

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

თორნიკე მესტერიშვილი

კარბიდული ფუძის მქონე კომპოზიციური მასალების მიღება და კვლევა

სადოქტორო პროგრამა : საინჟინრო ფიზიკა

შიფრი:

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკურ ცენტრში და შ.პ.ს „საქართველოს მაღალი ტექნოლოგიების ეროვნულ ცენტრში“.

ხელმძღვანელი: დოქტორი, პროფესორი ნიკოლოზ ჯალაბაძე

რეცენზენტები:

ფიზ.მათ,მეცნ, დოქტორი, პროფესორი თეიმურაზ ძიგრაშვილი
დოქტორი როინ ჭედია

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის
სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,
კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა

კომპოზიციური მასალების შექმნის ისტორია უხსოვარი დროით თარიღდება. თანამედროვე მაღალტექნოლოგიურ კომპოზიციური მასალების წინამორბედები იყვნენ თიხის, თივის, ქვის, ხის და ლითონის სინთეზით მიღებული პრიმიტიული იარაღები და სამეურნეო ინვენტარი. მათი შექმნის მთავარი მიზანიც თვისებების შერწყმა - სინერგიზმი იყო, რასაც კარგად ართმევდნენ თავს თივით განმტკიცებული თიხის სახლების, ბუნებრივი საწამლავებით დაფარული საომარი და სანადირო იარაღების თუ მიწის დასამუშავებელი იარაღის შექმნით.

კომპოზიციური მასალების გამოყენება მუდამ იზრდებოდა და იკავებდა დიდ ადგილს ტექნიკის და მეცნიერების მრავალ სფეროში. კომპოზიტების მიღების ტექნოლოგიები ისე განვითარდა, რომ ისინი მოწინავე და მაღალ ტექნოლოგიებს მიეკუთვნებიან, რომლებსაც ძირითადად განვითარებული ქვეყნები ამუშავებენ და ნერგავენ. კომპოზიტების მნიშვნელობაზე ის ფაქტიც მეტყველებს, რომ ადამიანი თავისი არსებობის მანძილზე იყენებს და ავითარებს მათ. მათ განსაკუთრებულობაზე ისაც მეტყველებს, რომ თანამედროვე ცხოვრებაში ვერც ერთი ტექნოლოგიური თუ სამეცნიერო ინოვაცია მათი გვერდის ავლით არ იქმნება.

მეოცე საუკუნის მეორე ნახევარში ბირთვული ფიზიკის, ინფორმატიკისა და ელექტრონიკის განვითარებამ განავითარა ტექნიკის ისეთი დარგები, როგორებიცაა ბირთვული ტექნიკა, მანქანათმშენებლობა, ზებგერითი კოსმოსური აპარატების მშენებლობა და სხვა. ასეთი სფეროების განვითარებამ განაპირობა მოთხოვნილება ისეთ მასალებზე, რომლებსაც ხასიათდებიან სხვა მასალებისგან (კერამიკული, მეტალური, პოლიმერული) კომბინირებული მექანიკური, თბო-ფიზიკური, ქიმიური, ტექნიკური და სხვა ფუნქციური მახასიათებლებით. ვინაიდან ზემოაღნიშნული თვისებები ძირითადად კერამიკულ მასალებს

ახასიათებთ, სწორედ ისინი გამოიყენება კომპოზიტების შესაქმნელად აღნიშნული სფეროებისთვის. ასეთ კომპოზიტთა რიგს მიეკუთვნებიან კარბიდული კომპოზიტები, რომელთა დამუშავება წარმოადგენს ჩვენი სამუშაოს ძირითად არეალს.

მეცნიერული სიახლე

კერამიკული კომპოზიტის წარმოების ტექნოლოგიაში გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება კომპონენტების შერევის ეტაპს. ეს პროცესი გართულებულია ულტრადისპერსიული ფხვნილების შემთხვევაში, გამოწვეული იმით, რომ მიკრო და ნანო სტრუქტურული ფხვნილები ხასიათდებიან დიდი ზედაპირით და შესაბამისად მაღალი ზედაპირული ენერგიით, რაც ხელს უწყობს აგლომერაციის პროცესს .

ნანოფხვნილების დისპერგირების და შემდგომ მათი შერევის სტანდარტული მეთოდი არ არსებობს, ეს ჯერ კიდევ კვლევის საგანია. ზოგ შემთხვევაში ნანოფხვნილების შერევისას, მიმდინარეობს ნანოფხვნილის დისპერგირება სითხეში მაღალენერგეტიკულ შემრევში, რისთვისაც გამოიყენება ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები (detergent). დისპერგირებული ფხვნილების შერევა მიმდინარეობს იგივე დანადგარში სითხის აორთქლებასთან ერთად.

ჩვენს მიერ წარმოებული ბორის კარბიდის ფხვნილის კომპონენტები - ბორი და ნახშირბადი შევურიეთ სპირტის არეში, ფრთებიან შემრევში 2 საათის განმავლობაში. სპირტის რაოდენობა შერჩეული იქნა ისე, რომ მიგვეღო გელის კონსისტენცია. შერეული კაზმი გავაშრეთ, თუმცა მინიმალური ტენიანობის შენარჩუნებამდე, რომ არ მომხდარიყო მისგან დასამზადებელი ბრიკეტების დაშლა. ბრიკეტები დავამზადეთ გრაფიტის წნებ-ინსტრუმენტების საშუალებით ხელის ძალით. ბრიკეტები ჩავალაგეთ გრაფიტის ტიგელში და გავაშრეთ $110\pm 10^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე 16 სთ-ით განმავლობაში. ტიგელი ბრიკეტებით მოვათავსეთ ღუმელში სინთეზისათვის.

B₄C-ის ZrB₂-ით ლეგირებისთვის გამოყენებულ იქნა პლანეტარული წისქვილი ZrO₂-ის ბურთულებით. B₄C და ZrO₂-ის სისალეებს შორის დიდი განსხვავების შედეგად Hv(B₄C)=28-40 გპა, Hv(ZrO₂)=13-1500 გპა [6], წისქვილში ბორის კარბიდის ფხვნილის და ZrO₂-ის ბურთულების მექანიკური ურთიერთქმედების შედეგად, ადგილი უნდა ჰქონოდა ბურთულების ზედაპირიდან მცირე ზომის ნაწილაკების ჩამოთლას რომლებიც თანაბრად განაწილდებოდა ნარევეში [83].

შემდგომში, რეაქციული კონსოლიდაციის ეტაპზე - *in situ* - კომპონენტებს შორის მყარფაზა ურთიერთქმედებისას უნდა წარმოქმნილიყო კომპოზიციური მასალა B₄C-ZrB₂.

სწორედ ზემოაღნიშნული მეთოდია კვლევის ერთ-ერთ სიახლე - პლანეტარულ წისქვილში მიღებული მაკროჰომოგენური კომპოზიციური ფხვნილი, ვინაიდან აღნიშნული წისქვილის სტანდარტული დანიშნულება, დასაფქვავი ფხვნილის მარცვლის ზომის შემცირებაა და არა დამფქვი მედიის მასალაში შეყვანა.

ნაშრომის ერთ-ერთ სიახლეს, მიღებული ნიმუშების თერმული დამუშავება წარმოადგენს, რაც განაპირობებს დამაბულობების მოხსნას, ეს უკანასკნელი კი წინაპირობაა გაუმჯობესებული დამუშავებადობის და მექანიკური თვისებების მქონე მასალის მისაღებად. შესწავლილია თერმულად დამუშავების გავლენა ¹⁰B₄C-ის მექანიკურ დამუშავებადობაზე და მის ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე.

