

ՀՀ ԳԱԱ Ա. Բ. ՆԱԼԲԱՆԴՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ՔԻՄԻԱԿԱՆ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

ՂԱԼԹԱՂՉՅԱՆ ԾՈՎԻՆԱՐ ԿՈԼՅԱՅԻ

ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԿԱՐՔԻԴԻ ՀԻՄՔՈՎ ԿԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ
ՍԻՆԹԵԶԸ ԵՌԱԶԱՓ ՏՊԱԳՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱՐ ԸՆՏՐՈՂԱԿԱՆ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ
ՀԱԼԵՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅՈՎ

Բ. 00.04 – «Ֆիզիկական քիմիա» մասնագիտությամբ քիմիական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2025

A. B. NALBANDYAN INSTITUTE OF CHEMICAL PHYSICS NAS RA

GHALTAGHCHYAN TSOVINAR

SYNTHESIS OF SILICON CARBIDE - BASED CERAMIC COMPOSITES FOR 3D
PRINTING USING SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

A B S T R A C T

of the dissertation in 02.00.04 - "Physical Chemistry" submitted for the degree of
Candidate of Chemical Sciences

YEREVAN 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է ՀՀ ԳԱԱ Ա. Բ. Նալբանդյանի անվան Քիմիական ֆիզիկայի ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝

տեխ. գիտ. թեկնածու Մարինա Աղասի Աղայան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

քիմ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ռոմիկ Սուրենի Հարությունյան
տեխ. գիտ. թեկնածու Գրիգոր Աշոտի Բաբայան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Քենդլ» սինքրոտրոնային հետազոտությունների ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է **2025 թ. դեկտեմբերի 12-ի, ժամը 14:30-ին՝** ՀՀ ԳԱԱ Ա. Բ. Նալբանդյանի անվան Քիմիական ֆիզիկայի ինստիտուտում գործող ՀՀ ԲԿԳԿ-ի 017 «Քիմիա» մասնագիտական խորհրդում (0014, Երևան, Պ. Սևակ փ. 5/2): Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ Ա. Բ. Նալբանդյանի անվան Քիմիական ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում: Սեղմագիրն առաքվել է 2025 թվականի նոյեմբերի 10-ին:

017 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, ք. գ. թ.



Մարիետա Կ. Հաքարյան

The subject of the dissertation was approved at the A.B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics, NAS RA.

Scientific advisor:

Candidate of Technical Sciences Marina A. Aghayan

Official opponents:

Doctor of Chemical Sciences, Professor Romik S. Harutyunyan
Candidate of Technical Sciences Grigor A. Babayan

Leading organization:

"CANDLE" Synchrotron Research Institute

The defense will take place on **12th December 2025, at 14:30**, at the meeting of the Special Council of the HESC RA 017 "Chemistry", acting at the A. B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics, NAS RA (0014 Yerevan, P. Sevak Street 5/2).

The PhD thesis is available at the library of the A.B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics NAS RA.

The abstract was sent out on November 10, 2025.

Scientific secretary of the 017 special council,
Candidate of Chemical Sciences



Marieta K. Zakaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Թեմայի արդիականությունը

Առաջադեմ կերամիկական կոմպոզիտների ստացումն ու մշակումը կարևոր նշանակություն ունեն օդատիեզերական, ավտոմոբիլային, պաշտպանական, ջերմահեռացման, էլեկտրոնային սարքավորումների արտադրության ոլորտներում: Կերամիկական նյութերի շարքում առանձնանում է սիլիցիումի կարբիդը (SiC)՝ որպես տեխնիկական խիստ պահանջների համապատասխանող նյութ: Շնորհիվ հատկությունների յուրօրինակ համադրության՝ այն կարող է դիտարկվել որպես արժեքավոր հումք՝ արտաքին միջավայրի անբարենպաստ պայմաններում կիրառվելու նպատակով:

Ավանդական արտադրական մեթոդների կիրառումը SiC-ի պարագայում որոշ սահմանափակումներ ունի՝ բարդ, հարմարեցված կառուցվածքով դետալների ստացման, ժամանակատարության, ծախսատարության և էկոլոգիական նկատառումներից ելնելով:

Եռաչափ տպագրական տեխնոլոգիաների զարգացումը լայն հնարավորություններ է ստեղծում բազմատեսակ հումքերի, այդ թվում՝ SiC-ի նորովի բացահայտման համար: Վերջիններիս ներմուծումն արտադրություն հեղափոխական դեր ունեցավ՝ թույլ տալով կերտել «խելացի» կառուցվածքով ֆունկցիոնալ դետալներ՝ կրճատելով արտադրական թափոնները և խնայելով ժամանակը:

Չնայած մետաղների և պոլիմերների պարագայում գրանցված լուրջ հաջողություններին՝ կերամիկական հիմքով փոշեխառնուրդների եռաչափ տպագրությունը մարտահրավերներ է պարունակում: Հիմնական խնդիրները կերամիկական նյութերի հալման բարձր ջերմաստիճաններն են, լազերային էներգիայի կլանման սահմանափակումները, ինչպես նաև ներքին ջերմային լարումները:

Սույն հետազոտական աշխատանքն առաջարկում է մի շարք խնդիրների լուծումներ, որոնք հնարավորություն են տալիս իրականացնել SiC-ի եռաչափ տպագրություն ընտրողական լազերային հալեցման (ԸԼՀ) մեթոդով՝ ապահովելով պահանջվող որակի տպելիություն, եռակալման ունակություն, կառավարելի տեխնիկական հատկությունների ստացում, ճկուն դիզայն: Այս ամենը հնարավոր է դարձել տարբեր բաղադրության կոմպոզիտների պատրաստման և փորձարկման, հիմնական տպագրական պարամետրերի դինամիկ փոփոխության, հետտպագրական մշակման տարբեր մեթոդների կիրառման միջոցով:

Ուսումնասիրության նպատակը և խնդիրները

Աշխատանքի նպատակն է եղել նախագծել և պատրաստել SiC-ի հիմքով տարբեր բաղադրության փոշեխառնուրդներ, որոնք որպես հումք կարող են ծառայել ԸԼՀ մեթոդով մշակման համար: Զուգահեռաբար իրականացվել են եռաչափ

տպագրության փորձեր՝ ստացված կոմպոզիտները պատրաստման միջանկյալ փուլերում փորձարկելու և ԸԼՀ մեթոդով կոմպակտավորելու համար:

Նպատակին հասնելու համար անհրաժեշտ էր լուծել հետևյալ խնդիրները.

