնում է միկրոկառուցվածքային խաթարում և նվազեցնում է առաձգականությունը, դրանով իսկ սահմանափակելով դրա պիտանիությունը նման կիրառությունների դեպքում:

6. Ֆերոսիլիցիումի առկայությունը նպաստում է ստացված կոմպոզիտային նյութում ֆերոմագնիսական հատկությունների դրսևորմանը, ինչը բացում է հեռանկարներ՝ ստացված փոշին օգտագործելու ֆերոմագնիսական մաշակայուն նյութերի և կոնստրուկցիոն նշանակությամբ կոմպոզիտների ստացման ոլորտում:

7. Համալիր հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է երկաթով և սիլիցիումով լեգիրված MAX-ֆազի կառուցվածքով համաձուլվածքների ստացման տեխնոլոգիա: Ստացված համաձուլվածքները ներկայացնում են բազմաֆազ նյութեր և պարունակում են մինչև 90 % $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ MAX-ֆազ, ինչպես նաև բյուրեղային տեսքով երկաթի սիլիցիդ (Fe_3Si_3 , Fe_3Si , FeSi) և փոքր քանակությամբ TiSi_3 , TiC , Al_4C_3 ֆազեր:

8. Տնտեսագիտական հաշվարկներով ապացուցվել է, որ տարեկան տաս տոննա MAX-ֆազի արտադրության դեպքում մեկ տոննայի ինքնարժեքը կազմում է շուրջ 21052 հազ. դրամ և 10 տոննա արտադրության դեպքում շահույթը կազմում է 366980 հազ. դրամ, որը ապահովում է ավելի քան 174 % շահութաբերություն:

Ատենախոսության հիմնական դրույթները հրատարակված են հետևյալ գիտական աշխատանքներում

1. **Мартиросян В.А., Сасунцян М.Э., Саакян Н.Г.** Получение порошков MAX-фаз, легированных железом и кремнием, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2018.- Т. LXXI, № 3.- С. 248-258.

2. **Martirosyan V.A., Sasuntsyan M.E., Saakyan N.G., Frangulyan A.A.** Production of iron- and silicon-doped MAX phases by self-propagating hightemperature synthesis // CIS Iron and Steel Review.- 2019.- Vol. 18.- P. 58-63.

3. **Мартиросян В.А., Сасунцян М.Э., Саакян Н.Г.** Получение порошков MAX-фаз на базе Ti_3AlC_2 , легированных железом и кремнием // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование.- 2019.- № 1.- С. 26-31.

4. **Мартиросян В.А., Саакян Н.Г., Сасунцян М.Э., Чолахян Э.А.** Получение хромсодержащих MAX-фаз методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Вестник НПУА. Химические и природоохранные технологии.- 2019.- № 2.- С. 27-37.

5. **Саакян Н.Г.** Получение MAX-фазы методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование.- 2020.- № 1.- С. 20-28.

6. **Сасунцян М.Э., Саакян Н.Г., Оганесян А.С., Чолахян Э.А.** Получение композита на основе карбосилицида титана и исследование его электропроводящих свойств // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование.- 2021.- № 1.- С. 21-28.

7. Синтез и исследование процесса фазообразования MAX-фаз типа Ti_3AlC_2 методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / **В.А. Мартиросян, Н.Г. Саакян, М.Э. Сасунцян** и др. // Вестник НПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование.- 2021.- № 2.- С. 23-33.

8. **Սահակյան Ն.Գ.** Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի եղանակով երկաթ և սիլիցիում պարունակող MAX-ֆազի ստացումը և հատկությունների հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա.- 2022.- Հ. LXXV, N1.- էջ 27-36. DOI: 10.53297/0002306X-2022.v75.1-27

9. **Sasuntsyan M.E., Aghbalyan S.G., Sahakyan N.G., Hayrapetyan S.G.** Effect of Iron and Silicon on the Formation of the Structure and Properties of Alloyed MAX-Phase Alloys: An Experimental Study // PremierJournal of Science.- 2025.- Vol. 14.- 100172. <https://doi.org/10.70389/PJS.100172>

10. **Աղբալյան Ս.Գ., Սահակյան Ն.Գ. Սասունցյան Մ.Է.** MAX-ֆազերի ստացման եղանակների վերլուծությունը և օպտիմալ տեխնոլոգիայի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա.- 2025.- Հ. LXXVIII, N1.- էջ 5-18.