თერმულად დამუშავების შედეგად ადგილი არ ჰქონია ნიმუშების ზომაში ცვლილებას. ასევე არ შეიცვალა ბორის კარბიდის მარცვლის ზომა - კერამიკის ერთ-ერთი ფუნქციური მახასიათებელი. თერმულად დამუშავების შედეგად გაუმჯობესდა მასალის მექანიკური დამუშავებადობა, სისალე და დრეკადობის მოდული. შემცირდა ამონატეხების ზომა და რაოდენობა. მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე გაიზარდა 33%-ით, ბზარმედევობა კი 25-40%-ით.

ნაშრომის კიდევ ერთ სიახლეს წარმოადგენს SPS დანადგარით მიღებული რთული კარბიდული ნაერთები: $Al_8B_4C_7$, $Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$ და Al_4SiC_4 . პირველადაა სინთეზირებული ტიტან, ალუმინის და სილიციუმის რთული კარბიდი - $(Ti,Al,Si)C$. მიღებულია ახალი კომპოზიციური მასალები: $B_4C-SiC-TiB_2-Al_8B_4C_7$, $TiC-SiC-TiB_2-Al_4SiC_4$, $TiC-SiC-TiB_2-Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$ და $(Ti,Al,Si)C-SiC-TiB_2$

სამუშაოს მიზანი

კვლევის მიზანი, კარბიდული ფუძის მქონე ახალი კომპოზიციური ფხვნილების და ნაკეთობების მიღებაა, რომლებსაც ექნებათ გაუმჯობესებული მახასიათებლები. ახალი მასალების მიღება, წინაპირობაა მათი ფართო გამოყენებისა აბრაზიულ-კონსტრუქციული დანიშნულებით საჭრელ და სახეხ ქვებში, სისალემზომ ინდენტორებში, ელიტარულ ჯავშანში, ატომურ ენერგეტიკაში, ასევე იმდენად განსხვავებულ სფეროებში, როგორებიცაა აგრონომია, კომპიუტერული ტექნოლოგია, მედიცინა, ელექტრონიკა, კოსმონავტიკა და სხვა.

უამრავი თეორიული თუ პრაქტიკული სამუშაოა ჩატარებული ბორის კარბიდის, სილიციუმის კარბიდის, ტიტანის დიბორიდის და სხვა მასალებით მათ ლეგირებაზე, ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გასაუმჯობესებლად. ბორის კარბიდის უნიკალური თვისებების სრულად გამოყენებას, როგორებიცაა ბირთვული (სწრაფი ნეიტრონების შთანთქმის მაღალი კვეთი ^{10}B იზოტოპისთვის, ხოლო ძალიან დაბალი კვეთი ^{11}B იზოტოპისთვის) და ფიზიკურ-მექანიკური (დაბალი ხვედრითი წონა მოწინავე კერამიკული მასალებისთვის, ძალიან მაღალი სისალე) ზღუდავს ისეთი უარყოფითი თვისებები, როგორებიცაა დაბალი დარტყმითი სიბლანტე და ბზარმდეგობა.

აღნიშნული კვლევების შედეგების პრაქტიკული გამოყენება და ახალი მასალების წარმოებაში დანერგვა მცირეა. ის ჯერ კიდევ რჩება მეცნი-

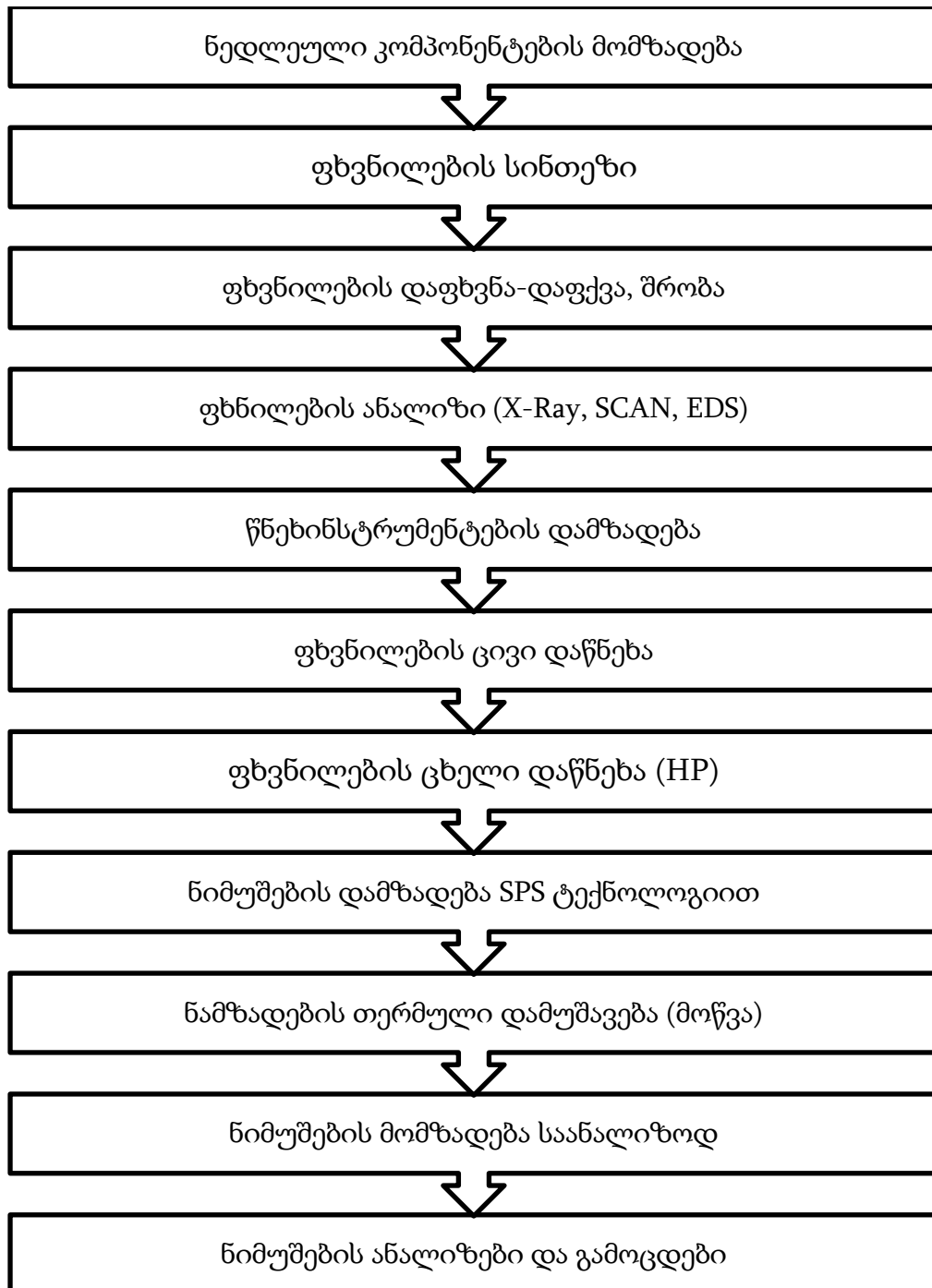
ერთათვის „ცუდად შესწავლილ“ მასალად და მნიშვნელოვან კვლევის ობიექტად.