1. Նախագծել և պատրաստել սիլիցիումի կարբիդի հիմքով տարբեր բաղադրության կոմպոզիտային փոշեխառնուրդներ:
2. Հարգացնել փոշեխառնուրդների ստացման մեթոդները՝ ցանկալի մորֆոլոգիայով հումք ստանալու համար:
3. Գտնել հիմնական տպագրական պարամետրերի լավագույն համակցությունը յուրաքանչյուր կոմպոզիտի համար՝ կայուն և վերարտադրելի բնութագրերով դետալներ ստանալու համար:
4. Գնահատել հավելանյութերի ազդեցությունը եռակալման արդյունավետության, տպագրված դետալի տեխնիկական հատկությունների վրա:
5. Գնահատել եռաչափ տպագրված նմուշների մեխանիկական, էլեկտրական և ջերմային հատկությունները:
6. Փորձարկել արագագործ ջերմաստիճանային սկաներով արագ տաքացման մեթոդը՝ նմուշների հետտպագրական ջերմային մշակման համար:

Հետազոտության նորույթը

Իրականացված հետազոտության շրջանակներում մշակվել են SiC-ի հիմքով փոշեխառնուրդներ և համապատասխանեցվել են ԸԼՀ մեթոդի տեխնիկական պահանջներին: Տպագրական պարամետրերի բազմաթիվ տարբերակներ են փորձարկվել և համալիր օպտիմալացվել յուրաքանչյուր խմբաքանակի համար՝ շրջանակի նեղացման սկզբունքով: Առաջին անգամ իրականացվել է ռեակտիվ եռակալում տպիչի խցիկում՝ էլանյութերից (սիլիցիում և ածխածին) սիլիցիումի կարբիդ սինթեզելու համար: Օգտագործվել է լազերային ճառագայթի ջերմային էներգիան: Կատարվել է երկու գործողություն միաժամանակ՝ հումքի սինթեզ և կոմպակտավորում մեկ փուլով: Առաջին անգամ իրականացվել է նաև եռաչափ տպագրված նմուշների ջերմային մշակում արագագործ ջերմաստիճանային սկաներով՝ տաքացման բարձր արագությունների կիրառմամբ:

Գիտական և կիրառական նշանակությունը

Հետազոտական աշխատանքի արդյունքում գեներացվել է փորձառություն և գիտելիքների պաշար նյութագիտության և եռաչափ տպագրության ոլորտներում, որոնք արդյունավետորեն կարող են օգտագործվել ինչպես գիտական, այնպես էլ կիրառական նկատառումներով: Մասնավորապես.

- ✓ Նախագծվել, պատրաստվել և փորձարկվել են կերամիկական հիմքով կոմպոզիտներ, որոնք կիրառություն կարող են գտնել որպես հումք ԸԼՀ մեթոդով տարբեր դետալներ տպագրելու համար:
- ✓ Փորձարկվել են երեք ֆունկցիոնալ հավելանյութեր (բորի կարբիդ և նիտրիդ, իտրիումի օքսիդ), ուսումնասիրվել է վերջիններիս ազդեցությունը նմուշների տեխնիկական հատկությունների վրա:
- ✓ Մշակվել են ԸԼՀ մեթոդի հիմնական տպագրական պարամետրերի մի քանի փաթեթներ՝ ստացված հումքը կոմպակտավորելու համար: Նշված պարամետրերը հաջողությամբ կարող են կիրառվել կերամիկական հիմքով ֆունկցիոնալ դետալներ տպագրելու համար:
- ✓ Իրականացվել է արտադրական գործընթացի նախագծում և գործարկում՝ հումքի ստացում, եռաչափ տպագրություն, հետտպագրական մշակում:
- ✓ Իրականացվել է հումքի, ծախսվող էներգիայի և ժամանակի կառավարման օպտիմալացում՝ միտված յուրաքանչյուր դետալի համար ռեսուրսների և աշխատաժամանակի խնայմանը, արտադրական թափոնների կրճատմանը:

Պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական զրույթները

- ✓ Տարբեր բաղադրության փոշեխառնուրդների նախագծում և պատրաստում՝ հարմարեցված ԸԼՀ մեթոդի պահանջներին:
- ✓ Հիմնական տպագրական պարամետրերի տարբեր հավաքակազմերի մշակում և օպտիմալացում՝ ստացված փոշեխառնուրդները կոմպակտավորելու համար:
- ✓ Ֆունկցիոնալ երեք հավելանյութերի փորձարկում, ազդեցության գնահատում նմուշների մեխանիկական, ջերմային, էլեկտրական հատկությունների վրա:
- ✓ Արագագործ ջերմաստիճանային սկաներով ջերմային մշակման փորձարկում՝ եռաչափ տպագրված նմուշներում կարբիդացման պրոցես հարուցելու և զարգացնելու համար:
- ✓ Տաքացման արագության և կարբիդացման աստիճանի միջև ուղղակի կապի բացահայտում, ռեակցիայի մեխանիզմի բացատրություն:
- ✓ Ելանյութերից սիլիցիումի կարբիդի սինթեզի և կոմպակտավորման իրականացում եռաչափ տպիչի խցիկում՝ մեկ փուլով:

Աշխատանքի փորձաքննությունը

Աշխատանքի արդյունքները ներկայացվել են հետևյալ գիտաժողովներում.

- ✓ “30th International Baltic Conference Materials Engineering and Modern manufacturing 2023” միջազգային գիտաժողով (19-20 հոկտեմբեր, 2023թ., Կաունաս, Լիտվա).

- ✓ “2nd International Conference and the 5th National Conference of Laboratory Equipment and Technologies” միջազգային գիտաժողով (10-11 սեպտեմբեր, 2024թ., Թավրիզ, Իրան) .
- ✓ “Materials Today Conference 2025” միջազգային գիտաժողով (23-26 հունիս, 2025թ., Սիոնցես, Իսպանիա) .

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը

Աշխատանքը կազմված է ներածությունից, երեք գլուխներից, եզրակացություններից, օգտագործված գրականության ցանկից:

Նյութը շարադրված է համակարգչային շարվածքի 104 էջերի վրա, պարունակում է 41 նկար և 12 աղյուսակ: Օգտագործված գրականության ցանկը ներառում է 154 հղում:

Աշխատանքի համառոտ բովանդակությունը

Ներածություն

Շարադրված է թեմայի արդիականությունը, ուսումնասիրության նպատակը և խնդիրները, հետազոտության նորույթը, պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները, աշխատանքի գիտական և կիրառական նշանակությունը:

Գլուխ 1. Գրական ակնարկ

Ներկայացված է սեղմ պատմական ակնարկ սիլիցիումի կարբիդի կիրառությունների մասին՝ շեշտադրելով արտաքին միջավայրի խիստ պայմաններում գործարկվելու մեծ ներուժը: Շարադրված է SiC-ի կառուցվածքը, ստացման եղանակները, պոլիտիպերը, մի շարք տեխնիկական հատկություններ: Քննարկվում է եռաչափ տպագրական (ԵՏ) տեխնոլոգիաների ներմուծումն արտադրություն, գիտության ոլորտ, ԵՏ առավելություններն ու շահավետությունը: Համառոտ ներկայացված են ԵՏ առավել հայտնի և կիրառվող տարատեսակները: Մանրամասն ներկայացված են հետազոտական աշխատանքի շրջանակներում կիրառված ԸԼՀ մեթոդը, տպագրական պարամետրերն ու տպման որակի վրա ազդող գործոնները:

Ենթագլուխներից մեկը նվիրված է SiC-ի կոմպակտավորման համար կիրառվող ավանդական արտադրական և ԵՏ տեխնոլոգիաների համեմատմանը տարբեր ասպեկտներում: Շեշտվել է նորարարական և «խելացի» արտադրական լուծումների ներմուծումն ու կատարելագործումը՝ առկա մարտահրավերները հաղթահարելու համար:

Գլուխ 2. Նյութեր և մեթոդներ

2.1 ենթագլխում ներկայացված են կերամիկական հիմքով փոշեխառնուրդների համար հումք հանդիսացող ելանյութերը, նախագծման և ստացման մոտեցումները, ինչպես նաև օգտագործված սարքավորումները (մոլորակային գնդաղաց, չորանոց): Նկարագրված են կոմպոզիտային փոշեխառնուրդների ստացման երկու մեթոդներ:

2.2 ենթագլուխը լուսաբանում է կոմպոզիտային փոշեխառնուրդների կոմպակտավորման համար կիրառվող **“Realizer GmbH SLM-50”** եռաչափ տպիչի կառուցվածքը, աշխատանքի սկզբունքները, ինչպես նաև ԸԼՀ մեթոդի հիմնական տպագրական պարամետրերը:

2.3–2.13 ենթագլուխներում ներկայացված են կոմպակտավորված դետալների միկրոկառուցվածքի, ֆազային բաղադրության, մեխանիկական, էլեկտրական, ջերմային հատկությունների ստուգման մեթոդներն ու սարքավորումները (խտաչափ, դիֆրակտոմետր, հղկման ունիվերսալ սարք, լուսաձրային էլեկտրոնային մանրադիտակ, ջերմահաղորդականությունը չափող սարք, մեգաօհմմետր, դիլատոմետր, կարծրաչափ, սեղմման նկատմամբ ամրությունը ստուգող սարք, արագագործ ջերմաստիճանային սկաներ, ածխածնի անալիզատոր և այլն):

Գլուխ 3. Արդյունքներ և քննարկում

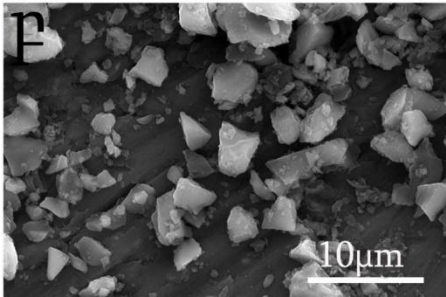
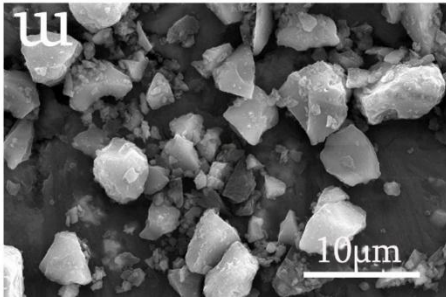
3.1 ենթագլխում ներկայացված է խառնման չոր և թաց մեթոդներով ստացված փոշեխառնուրդների ցանկը (աղյուսակ 1), ինչպես նաև միկրոկառուցվածքը: Երկու մեթոդների դեպքում էլ ստացվել են անկյունավոր հատիկներ՝ բազմաթիվ սուր եզրերով, անհարթ մակերեսներով (նկար 1):

Կոմպոզիտային փոշեխառնուրդ #	Բաղադրություն, զանգվածային %							
	Si	Si-SG	SiC-SA37	SiC-F7.6	Y ₂ O ₃	BN	B ₄ C	C
1	20	-	80	-	-	-	-	-
2	20	-	-	80	-	-	-	-
3	20	-	-	77	3	-	-	-
4	20	-	-	75	5	-	-	-
5	20	-	77	-	3	-	-	-
6	20	-	75	-	5	-	-	-
7	20	-	35	35	-	10	-	-
8	20	-	40	40	-	-	-	-

9	20	-	38.5	38.5	3	-	-	-
10	-	72	-	-	-	-	-	28
11	-	68.4	-	-	-	-	5	26.6

Աղյուսակ 1: Կերամիկական հիմքով փոշեխառնուրդների բաղադրությունը:

Արդյունքում ստացվել է բալանսավորված կառուցվածք՝ ոչ գնդաձև հատիկներ, որոնք սակայն ունեն բարակ շերտով տարածվելու և եռակալվելու ունակություն:

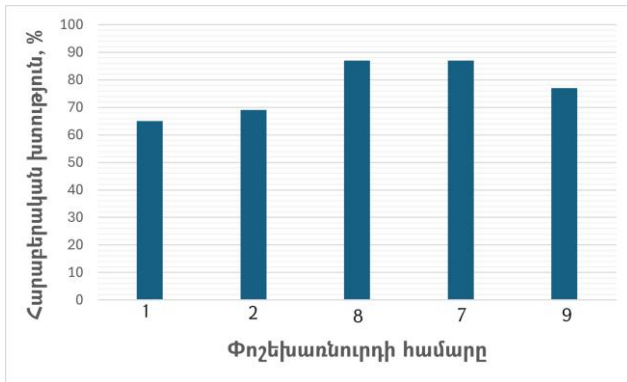


Նկար 1: Թիվ 10 (ա) և թիվ 11 (բ) կոմպոզիտային փոշիների միկրոկառուցվածքը:

3.2–3.4 ենթազրույթներում քննարկվում է ԸԼՀ մեթոդով տպագրված նմուշների հարաբերական խտության արժեքների կախվածությունը լազերային հոսանքի մեծությունից և փոշեխառնուրդում առկա հավելանյութի տեսակից: Ներկայացված է նաև լազերային հոսանքի և հավելանյութի ազդեցությունը նմուշների էլեկտրական, ջերմային և մեխանիկական հատկությունների վրա:

Փոշեխառնուրդներ 1-ի և 2-ի դեպքում (մոնոմոդալ) հնարավոր է եղել հասնել համապատասխանաբար 65 % և 69 % հարաբերական խտության՝ 2400-2800 մԱ լազերային հոսանքներ կիրառելիս: Եռակալման ելքը բարելավելու համար պատրաստվել է բինոդալ փոշի՝ SiC-ի տարբեր մասնիկների չափով փոշիների խառնուրդ (փոշեխառնուրդ 8): 50 % զանգվածային բաժնով SA37 և 50 % զանգվածային բաժնով F7.6 բինոդալ փոշու կիրառման պարագայում հաջողվել է հասնել 87 % հարաբերական խտությամբ նմուշների ստացմանը (նկար 2):

Ստացված արդյունքը թույլ է տալիս եզրակացնել, որ մասնիկների չափսի նեղ բաշխումն օպտիմալ չէ կերամիկական հիմքով կոմպոզիտների կոմպակտավորման համար:

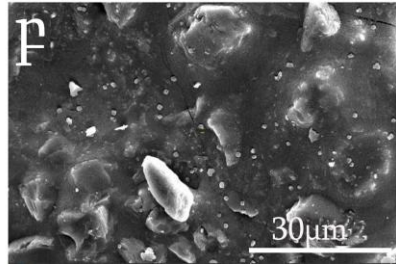
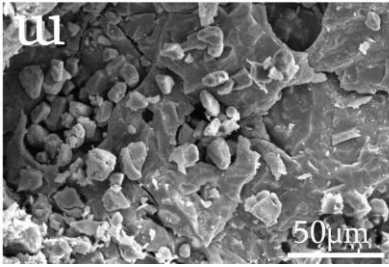


Նկար 2: Կոմպոզիտային փոշիների բաղադրության ազդեցությունը հարաբերական խտության արժեքների վրա:

Եռակալման գործընթացներում դասական հավելանյութ համարվող Y_2O_3 -ի ավելացումը (փոշեխառնուրդներ 3, 4, 5 և 6) հակառակ ազդեցությունն է ունեցել՝ իջեցնելով նմուշների հարաբերական խտության արժեքը մինչև 77 %: 10 % զանգվածային բաժնով բորի նիտրիդ պարունակող փոշեխառնուրդ 7-ի դեպքում նույնպես հնարավոր է եղել հասնել 87 % հարաբերական խտության (նկար 2):

Կոմպոզիտային փոշուն 10 % զանգվածային բաժնով հեքսագոնալ բորի նիտրիդի ավելացումը հանգեցրել է նմուշների էլեկտրական դիմադրության և ջերմային հատկությունների անկմանը: Նմուշների էլեկտրական դիմադրության արժեքը փոքրացել է 3 անգամով, իսկ ջերմահաղորդականությունը՝ 2 անգամով: Նվազել է նաև նմուշների մեխանիկական կատարողականությունը. առաձգական մոդուլի արժեքը կազմել է 2.7 ԳՊա: Բորի նիտրիդի փոխարինումը խորհումի օքսիդով բարելավել է նմուշների էլեկտրական և ջերմային հատկությունները, սակայն ստացված արժեքները զիջել են բիմոդալ փոշով տպված նմուշներից ստացված արժեքներին:

Նկար 3-ում պատկերված է նմուշների միկրոկառուցվածքը՝ լազերային հոսանքի տարբեր արժեքների դեպքում: Ի տարբերություն 2800 մԱ լազերային հոսանքով տպված նմուշների՝ 3000 մԱ լազերային հոսանքի պարագայում մասնիկները բավարար չափով եռակալված են, առկա են քիչ քանակությամբ ծակոտիներ: Լազերային հոսանքի փոքր արժեքները բավարար էներգիա չեն ապահովում եռակալման համար: Արդյունավետ եռակալման համար ընտրվել է լազերի հոսանքի 3000 մԱ արժեքը, որի դեպքում առաձգական մոդուլը հասնում է 59.8 ԳՊա առավելագույն արժեքին:



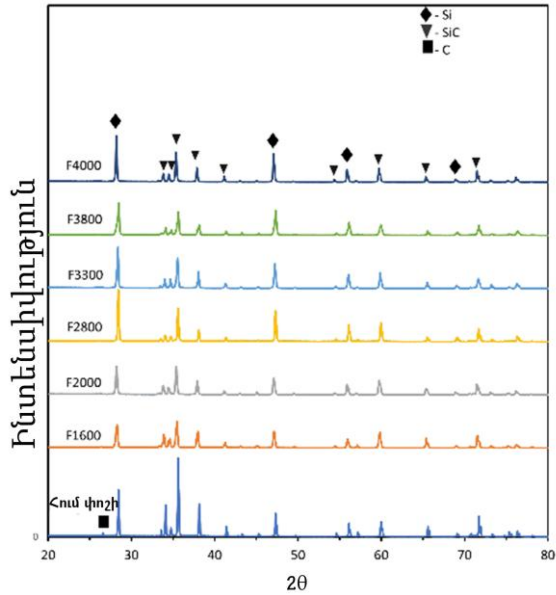
Նկար 3: 2800 մԱ (ա) և 3000 մԱ (բ) լազերային հոսանքով տրված նմուշների միկրոկառուցվածքը:

3.5 ենթազխում ներկայացված է տպման հարթակի նյութի (սիլիցիումի կարբիդ և տիտան) ազդեցությունը նմուշների միկրոկառուցվածքի վրա: Տիտանի և սիլիցիումի կարբիդի ջերմային ընդարձակման գործակիցների մեծ տարբերությունը, դրանց հնարավոր փոխազդեցության արդյունքում առաջացած փխրուն սիլիցիդային ֆազերը գեներացնում են մնացորդային լարումներ և միկրոճաքեր: Այդ պատճառով նպատակահարմար է SiC հիմքով փոշեխառնուրդների ԸԼՀ տպագրությունն իրականացնել ոչ թե ստանդարտ տիտանե հարթակների, այլ սիլիցիումի կարբիդի մոնոլիտ ձուլակտորից պատրաստված հարթակների վրա:

3.6 ենթազխում ամփոփված են ԸԼՀ մեթոդով ստացված նմուշների հետտպագրական ջերմային մշակման արդյունքները՝ ՀՀ ԳԱԱ Ա. Բ. Նալբանդյանի անվան Քիմիական ֆիզիկայի ինստիտուտի Պինդ ֆազային ռեակցիաների մակրոկինետիկայի լաբորատորիայում նախագծված և ներկայումս գործարկվող արագագործ ջերմաստիճանային սկաներով:

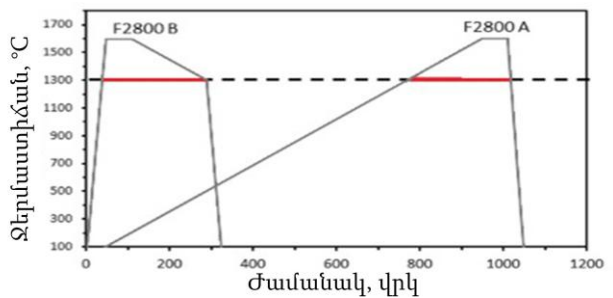
Եռակլմանը զուգահեռ՝ լազերային ճառագայթի ազդեցությամբ տեղի է ունենում կոմպոզիտային փոշեխառնուրդում առկա SiC-ի քայքայում: Նմուշների բաղադրության փոփոխությունը և լազերի ազդեցությամբ առաջացած ֆազերը նույնականացնելու և քանակական անալիզ կատարելու համար ընտրվել են փոշեխառնուրդ 8-ից տպված նմուշները, որոնք ենթարկվել են ռենտգենաֆազային հետազոտության: Վերարտադրելի արդյունքներ են ստացվել լազերի հզորության 67-96 Վտ միջակայքում, տեսածրման արագությունը՝ 0,5 մմ/վ, միջգծային հեռավորությունը՝ 0.06 մմ, փոշու շերտի հաստությունը՝ 25 մկմ:

Ռենտգենաֆազային հետազոտության պատկերները ցույց են տալիս, որ սիլիցիումի և սիլիցիումի կարբիդի պիկերի հարաբերակցությունը մեծանում է լազերի հզորության մեծացմանը զուգահեռ, ինչը սիլիցիումի կարբիդի քայքայման արդյունք է (նկար 4): Այս հանգամանքը հաշվի առնելով՝ տպման համար օպտիմալ լազերի հզորության արժեք է ընտրվել 67.2 Վտ-ը (նմուշ F2800):



Նկար 4: Փոշու և կոմպակտավորված նմուշների ռենտգենաֆազային հերազոտության պարկերները:

Քայքայված սիլիցիումի կարբիդը վերականգնելու համար նմուշները տաքացվել են արագադործ ջերմաստիճանային սկաների միջոցով (նկար 5):

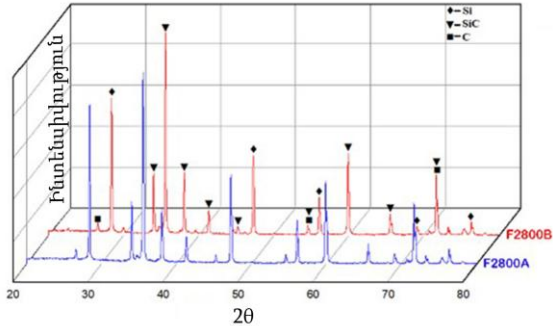


Նկար 5: Արագադործ ջերմաստիճանային սկաներ, աշխատանքի ռեժիմները:

Տաքացման արագության ազդեցությունը կարբիդացման վրա գնահատելու համար ընտրվել են տաքացման երկու արագություններ՝ 100 °C/րոպե (նմուշ F2800A)

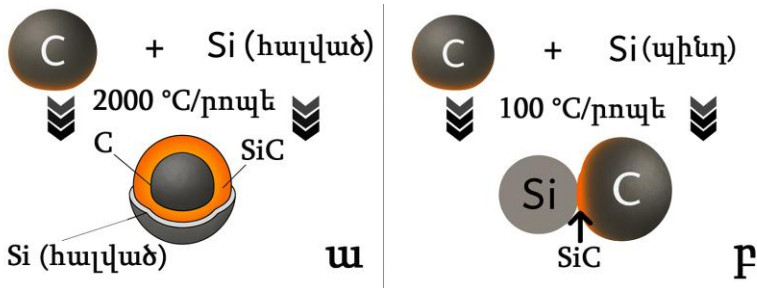
և 2000 °C/րոպե (սնուշ F2800B): Տաքացման արագությունների նշված արժեքները սկանների տեխնիկական հնարավորությունների ստորին և վերին սահմաններն են տվյալ գիտափորձի շրջանակներում:

Ռենտգենաֆազային անալիզի պատկերներից ակնհայտ է, որ 2000 °C/րոպե տաքացման արագության դեպքում սիլիցիումի կարբիդի պիկի ինտենսիվությունն ավելի բարձր է եղել (նկար 6):



Նկար 6: Սնուշների ռենտգենաֆազային անալիզի օրինաչափությունները (F2800A և F2800B) արագազործ ջերմաստիճանային սկաներով փաթացումից հետո:

Այսպիսով՝ տաքացման բարձր արագությունների դեպքում ավելի շատ սիլիցիում է փոխազդում ածխածնի հետ՝ մեծացնելով կարբիդի ելքը:



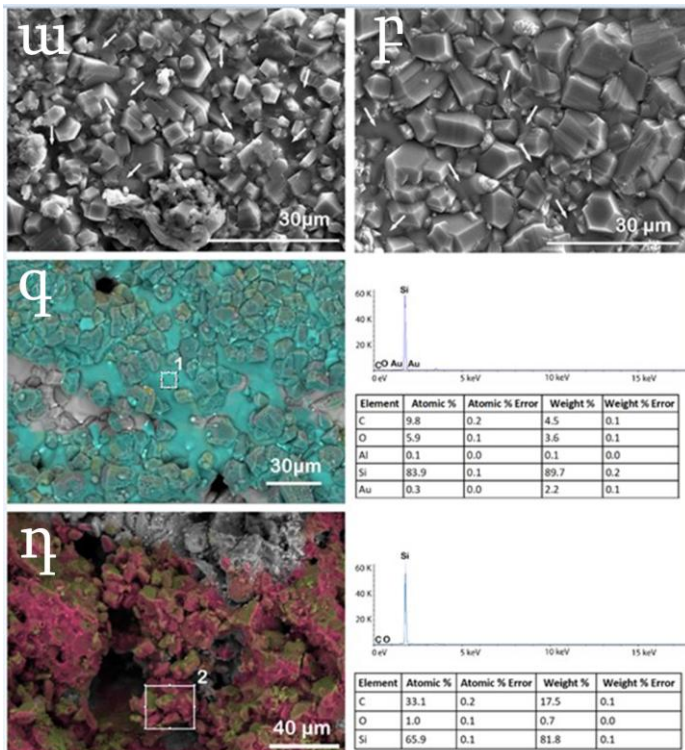
Նկար 7: Ածխածնի և սիլիցիումի փոխազդեցության հնարավոր մեխանիզմները արագ (ա) և դանդաղ (բ) փաթացումների դեպքում:

Դա պայմանավորված է նրանով, որ դանդաղ տաքացման դեպքում սիլիցիումի և ածխածնի հատիկների հպման տեղամասում SiC-ի շերտ է ձևավորվում մինչ սիլիցիումի հալվելը՝ խոչընդոտելով հետագա դիֆուզիային (նկար 7բ): Մինչդեռ արագ տաքացման դեպքում սիլիցիումը հալվում է, թրջում ածխածինը և ապահովում

փոխազդեցության մեծ մակերես (նկար 7ա): Բարձր ջերմաստիճանով պայմանավորված նվազում է նաև մածուցիկությունը՝ մեծացնելով հեղուկ ֆազի շարժունակությունը:

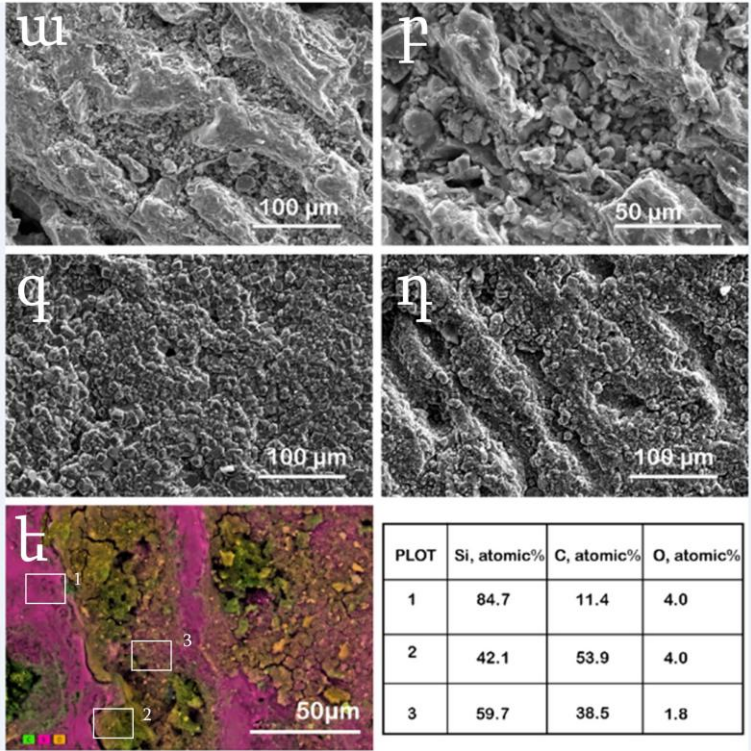
Նկար 8-ում պատկերված են տարբեր արագություններով տաքացված նմուշների մանրադիտակային և էներգիայի ցրման ռենտգենյան սպեկտրաչափության (EDS) արդյունքները:

Տաքացման երկու արագությունների դեպքում էլ առկա են երկու ֆազեր՝ սիլիցիումի կարբիդ և մնացորդային սիլիցիում, սակայն ձևավորված կարբիդի հատիկների չափսերը տարբեր են (նկար 8 ա, բ): SiC-ի հատիկի աճը տեղի է ունենում հալված սիլիցիումի և ազատ ածխածնի փոխազդեցությունից: Ածխածնի աղբյուրը SiC-ն է, որը քայքայվում է լազերային ճառագայթի ազդեցությամբ:



Նկար 8: 100 °C/րոպե (ա) և 2000 °C/րոպե (բ) արագություններով տաքացված նմուշների միկրոկառուցվածքը, էներգիայի ցրման ռենտգենյան սպեկտրաչափության արդյունքները (գ,դ):

Նմուշների միկրոկառուցվածքը տաքացումից առաջ և հետո պատկերված է նկար 9-ում: Տաքացման ցածր արագությունների դեպքում շերտավոր կառուցվածքը դեռևս պահպանվում է, բայց ոչ այնքան արտահայտված, որքան ելային նմուշի դեպքում: Արագ տաքացման դեպքում սիլիցիումը հալվում է և լցնում դատարկ տարածությունները՝ ավելի հարթ դարձնելով միկրոկառուցվածքը: Արդյունքում կարբիդացումն առավել արդյունավետ է ընթանում, նմուշների ծակոտկենությունը նվազում է:



Նկար 9: Նմուշների միկրոկառուցվածքը տաքացումից առաջ փորձեր խոշորացումների դեպքում (ա,բ) և տաքացումից հետո (գ, դ), էներգիայի ցրման ռենտգենյան սպեկտրաչափի արդյունքները F2800-ի համար (ե):

Ատենախոսության 3.7 ենթագլխում ներկայացված են ռեակտիվ եռակալման փորձերի արդյունքները՝ փոշեխառնուրդ 10-ի և 11-ի օգտագործման դեպքում (աղյուսակ 1): Ելանյութերից (սիլիցիում և ածխածին) SiC սինթեզելու համար կիրառվել է ՀՀ մեթոդը: Ուսումնասիրվել է տպագրական պարամետրերի ազդեցությունը

սիլիցիում-ածխածին ռեակցիայի ընթացքի և ելքի վրա: Որպես հավելանյութ կիրառվել է հեքսագոնալ բորի կարբիդ, գնահատվել է վերջինիս ազդեցությունը SiC-ի առաջացման արդյունավետության վրա: Ռեակտիվ եռակալված նմուշները ենթարկվել են հետտպագրական ջերմային մշակման: Իրականացվել են նաև նմուշների միկրոկարծրության չափումներ Վիքերսի սանդղակով:

Ջերմային մշակում կատարելու համար օգտագործվել է արագագործ ջերմաստիճանային սկաներ: Նմուշները սենյակային ջերմաստիճանից տաքացվել են մինչև 1730 °C, պահվել 3 ժամ տևողությամբ: Տեխնիկական վերազինման շնորհիվ տաքացման արագությունը հաջողվել է հասցնել 3400 °C/րոպեի:

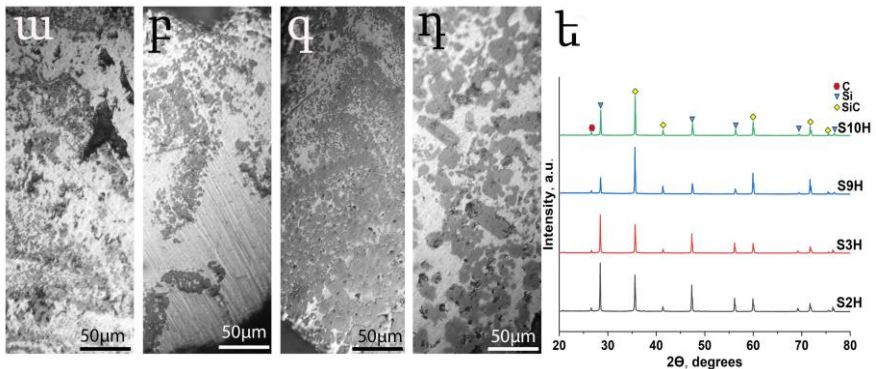
Աղյուսակ 2-ում ներկայացված է ռեակտիվ եռակալված նմուշների ցանկը:

Նույն. համար	Փոշեխառնուրդ №	Լազերի հզոր., Վտ	Ֆոկ. հեռ., մմ	Ազդ. տևող., մկվ	Ջերմային մշակում
S1	10	31	4	40	ՈՉ
S2	10	36	4	40	ՈՉ
S3	10	48	4	40	ՈՉ
S2H	10	36	4	40	ԱՅՈ
S3H	10	48	4	40	ԱՅՈ
S4	10	48	9.8	40	ՈՉ
S5	10	48	9.8	80	ՈՉ
S6	10	48	9.8	160	ՈՉ
S7	10	48	14	40	ՈՉ
S8	11	31	4	40	ՈՉ
S9	11	36	4	40	ՈՉ
S10	11	48	4	40	ՈՉ
S9H	11	36	4	40	ԱՅՈ
S10H	11	48	4	40	ԱՅՈ

Աղյուսակ 2: ԸԼՀ մեթոդով ռեակտիվ եռակալված նմուշների ցանկը:

Փոփոխության են ենթարկվել լազերի ազդեցության տևողությունն ու լազերի ֆոկուսային հեռավորությունը: Ազդեցության տևողությունը փոխվել է 40-160 մկվ միջակայքում: Արտաքին զննությամբ նմուշներն իրարից չեն տարբերվել, իսկ ռենտգենաֆազային վերլուծությունը ցույց է տվել, որ ազդեցության տևողության մեծացումը բերում է SiC/Si քանակական հարաբերակցության աննշան մեծացման: Սակայն, քանի որ տարբերությունը բավականաչափ մեծ չէ, նպատակահարմար է համարվել կիրառել 40 մկվ տևողությունը: Ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը 14 մմ-ից 4 մմ փոփոխելիս ելքային ճառագայթի հատույթի տրամագիծը նվազում է, որի հաշվին ճառագայթի էներգիայի խտությունը կամ միավոր ծավալին բաժին ընկնող էներգիան աճում է: Բացահայտվել է, որ լազերային ճառագայթի կիզակետային հեռավորությունը 14-4 մմ փոփոխելիս SiC/Si քանակական հարաբերակցությունն աճում է, որը պայմանավորված է էներգիայի խտության մեծացմամբ ֆոկուսային հեռավորությունը փոքրացնելիս: Ելնելով վերոգրյալից՝ օպտիմալ է համարվել 4 մմ կիզակետային հեռավորությունը:

Ռենտգենաֆազային քանակական անալիզի արդյունքում բացահայտվել է, որ տպված նմուշներում SiC-ի պարունակությունը կազմում է մոտ 45% (S1, S2, S3), և փոշեխառնուրդ 10-ի պարագայում լազերի հզորության մեծացումը 31-ից մինչև 48 Վտ չի ազդում սիլիցիում-ածխածին փոխազդեցության վրա: Պատկերն այլ է բորի կարբիդ պարունակող նմուշներում: Լազերի հզորությունը 31-36 Վտ փոփոխելիս սիլիցիումի կարբիդի քանակն ավելանում է 50 %-ից մինչև 55 %՝ (S8 և S9 նմուշներ համապատասխանաբար): Լազերի հզորության հետագա մեծացումը մինչև 48 Վտ SiC-ի ելքի վրա չի ազդում (S10):



Նկար 10: Ջերմային մշակման ենթարկված S2H (ա), S3H (բ), S9H (գ) և S10H (դ) նմուշների միկրոկառուցվածքը և ռենտգենաֆազային հետազոտության դիագրամները (ե):

Նկար 10-ում ներկայացված են ջերմային մշակման ենթարկված S2H, S3H, S9H և S10H նմուշների միկրոկառուցվածքը և ռենտգենաֆազային հետազոտության դիագրամները:

Նմուշների միկրոկառուցվածքում առկա են ազատ սիլիցիում, սիլիցիումի կարբիդ և ծակոտիներ: Առանց բորի կարբիդի նմուշներում SiC-ի հատիկներն անհամասեռ են բաշխված կառուցվածքում: 36 Վտ լազերով տպված նմուշները (S2H, S9H) ունեն ավելի միատարր կառուցվածք, և հատկապես S9H-ում ստացվել է SiC-ի առավել մեծ քանակ (նկար 10 գ, ե): Լազերի հզորության բարձրացման դեպքում (S10H) ձևավորվում են ավելի խոշորահատիկ, բայց քանակով պակաս SiC-ի հատիկներ (նկար 10 դ, ե):

Վիբրոսի միկրոկարծրության արժեքները չափվել են ԸԼՀ տպված նմուշների հղկուկների մակերեսի վրա, որում զուգակցված են եղել սիլիցիումի և սիլիցիումի կարբիդի տեղամասեր: Նմուշների միկրոկարծրությունը չափվել է ձևավորված SiC-ի հատիկի շրջանակներում: S2H, S3H, S9H եւ S10H նմուշների կարծրությունը կազմել է 1168, 933, 1091 և 1218 HV համապատասխանաբար՝ 0.2 կգ բեռի կիրառման դեպքում: S10H նմուշի կարծրության արժեքն ամենաբարձրն է գրանցվել: Ստացված արդյունքը բացատրվում է նմուշի խոշորահատիկ կառուցվածքով:

Նկար 11-ում պատկերված են ԸԼՀ մեթոդով կոմպակտավորված բարդ կառուցվածքով դետալներ: Որպես հումք են ծառայել սույն հետազոտության շրջանակներում մշակված սիլիցիումի կարբիդի հիմքով կոմպոզիտային փոշեխառնուրդները: Կիրառվել են օպտիմալացված տպագրական պարամետրեր:



Նկար 11: ԸԼՀ մեթոդով կոմպակտավորված բարդ կառուցվածքով նմուշներ:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Սիլիցիումի կարբիդի բիմոդալ կոմպոզիտային փոշեխառնուրդներից եռաչափ տպագրությամբ հնարավոր է ստանալ 87 % առավելագույն հարաբերական խտությամբ նմուշներ, իսկ մասնիկների միաչափ բաշխումը (մոնոմոդալ փոշեխառնուրդ) օպտիմալ չէ եռակալման համար:
2. Ընտրվել է լազերի հոսանքի արդյունավետ արժեք՝ 3000 մԱ (72 Վտ), որի դեպքում ապահովվում է բավարար էներգիա եռակալման համար, իսկ նմուշների առաձգական մոդուլը հասնում է առավելագույն արժեքին:
3. Մեկուսիչ հեքսագոնալ բորի նիտրիդի ավելացումը ելային փոշեխառնուրդին հանգեցնում է նմուշների էլեկտրական դիմադրության և ջերմահաղորդականության արժեքների նվազմանը (համապատասխանաբար 3 և 2 անգամ), իսկ եռակալման գործընթացում դասական հավելանյութ համարվող Y_2O_3 -ի ավելացումը բարելավում է նմուշների էլեկտրական և ջերմային հատկությունները՝ միաժամանակ իջեցնելով հարաբերական խտության արժեքը մինչև 77 %:
4. Որպես հավելանյութ բորի կարբիդի կիրառումը բերում է ռեակցիայի մեխանիզմի փոփոխության և խթանում է սիլիցիումի կարբիդացումը՝ մեծացնելով սիլիցիումի կարբիդի ելքը:
5. Նմուշների արագ տաքացումն արդյունավետ մեթոդ է սիլիցիում-ածխածին ռեակցիան հարուցելու և արագացնելու համար, իսկ ձևավորված սիլիցիումի կարբիդ/սիլիցիում կոմպոզիտի միկրոկառուցվածքն էապես կախված է տաքացման արագությունից: Տաքացման բարձր արագությունների դեպքում (2000 °C/րոպե) կարբիդացումն ավելի արագ է ընթանում, նմուշների ծակոտկենությունը նվազում է:
6. Ընտրողական լազերային հալեցման մեթոդով աշխատող տպիչի խցիկում հնարավոր է իրականացնել սիլիցիումի կարբիդի սինթեզ լազերային ճառագայթի էներգիայի հաշվին՝ 31-48 Վտ լազերի հզորության կիրառմամբ:

ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄՆԵՐ ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԹԵՄԱՅԻՆ

Գիտական հոդվածներ

1. Tsovinar Ghaltaghchyan, Hayk Khachatryan, Karine Asatryan, Viktorya Rstakyan, Marina Aghayan, Effect of additives on selective laser sintering of silicon carbide, Boletin de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio (2023), Volume 62, Issue 6, Pages 504-514, <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2023.01.001>.
2. Tsovinar Ghaltaghchyan, Thermal Management systems in Space: A Review, Electronic Journal of Natural Sciences (2024), Vol 42, Issue 1, Pages 9-15, <https://doi.org/10.55841/1728-791X-2024.1.42-9>.
3. Tsovinar Ghaltaghchyan, Khachik Nazaretyan, Viktorya Rstakyan, Marina Aghayan, Fast carbidization of silicon in additive manufactured Si-C-SiC composite, Results in Materials (2025), Volume 25, Pages 100653, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100653>.
4. Tsovinar Ghaltaghchyan, Khachik Nazaretyan, Ani Khachikyan, Marina Aghayan, Reactive Selective Laser Melting of Silicon Carbide, Materials Science in Additive Manufacturing (2026), Volume 5, Issue 1, doi: 10.36922/MSAM025340079.