11. **Արտոնագիր № 3256 ՀՀ.** Տիտանի, ալյումինի և ածխածնի փոշիներ պարունակող փոշենյութի ստացման եղանակ / Վ.Հ. Մարտիրոսյան, Մ.Է. Սասունցյան, Ն.Գ. Սահակյան, Է.Գ. Զաքարյան.- Հրապար. 01.02.2019.

12. **Արտոնագիր № 3306 ՀՀ.** Ֆերոսիլիցիումի հալման բովախառնուրդ / Ն.Գ. Սահակյան, Մ.Է. Սասունցյան.- Հրապար. 17.06.2019.

13. **Արտոնագիր № 3319 ՀՀ.** Ֆերոմոլիբդենի ստացման եղանակ / Վ.Հ. Մարտիրոսյան, Մ.Է. Սասունցյան, Ն.Գ. Սահակյան, Է.Գ. Զաքարյան.- Հրապար. 01.08.2019.

14. **Արտոնագիր № 3320 ՀՀ.** Բովախառնուրդ ֆերոմոլիբդենի ստացման համար / Վ.Հ. Մարտիրոսյան, Մ.Է. Սասունցյան, Ն.Գ. Սահակյան, Է.Գ. Զաքարյան, Է.Ա. Չոլախյան.- Հրապար. 01.08.2019.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ С МАХ-ФАЗОВОЙ СТРУКТУРОЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ И КРЕМНИЕМ

РЕЗЮМЕ

Стремительное развитие современных технологий требует создания новых материалов с функциональными свойствами, таких как МАХ-фазы, представляющие собой новый класс композиционных материалов, сочетающих в себе положительные свойства металлов и керамики. Эти материалы характеризуются общей формулой $M_{n+1}AX_n$ ($n=1, 2, 3 \dots$), где М - переходный металл (например, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni), А - р-элемент (Al, Si, Ga, Ge и др.), а Х - углерод или азот. Благодаря многослойной структуре, МАХ-фазы обладают высокой прочностью, пластичностью, теплопроводностью, химической и термической стабильностью, высокой температурой плавления, низким коэффициентом термического расширения и сохраняют стабильность при температурах выше 1000°С, а также устойчивы к высокотемпературному окислению, легко поддаются механической обработке и т.д. Указанные свойства обусловлены структурными особенностями этих материалов: наличием в их составе карбидов, силицидов, интерметаллидов, образующих устойчивые слоистые структуры.

Целью диссертационной работы является разработка технологии получения сплавов с МАХ-фазной структурой, легированных железом и кремнием, методом высокотемпературного самораспространяющегося синтеза и исследование процессов формирования структуры и свойств МАХ-фазы $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ на основе сплава Ti_3AlC_2 , синтезированного из эквимольной смеси металлических порошков Ti, FeSi и Al и углеродного порошка. Подобная модификация способствует не только улучшению термомеханических свойств материала, но и придаёт ему ферромагнитные свойства.

Термодинамические расчёты показали, что алюминотермическим методом высокотемпературного самораспространяющегося синтеза возможно получение МАХ-фаз состава $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$, при предварительном внесении соответствующего количества порошковых добавок.

Выявлено, что процесс механоактивации оказывает существенное влияние на эффективность высокотемпературного самораспространяющегося синтеза. Он обеспечивает получение дисперсных металлических порошков, активацию поверхностного слоя и многоцентровую кристаллизацию в условиях низких температур.

Установлено, что полученная фаза $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ представляет собой материал с гексагональной структурой, где атомы Ti и Fe размещаются в карбидных слоях металла, занимая эквивалентные позиции в структуре. Путём измельчения этой фазы получен дисперсный МАХ-фазный порошок, пригодный для использования в порошковой металлургии как магнитный материал, обогащённый железосодержащими силицидами.

Также выявлено, что легирование кремнием улучшает структурные, механические и функциональные свойства сплавов Ti–Al–C по сравнению с легированием железом. Показано, что Si является эффективным легирующим элементом для разработки стабильных МАХ-фазных композитов с высокой термостойкостью и направленной прочностью. Хотя железо локально повышает твёрдость, оно вызывает микроструктурные дислокации и снижает упругость, что ограничивает его применение в таких материалах.