სწორედ კარბიდული კომპოზიციებია ჩვენი კვლევის ობიექტი. ნაშრომი ეძღვნება იმ კვლევებს, რომლებიც ჩატარებულია ბორის კარბიდის თვისებების გასაუმჯობესებლად. ჩვენი კვლევის მიზანი იყო ფხვნილების ცხლად წნეხვის მეთოდით მიგველო კერამიკული კომპოზიციური მასალები ბორის კარბიდის ბაზაზე, რომელთაც ექნებოდათ გაუმჯობესებული ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებები. კვლევისთვის შევარჩიეთ როგორც ბორიდებით და კარბიდებით განმტკიცებული (ზოგ შემთხვევაში ლეგირებული) კარგად ცნობილი კომპოზიტები (B_4C-TiB_2 , B_4C-SiC), ისე ლეგირებული რთული კარბიდები.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები

ჩვენი კვლევის ობიექტია კომპოზიტები კარბიდულ ფუძეზე. კვლევაში გამოყენებულია როგორც ჩვენი მიღებული, ასევე შეძენილი კომპონენტები. ჩვენს მიერ იქნა წარმოებული ბორის კარბიდის ფხვნილები, რისთვისაც ნედლეულად შევარჩიეთ ამორფული ბორი და ტექნიკური ნახშირბადი. სურ. 1-ზე ნაჩვენებია იმ ექსპერიმენტული სამუშაოების თანმიმდევრობა, რომელიც გამოყენებულ იქნა კვლევაში. აღნიშნულ თავში მოკლედ აღწერილია კვლევის მეთოდები.

კომპოზიტებში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება ფაზათა შორის გამყოფ საზღვარს. მისი შემადგენლობა საწყისი ფაზების მარცვლების ზედაპირული ფენების ურთიერთქმედებაზეა დამოკიდებული. ეს უკანასკნელი კი თავის მხრივ დამოკიდებულია ნაწილაკების ზედაპირულ ენერგიაზე. ზედაპირული ენერგია მნიშვნელოვანია შეცხოების პროცესის წარმართვისათვის. ნაწილაკის ზედაპირული ენერგია დამოკიდებულია მასალის რაობაზე, ფხვნილის დისპერსიულობის ხარისხზე და დაფქვიდან გასულ დროზე.



სურ. 1. ტექნოლოგიური ეტაპების სქემა

ცხრილი 1-ში მოყვანილია ფხვნილების შერევის მეთოდები და კომპოზიტების შემადგენლობა.

ცხრილი 1. კომპოზიტების შემადგენლობა

#	მასალის ჯგუფი	მასალის აღნიშვნა	დაფქვა-შერევის მეთოდი		ბურთ. დიამეტ. D, მმ	დაფქვა-შერევის დრო τ, წთ
1	B ₄ C	BC-I	-	-	-	-
2		BC-HP	-	-	-	-
3		BC-HD	-	-	-	-
4	B ₄ C-TiB ₂	BCT-L	მექან.	სველი	-	60
5		BCT-H	მექან.	სველი	-	60
6	B ₄ C-ZrB ₂	BCZ-TD-1-60	ტურბ.	მშრალი	1	60
7		BCZ-TW-1-180	„-“	სველი	1	180
8		BCZ-PD-1-3	პლან.	მშრალი	1	3
9		BCZ-PD-5-3	„-“	„-“	5	3
10		BCZ-PW-5-3	„-“	სველი	5	3
11		BCZ-PW-1-3.5	„-“	„-“	1	3.5
12		BCZ-PW-1-5	„-“	„-“	1	5
13		BCZ-PW-1-7	„-“	„-“	1	7
14		BCZCl-HDU1	ულტრაბგერით		-	60
15		BCZCl-SPS1		„-“	-	
16		BCZCl-HP1		„-“	-	
17		BCZCl-HP2		„-“	-	
18		BCZCl-SPS3		„-“	-	
19	BCZCl-HP3		„-“	-		
20		BCZClHP7				

ანალიზი ჩატარდათ როგორც ნედლეულ ფხვნილებს (შემავალი კონტროლი), ასევე შერევის შედეგად მიღებულ კომპოზიციურ ფხვნილებს. X-Ray ანალიზის უმთავრეს ამოცანას წარმოადგენს საკვლევი ნიმუშის კრისტალური ფაზების ბუნების განსაზღვრა. ამ ანალიზის საფუძველს წარმოადგენს შემდეგი: ყველა ქიმიური ნაერთი ხასიათდება სპეციფიკური დიფრაქტოგამით და შესაბამისად განსაზღვრული ხაზების ნაკრებით და მათი ინტენსიურობით.

ფაზური ანალიზის შემდეგ ჩავატარეთ ფხვნილების მორფოლოგიური კვლევა და ელემენტთა მასური შემცველობის ანალიზი. ნიმუშების ელემენტური შემადგენლობა და მათი განაწილება ნარევეებში შესწავლილ იქნა მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპის „JSM-6510LV“ (ფირმა „JEOL“, იაპონია) საშუალებით.

სინთეზის პროცესი პარალელურად მიდიოდა ორ დანადგარზე. პირველი: ინდუქციური გახურების ღუმელი და მეორე: SPS დანადგარი. სინთეზის პარამეტრები განსხვავდებოდა ერთმანეთისგან. შეცხოების პარამეტრების ვარიაციების (დრო, ტემპერატურა) მიზანი იყო, მათი გავლენა დისპერსიულობაზე და ფაზის ჩამოყალიბებაზე. შეცხოვა მიმდინარეობდა გრაფიტის ტიგელში, ვაკუუმში.

კერამიკული მასალების ცხელი დაწნეხის ტექნოლოგიაში, ძირითადად გამოიყენება გრაფიტის წნეხფორმა, იშვიათ შემთხვევებში SiC-ს ან ჟანგულის კერამიკას. გრაფიტის გამოყენება განპირობებულია მისი უნიკალური თვისებების გამო. აღსანიშნავია მისი მაღალი დნობის ტემპერატურა და ტემპერატურის ზრდის შემთხვევაში კუმშვაზე სიმტკიცის ზრდა. თითქმის ორჯელ იზრდება მისი ეს თვისება 2200°C ტემპერატურაზე. გრაფიტი ხასიათდება მარკების სიმრავლით, რომლებიც განსხვავდებიან ერთმანეთისგან მარცვლის ზომებით, სიმკვრივით, სისუფთავის და სხვ. არსებობს სხვადასხვა წარმოების გრაფიტები, მათ შორის რუსული წარმოების, რომელთაგან წნეხფორმებად ძირითადად გამოიყენება მაღალი სიმტკიცის და სიმკვრივის გრაფიტები. ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა

გრაფიტი APB, რომლის სიმკვრივე 1,65 გ/სმ³-ია, 125 და 155 მმ დიამეტრის მქონე ძელები ფორმით და 240 მმ სიმაღლით. ძელებისგან დამზადდა სხვადასხვა ფორმის და ზომის წნებფორმები. Ø 70*125*70 მმ ნიმუშებისთვის ღუნვაზე გამოსაცდელად. ხოლო მრავალადგილიანი წნებფორმები თვითოეულის დიამეტრით 13მმ ნიმუშებისთვის კუმშვაზე გამოსაცდელად. გამოყენებული პუანსონები ხასიათდებოდა შესაბამისი დიამეტრით და 40 მმ სიმაღლეზე გაჩარხულობით.

კერამიკული ფხვნილების ცხელ დაწნებამდე ხშირად მიმართავენ წინასწარ ცივ დაწნებას. ეს მეთოდი ხელს უწყობს მაღალი სიმკვრივის კაზმის მიღებას, რომელიც შემდეგ უკვე იწნება მოკლე დროში და განაპირობებს მაღალი სიმკვრივის და წვრილ მარცვლოვანი სტრუქტურის მქონე კერამიკის მიღებას. ფხვნილები წინასწარ გავამკვრივეთ ვიბრაციულ დანადგარზე და დავწნებთ ცივად ≈10 მპა წნევის ქვეშ, ჰიდრავლიკურ წნებზე - MC-100.