Թեզիս

1. Tsovinar Ghaltaghchyan, Mikayel Torosyan, Miguel A. Rodriguez, Marina Aghayan, Additive Manufacturing of Silicon Carbide-Silicon Nitride-based Composites, 30th International Baltic Conference Materials Engineering and Modern Manufacturing 2023, October 19-20, Kaunas, Lithuania, Book of abstract, page 10.

GHALTAGHCHYAN TSOVINAR KOLYA

Synthesis of Silicon Carbide-Based Ceramic Composites for 3D Printing using Selective Laser Melting Technology

RESUME

In this work, silicon carbide-based composites with defined physicochemical properties were designed, prepared and evaluated as potential feedstock materials for selective laser melting (SLM) technology. The influence of three functional additives on the properties of the printed samples was systematically investigated. The results provide useful guidelines for the preparation and industrial application of silicon carbide-based ceramic composites. The procedures for producing the composites were studied, optimized, and validated. Multiple sets of SLM process parameters were developed to achieve densification of the feedstock, enabling the fabrication of functional ceramic parts. For the first time, reactive sintering was carried out directly in the printer chamber to synthesize silicon carbide from silicon and carbon by utilizing the thermal energy of the laser beam. This approach allowed the simultaneous implementation of two operations: synthesis and sintering in a single step. The experiments demonstrated the feasibility of synthesizing silicon carbide directly in the SLM chamber at laser powers of 31–48 W.

The post-treatment was carried out using high-speed temperature scanner technique. The influence of the heating rates (100 °C/min, 2000 °C/min) on the silicon – carbon interaction and sintering of the composites was studied. It was determined that increased heating rates led to enhanced reaction intensity and improved sinterability.

To summarize, a complete production chain was optimized and established, covering feedstock preparation, 3D printing, and post-processing. Resource efficiency was improved by minimizing raw material consumption, energy usage and processing time, thereby enhancing productivity and reducing industrial waste.

The experimental findings validated the capability of producing dense samples, achieving a peak relative density of up to 87 % with composite powders featuring bimodal silicon carbide distributions, while monomodal powders demonstrated lower efficacy for sintering. An effective laser power of 72 W was identified, under which the samples achieved their maximum elastic modulus. The addition of hexagonal boron nitride reduced electrical resistivity threefold and thermal conductivity twofold, whereas the conventional sintering additive Y_2O_3 (3–5 wt.%) lowered the relative density to 77 %. Replacing boron nitride with yttrium oxide improved both the electrical and thermal properties of the samples. The addition of boron carbide altered the reaction mechanism and promoted carbidization, thereby increasing the overall silicon carbide yield. Fast heating at 2000

°C/min effectively accelerated the silicon-carbon reaction, enhancing carbidization and reducing porosity.

Altogether, this study validates the potential of the SLM method for both the synthesis and manufacturing of functional silicon carbide-based composites and provides practical parameters and insights for their industrial development.

КАЛТАХЧЯН ЦОВИНАР КОЛЯЕВНА

Синтез керамических композитов на основе карбида кремния для 3D-печати с использованием технологии селективного лазерного плавления

РЕЗЮМЕ

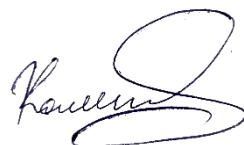
В данной работе были разработаны, изготовлены и испытаны композиты на основе карбида кремния с четко заданными физико-химическими свойствами в качестве потенциального сырья для производства методом селективного лазерного плавления. Было изучено влияние трёх функциональных добавок на структурные и механические характеристики напечатанных образцов. Полученные результаты могут служить руководством для подготовки и промышленного применения композитов на основе карбида кремния и других керамических материалов. Процедуры получения композитов были исследованы, оптимизированы и подтверждены. Разработаны несколько наборов параметров печати для процесса селективного лазерного плавления, обеспечивающих уплотнение полученного сырья, которые могут успешно применяться для производства функциональных керамических деталей.

Впервые было осуществлено реактивное спекание непосредственно в камере принтера для синтеза карбида кремния из кремния и углерода, с использованием тепловой энергии лазерного луча. Это позволило одновременно реализовать два процесса - синтез исходного материала и его уплотнение в одном этапе. Кроме того, метод высокоскоростного температурного сканирования был протестирован в качестве послепечатной термообработки для улучшения свойств образцов, подтвердив свою эффективность в ускорении процесса карбидизации и снижении пористости.

Была разработана и введена в эксплуатацию производственная цепочка, включающая подготовку сырья, 3D-печать и послепечатную обработку, при этом все стадии были тщательно оптимизированы. Управление ресурсами было улучшено за счет минимизации расхода сырья, потребления энергии и времени обработки, что обеспечило эффективность для каждой детали и сокращение производственных отходов.

Экспериментальные результаты демонстрируют возможность печати образцов с максимальной относительной плотностью до 87 % с использованием порошковых смесей, приготовленных из бимодальных порошков карбида кремния, тогда как одномодальные порошки обладают более низкой способностью к спеканию. Определена эффективная мощность лазера - 72 Вт, при которой модуль упругости образцов достигает максимального значения. Добавление гексагонального нитрида бора привело к трёхкратному снижению электрического сопротивления образцов и двукратному снижению теплопроводности, тогда как традиционная добавка для спекания Y_2O_3 (3-5 мас. %) снизила относительную плотность до 77 %. Замена нитрида бора на оксид иттрия улучшила электрические и тепловые свойства образцов. Быстрый нагрев со скоростью 2000 °С/мин эффективно ускорил реакцию кремний-углерод, способствуя увеличению степени карбидизации и снижению пористости. Кроме того, эксперименты подтвердили возможность синтеза карбида кремния непосредственно в камере принтера селективного лазерного плавления при мощности лазера 31–48 Вт. Помимо этого, установлено, что добавление карбида бора изменяет механизм реакции и способствует карбидизации, увеличивая общий выход карбида кремния.

В целом, исследование подтверждает потенциал метода селективного лазерного плавления для синтеза и производства функциональных композитов на основе карбида кремния и предоставляет практические параметры и рекомендации для их промышленного внедрения.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kovalenko', written in a cursive style.