Морфологические исследования показали формирование слоистой, графитоподобной и пористой структуры материала, позволяющей применять материал в различных технологических процессах. Добавление железа придаёт материалу ферромагнитные свойства, а кремний повышает термостойкость и структурную стабильность при термомеханических циклах, открывая перспективы применения полученного порошка в производстве ферромагнитных износостойких и конструкционных композитных материалов.

В результате комплексных исследований разработана технология получения сплавов с МАХ-фазной структурой, легированных железом и кремнием. Полученные сплавы представляют собой многофазные материалы, содержащие до 93 % МАХ-фазы $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$, а также кристаллические фазы силицидов железа (Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi) и в меньших количествах - Ti_5Si_3 , TiC , Al_4C_3 . Полученные порошки могут использоваться в машиностроении и электронике как компоненты с высокой прочностью, износостойкостью, коррозионной устойчивостью и магнитными свойствами.

По теме диссертации опубликовано 10 научных статей и получено 4 авторских свидетельства Республики Армения, из которых 2 научные статьи написаны без соавторов.

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING MAX- PHASE-BASED ALLOYS DOPED WITH IRON AND SILICON

SUMMARY

The rapid development of modern technologies necessitates the creation of new materials with functional properties, such as MAX phases — a new class of composite materials that combine the advantageous properties of metals and ceramics. These materials are characterized by the general formula $M_{n+1}AX_n$ ($n = 1, 2, 3 \dots$), where M is a transition metal (e.g., Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni), A is a p-element (Al, Si, Ga, Ge, etc.), and X is carbon or nitrogen. Due to their layered structure, MAX phases exhibit high strength, plasticity, thermal conductivity, chemical and thermal stability, high melting temperatures, low coefficients of thermal expansion, and retain their structural stability at temperatures above 1000 °C. They are also resistant to high-temperature oxidation and are easily machinable. These unique properties are attributed to the structural features of these materials, including the presence of carbides, silicides, and intermetallic compounds that form stable layered structures.

The aim of the dissertation is to develop a technology for producing Fe- and Si-alloyed MAX-phase structured alloys using the method of high-temperature self-propagating synthesis (SHS) and to investigate the structure formation and properties of the $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ MAX phase based on a Ti_3AlC_2 alloy synthesized from an equimolar mixture of Ti, FeSi, and Al metal powders and carbon powder. This modification not only enhances the thermomechanical properties of the material but also imparts ferromagnetic properties.

Thermodynamic calculations have shown that it is possible to obtain MAX phases of the $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ composition via aluminothermic high-temperature self-propagating synthesis, provided that an appropriate amount of powder additives is used.

It was found that the process of mechanical activation significantly affects the efficiency of the high-temperature SHS process. It facilitates the formation of fine-dispersed metal powders, activation of surface layers, and multi-nucleation crystallization under lower temperature conditions.

It was established that the obtained $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$ phase is a material with a hexagonal structure, where Ti and Fe atoms are located in the metal-carbide layers, occupying equivalent positions in the structure. By milling this phase, a fine MAX-phase

powder was obtained, suitable for use in powder metallurgy as a magnetic material enriched with iron-containing silicides.

It was also revealed that silicon alloying improves the structural, mechanical, and functional properties of Ti–Al–C alloys compared to iron alloying. It was shown that Si is an effective alloying element for the development of stable MAX-phase composites with high thermal resistance and directional strength. While iron locally increases hardness, it causes microstructural dislocations and reduces elasticity, thereby limiting its applicability in such materials.

Morphological studies revealed the formation of a layered, graphite-like, and porous structure, enabling the material's application in various technological processes. The addition of iron imparts ferromagnetic properties, while silicon increases thermal stability and structural integrity under thermomechanical cycling, opening up prospects for using the obtained powder in the production of ferromagnetic wear-resistant and structural composite materials.

As a result of comprehensive research, a technology was developed for the production of Fe- and Si-alloyed MAX-phase structured alloys. The resulting alloys are multiphase materials containing up to 93% $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ MAX phase, as well as crystalline iron silicide phases (Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi) and, in smaller amounts, Ti_5Si_3 , TiC , and Al_4C_3 . The obtained powders can be used in mechanical engineering and electronics as components with high strength, wear resistance, corrosion resistance, and magnetic properties.

A total of 10 scientific articles have been published on the topic of the dissertation, and 4 authorship certificates of the Republic of Armenia have been obtained, including 2 single-authored scientific publications.