ფხვნილების ცხელი დაწნება კერამიკული ნამზადების მიღების ერთ-ერთი მოწინავე მეთოდია. ცხელ დაწნებას მიმართავენ განსაკუთრებით ისეთი მასალების მისაღებად, რომელთა შეცხოვრით მიღება შეუძლებელია. ასეთებია კარბიდები, ბორიდები და სხვა. ცხელი დაწნების მეთოდის უპირატესობა წნევის გარეშე ნიმუშების მიღების მეთოდებთან არის მიღებული ნიმუშების მაღალი სიმკვრივე, პროცესის მცირე ხანგრძლივობა, სინთეზის შედარებით დაბალი ტემპერატურა. ნაკლოვანებებია ტექნოლოგიური სიძვირე და რთული ფორმის ნიმუშის მიღების შეუძლებლობა.

ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებულ იქნა ორი ტიპის ცხელი დაწნება. პირველ შემთხვევაში ფხვნილის გახურება ხდება გრაფიტის გამახურებლის საშუალებით, ე.წ. „ტრადიციული“ ცხელი დაწნების მეთოდით. მეორე შემთხვევაში ფხვნილში გაივლის იმპულსური მუდმივი დენი (დაბალი ძაბვა, მაღალი დენის ძალა), რომელიც იწვევს ფხვნილის გახურებას.

აღნიშნული მეთოდის (SPS-Spark Plazma Sintering) უპირატესობაა კიდევ უფრო მოკლე დროში დაწნეხის პროცესის წარმართვა (1-5 წთ).

შემდეგი ეტაპია მიღებული ნიმუშების თერმული დამუშავება, რაც განაპირობებს დაძაბულობების მოხსნას, ეს უკანასკნელი კი წინაპირობაა გაუმჯობესებული დამუშავებადობის და მექანიკური თვისებების მქონე მასალის მისაღებად.

ჩვენს მიერ მიღებული ნიმუშების ერთ ნაწილს დაძაბულობის მოსახსნელად ჩაუტარდა თერმული დამუშავება ვაკუუმურ ღუმელში შერჩეული რეჟიმით ($T_{\text{დასუს}}-1800^{\circ}\text{C}$, $P-10^{-2}$ პა). თერმული დამუშავების ტემპერატურა ავიღეთ $200-300^{\circ}\text{C}$ -ით ნაკლები წნეხვის ტემპერატურაზე, რათა არ მომხდარიყო დაწნეხვის (შეცხობის) ტემპერატურის სიახლოვეს მარცვლის ზრდა (რეკრისტალიზაცია). გამოწვა გრძელდებოდა 2,5 საათი.

კერამიკული მასალების წარმოებაში დიდი მნიშვნელობა აქვს გამოსაცდელი ნიმუშების მომზადებას. განსაკუთრებით რთულია მაღალი სისალის მქონე მასალების (კარბიდები, ბორიდები) მომზადება, რომლებსაც აუცილებლად სჭირდება ალმასით დამუშავება.

ნიმუშები დამუშავებული იქნა ჩარხებზე 3A110 (სახეხი ჩარხსამშენებლო ქარხანა, თბილისი), სადაც გამოყენებულ იყო სინთეტიკური ალმასის ქარგოლი „1A1 250×20×5×76 AC6 125/100 B2-01 100%“, შემდეგ ეტაპზე დაიჭრა მჭრელ ჩარხებზე (მოდელი 3B33DD) პარალელეპიპედებად, მჭრელ ინსტრუმენტად გამოვიყენეთ სინთეტიკური ალმასის ქარგოლი „1A1R 150×0,6×5×32 AC32 200/160 M2-01 100%“. აღნიშნული ნიმუშები მზად იყო სისალის და დრეკადობის მოდულის გასაზომად.

კვლევის ძირითადი შედეგები და შედეგების გამოყენების სფერო

სამუშაოში დამუშავებულია რამოდენიმე ჯგუფი კომპოზიტებისა, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდებოდნენ შემადგენლობით და შესაბამისად თვისებები და მათი მიღების პროცესის მახასიათებლებით.

საწყის ეტაპზე (წნეხფხვნილების მომზადება) დადგინდა დაფქვის ოპტიმალური რეჟიმი სასურველი ზომის და შემადგენლობის ფხვნილების მისაღებად. შესწავლილ იქნა თერმულად დამუშავების გავლენა კომპოზიტებზე. გამოყენებული იქნა ახალი მეთოდები, ხელსაწყო აპარატები ფხვნილების შესარევად და ნიმუშების მისაღებად.

პირველადაა სინთეზირებული ტიტან, ალუმინის და სილიციუმის რთული კარბიდი - $(Ti,Al,Si)C$. მიღებულია ახალი კომპოზიციური მასალები: $B_4C-SiC-TiB_2-Al_8B_4C_7$, $TiC-SiC-TiB_2-Al_4SiC_4$, $TiC-SiC-TiB_2-Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$ და $(Ti,Al,Si)C-SiC-TiB_2$. დამუშავებულ იქნა უნიკალური ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებების მქონე B_4C-TiB_2 , B_4C-ZrB_2 და $B_4C-TiB_2-ZrB_2$ კომპოზიტები. შესწავლილი იქნა მიღებული მასალების თვისებები და განსაზღვრული იქნა მათი გამოყენების შემდეგი სფეროები: ატომური ტექნიკა (მასალები ბირთვული რეაქტორების აქტიურ ზონაში სამუშაოდ, კონსტრუქციული კერამიკა ნეიტრონების შთანთქმისა და არეკვლისათვის, მშრალი ხახუნის საკისრები ბირთვულ რეაქტორებში (ტუმბოები, ხახუნის კვანძები) სამუშაოდ), საბრძოლო ტექნიკის წარმოება (ინდივიდუალური და მსუბუქი ტექნიკის ჯავშნანი), მანქანათმშენებლობა (ინდენტორი ძნელდნობადი მასალის სისალის გასაზომად მაღალ ტემპერატურებზე), აბრაზიული მასალების წარმოება (სახეხი ფხვნილი, სახეხი ქვები და ინსტრუმენტები).

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა

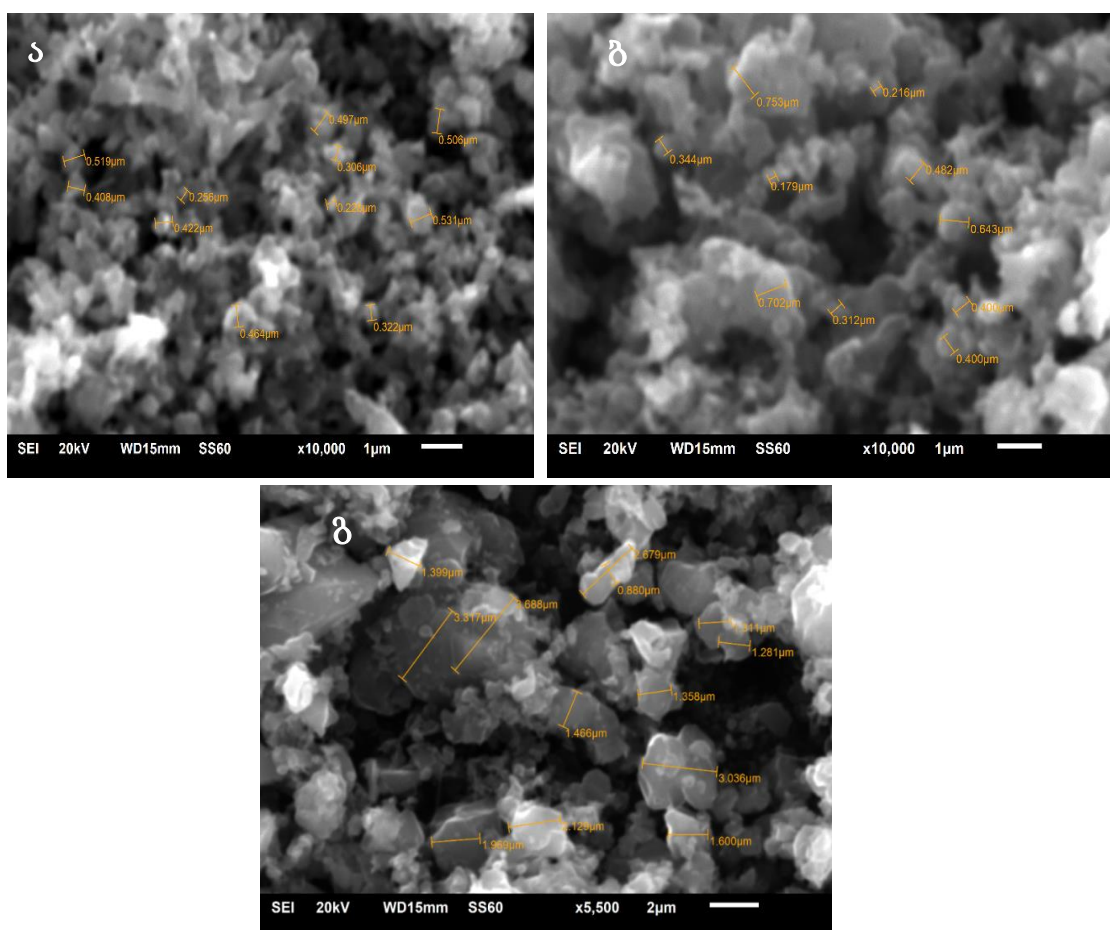
ნაშრომი შედგება შესავლის, ორი თავისა და დასკვნისგან, წარმოდგენილია 101 ნაბეჭდ გვერდზე, შეიცავს 8 ცხრილს, 40 სურათს და ერთვის ციტირებული ლიტერატურის ნუსხა (90 დასახელება).

ნაშრომის ძირითადი შედეგები

წარმოდგენილია სხვადასხვა ტემპერატურაზე სინთეზირებული ბორის კარბიდის ფხვნილის მასკანირებელი მიკროსკოპის ანალიზის შედეგები.

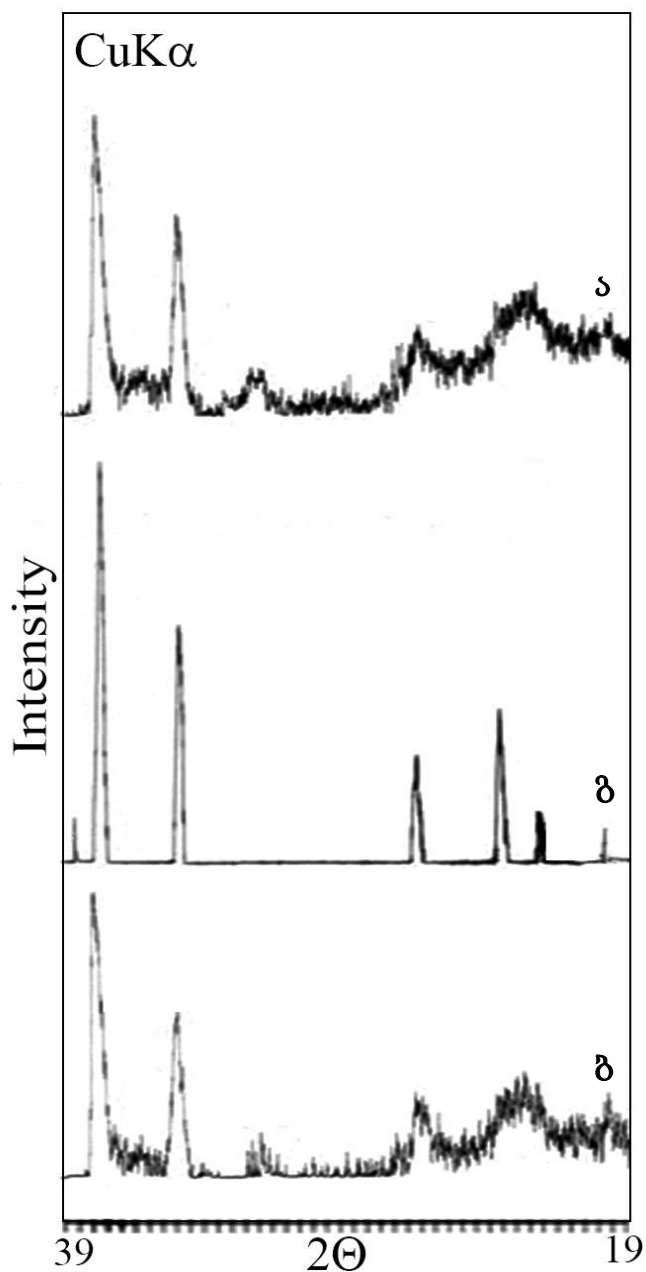
როგორც სურათებზე ჩანს, 1700-1750°C-ზე მიღებულ ფხვნილებს ერთნაირი მარცვლის ზომა გააჩნიათ, საშუალოდ 0,1-0,5 მკმ (სურ.2 ა და ბ).

1800°C-ზე მიღებული ნიმუშები გამოირჩევა შედარებით მსხვილმარცვლოვნებით, საშუალოდ 1-2 მკმ (სურ.2 გ).



სურ. 2. ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფიები ბორის კარბიდისა სინთეზირებული: ა- 1700°C, ბ-1750°C და გ- 1800°C

აღნიშნულ ფხვნილებს ჩაუტარდათ რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი. შედეგები წარმოდგენილია სურ.3-ზე. როგორც რენტგენოგრამებიდან ჩანს, სამივე ტემპერატურაზე სინთეზირებულ ფხვნილში არის ბორის კარბიდის პიკები. თუმცა განსხვავებულია მათი ინტენსივობა (პიკის სიმაღლე) და გამოკვეთილობა (სიგანე).



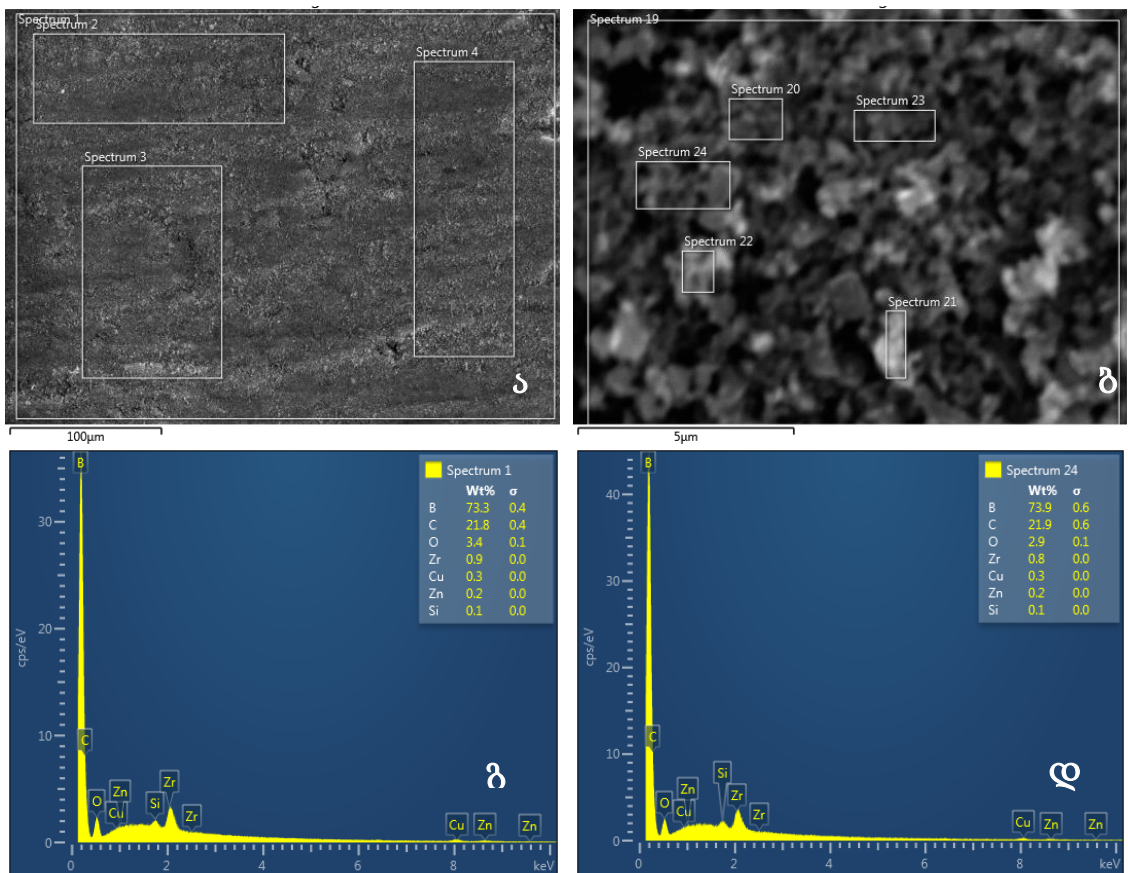
სურ. 3. ბორის კარბიდის ფხვნილის რენტგენული დიფრაქტოგრამები:
 ა-არასრულყოფილი; ბ- შედარებით სრულყოფილი და გ-სრულყოფილი

1700 და 1750°C-ზე მიღებულ რენტდენოგრამის სურათში ბორის კარბიდს ახასიათებს განიერი პიკები, ე.წ. „გალოები“. ეს უკანასკნელი მეტყველებს ბორის კარბიდის ფაზის არასრულ ჩამოყალიბებაზე.

1800°C-ზე სინთეზირებულ ფხვნილში გამოკვეთილია ბორის კარბიდის ყველა პიკი, მაღალი ინტენსივობით და მინიმალური სიგანით, რაც ფაზის სრულყოფილად ჩამოყალიბებაზე მეტყველებს.

ანალიზის შედეგების საფუძველზე დავადგინეთ, რომ ბორის კარბიდის სინთეზის ოპტიმალურ ტემპერატურად შეიძლება ჩაითვალოს 1800°C.

კომპოზიციური ფხვნილების მორფოლოგიური კვლევის ძირითადი მიზანი იყო მათი ჰომოგენურობის ხარისხის დადგენა. სურათზე 4 წარმოდგენილია სხვადასხვა გადიდებაზე მრსა-ის შედეგები BCZCl-HDU1 კომპოზიტისთვის. ცხრილ 2-ში ასახულია მრსა-ის შედეგები კომპოზიტის სხვადასხვა არეებში.

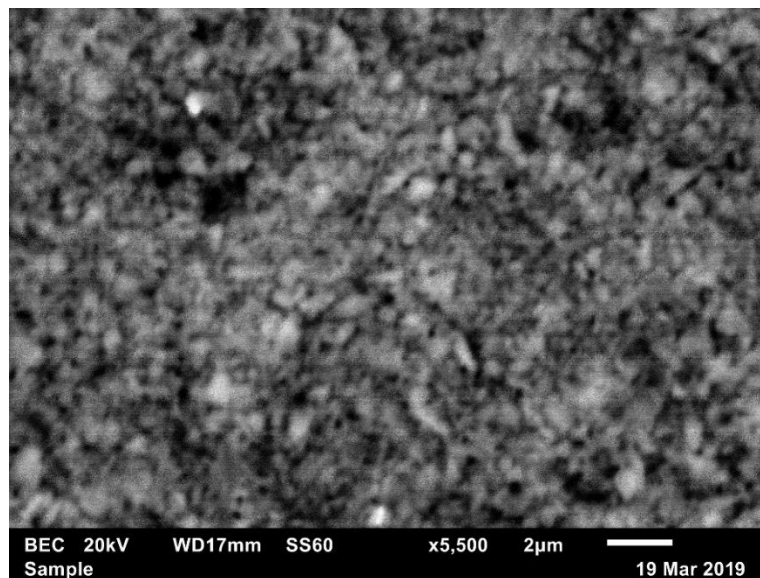


სურ. 4. მრსა-ის შედეგები BCZCl-HDU1 კომპოზიტისთვის

ცხრილი 2. მრსა-ის შედეგები კომპოზიტის სხვადასხვა არეებში

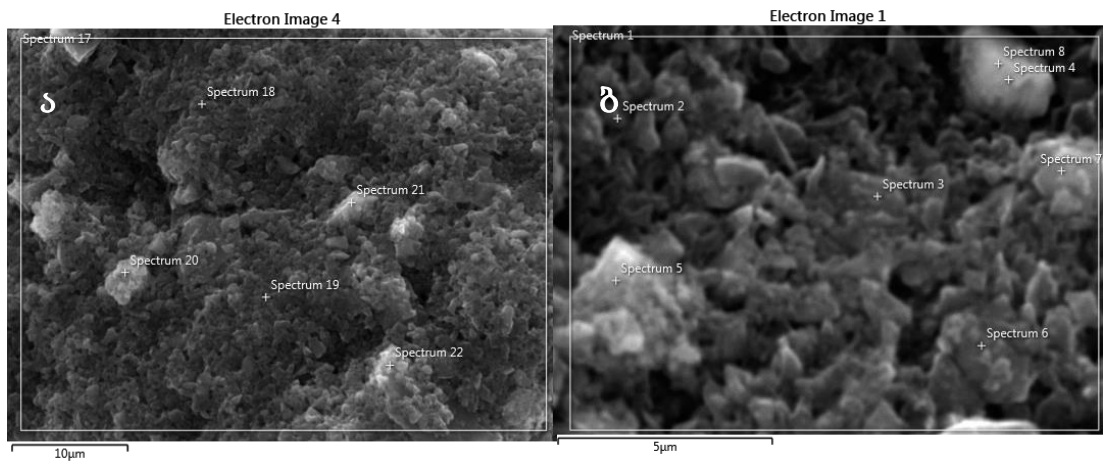
Spect. Label	Spectrum									
	1	2	3	4	24	19	20	21	22	23
B	73.3	73.5	73.1	73.2	73.8	73.0	75.1	74.9	69.1	68.9
C	21.8	21.7	22.0	22.1	21.9	22.7	20.7	21.1	26.7	26.5
O	3.43	3.19	3.29	3.19	2.89	2.87	2.81	2.61	2.77	3.08
Si	0.10	0.12	0.11	0.10	0.11	0.08	0.11	0.08	0.09	0.10
Cu	0.33	0.27	0.32	0.31	0.27	0.25	0.27	0.31	0.24	0.27
Zn	0.17	0.21	0.21	0.23	0.19	0.19	0.21	0.21	0.20	0.20
Zr	0.93	0.93	0.90	0.91	0.81	0.91	0.84	0.83	0.88	0.86
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

როგორც ცხრილიდან ჩანს ულტრაბგერის გამოყენება იძლევა ბორის კარბიდის და ცირკონიუმის ორჟანგის იდეალურ ნარევს. ცირკონიუმის ორჟანგი თანაბარი რაოდენობით შედის როგორც დიდ მოცულობაში (0,1 მმ² ფართის შესაბამისი მოცულობა), ისე ძალიან მცირეში (1 მკმ²). ეს უკანასკნელი მეტყველებს იმაზე, რომ ყოველ 1 მკმ³ მოცულობაში 1% მალეგირებელი ფაზა ზომით ნანომეტრის რიგისაა, რაც იდეალური შედეგია. ამას ადასტურებს BEC რეჟიმით გადაღებული ფოტო (სურ.5), სადაც მინიმალური ზომის გამო არ შეინიშნება ZrO₂-ის ფაზა.



სურ. 5. BEC რეჟიმით გადაღებული ფოტო

სურათ 6 და ცხრილში 3 წარმოდგენილია მრსა-ის შედეგები TD-1-60 ნარევისთვის.



სურ. 6. TD-1-60 ნარევისთვის ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფიები სხვადასხვა გადიდებაზე მრსა-ის ადგილების ჩვენებით.

BCZCl-HDU1 კომპოზიტისთვის სურათზე 6.ა წარმოდგენილ ფართობზე ცირკონიუმის შემცველობა არ დადასტურდა, ხოლო ბ სურათზე ნაჩვენებ ფართობზე ცირკონიუმი განაწილებულია ძლიერ არათანაბრად (ცხრ.3)

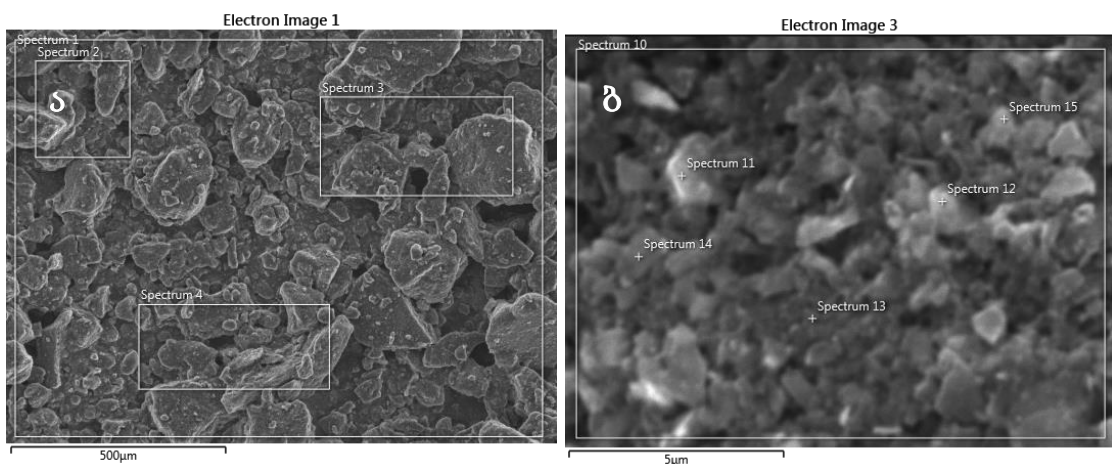
ცხრილი 3. მრსა-ის შედეგები TD-1-60 ნარევისთვის

Spectrum Label	Spectrum							
	8	1	2	3	4	5	6	7
B	58.91	68.05	67.52	65.70	62.86	71.50	72.84	73.76
C	23.87	22.12	23.04	21.17	20.26	21.94	21.82	21.95
O	1.66	4.91	6.59	4.18	1.32	5.28	3.22	3.03
Fe	0.38	1.38	1.70	0.81	0.35	0.76	0.93	0.43
Zr		3.53	1.14	8.15		0.15	1.01	0.25
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ცირკონიუმი ასევე არ აღმოჩნდა TW-1-180 ნარევიში. ხოლო PD-1-3, PD-5-3 და PW-5-3 ნარევიებში ცირკონიუმი შეიმჩნევა მცირე რაოდენობით, რომელიც განაწილებულია არათანაბრად.

სურათზე 7 და ცხრილში 4 წარმოდგენილია მრსა-ის შედეგები PW-1-5 ნარევისთვის. ა სურათზე ნაჩვენებია 1 მმ² ფართობის ანალიზი X27 გადიდებით. მისი შესაბამისი ცხრილის მიხედვით ცირკონიუმის განაწილება 2.27-2.49 მას.% ზღვრებში მერყეობს. 10 000 გადიდების დროს 100 მკმ² ფართზე აღებული (სურ. 7-ბ) წერტილოვანი ანალიზის შედეგები კი ცხადყოფს, რომ აღებულ წერტილებში ყოველ ერთ მკმ³ მოცულობაში ცირკონიუმი განაწილებულია თანაბრად და შეადგენს საშუალოდ 2.09 %-ს (მე-10 სპექტრი). ეს შემცველობა მოცულობაში დაახლოებით 1%-ია, რაც შეესაბამება 8-10 ნმ ზომის ნაწილაკს.

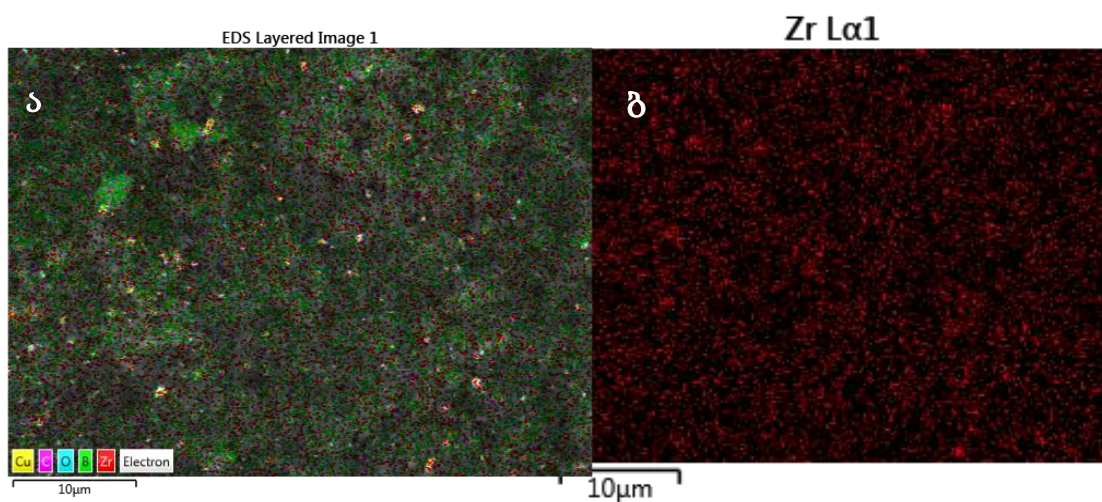
სურ. 8-ზე მოყვანილია რენტგენის მახასიათებელ გამოსხივებაში მიღებული სურათები PW-1-7 ნარევისთვის სადაც ასევე ჩანს, რომ ცირკონიუმი მთელს მოცულობაშია განაწილებული თანაბრად, სადაც მისი ზომა 1 მკმ-ს არ აღემატება.



სურ. 7. PW-1-5 ნარევისთვის ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფიები სხვადასხვა გადიდებაზე მრსა-ის ადგილების ჩვენებით.

ცხრილი 4. მრსა-ის შედეგები PW-1-7 ნარევისთვის

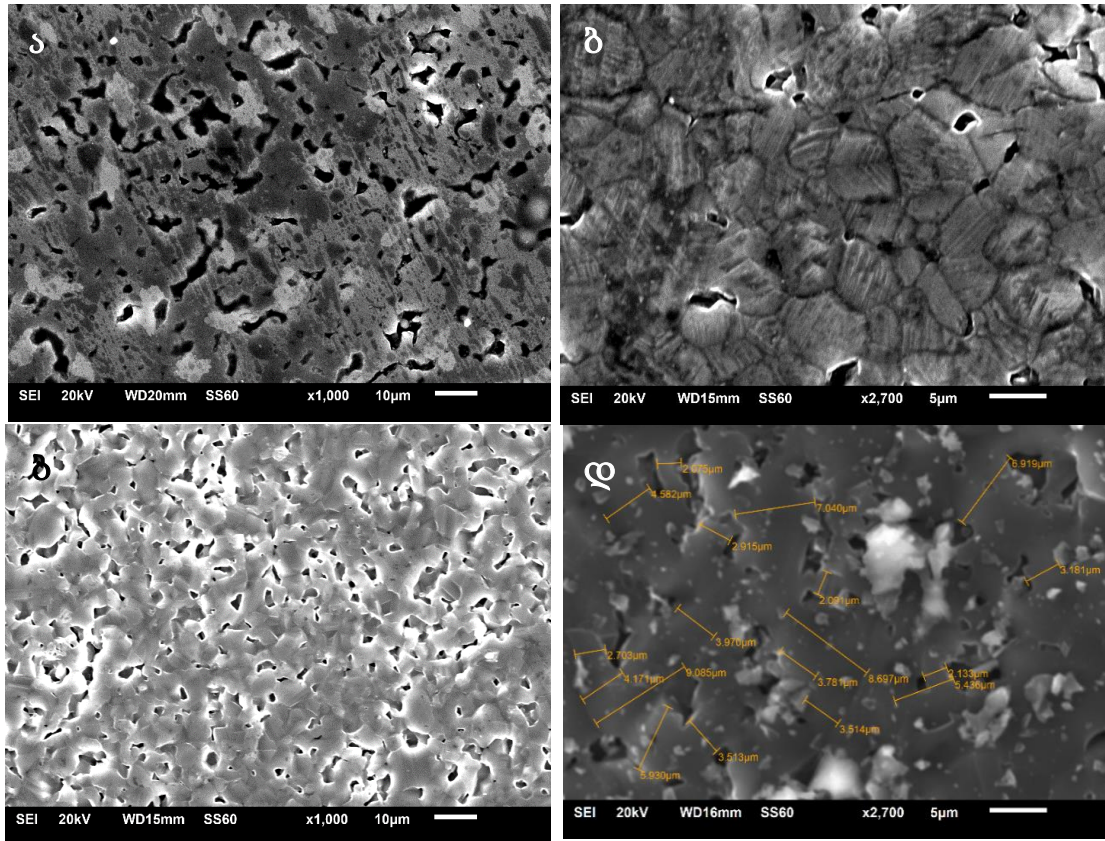
Spectrum Label	Spectrum									
	4	1	2	3	10	11	12	13	14	15
B	66.94	68.2 4	67.3 6	67.1 2	70.1 6	72.1 1	68.8 0	71.1 0	70.9 0	66.6 1
C	21.63	18.9 2	20.7 3	21.1 5	20.8 2	22.2 6	23.6 0	19.6 7	16.5 4	25.1 5
O	4.49	4.33	4.21	4.58	4.73	3.57	4.85	5.28	7.46	5.21
Si	0.20	0.24	0.27	0.26	0.28	0.19	0.25	0.22	0.35	0.20
Fe	1.44	1.61	1.98	1.85	1.13	0.65	0.78	1.19	2.18	0.87
Zr	2.28	2.27	2.43	2.49	2.09	0.91	1.26	1.88	1.81	1.46
Total	100.0 0	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00	100. 00



სურ. 8. რენტგენის მახასიათებელ გამოსხივებაში მიღებული სურათები PW-1-7 ნარევისთვის

შერევა ეფექტური გამოდგა სითხის გარემოში, პლანეტარული წისქვილის და 1 მმ ზომის ბურთულების გამოყენებით. კვლევა გაგრძელდა აღნიშნული მეთოდის საფუძველზე.

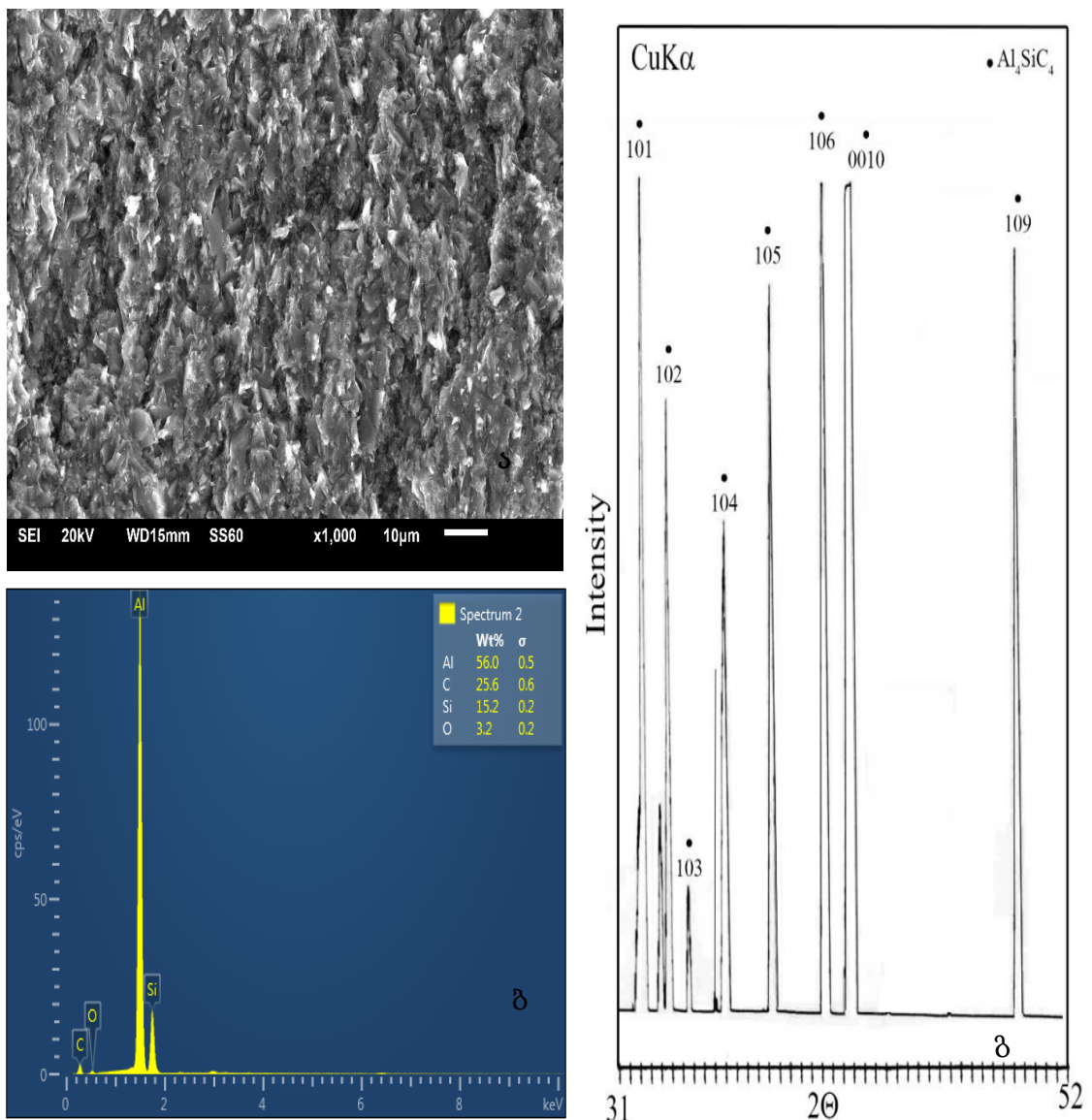
სურათ 9-ზე მოცემულია თერმულად დაუმუშავებელი ნიმუშის (TUHS) გაპრიალებული ზედაპირი შემდგომი ელექტროქიმიური ამოჭმით (ა) და TUHS-ის ტეხი (ბ), გაპრიალებული ნიმუშის ზედაპირი შემდგომი თერმული დამუშავებით (გ), გაპრიალებული და ელექტროქიმიურად ამოჭმული ნიმუშის ზედაპირი შემდგომი თერმულად დამუშავებით (დ).



სურ. 9. TUHS-ის და THS-ის ზედაპირები და ტეხი

როგორც ვხედავთ ფორიანი ბორის კარბიდის კერამიკის კერამოგრაფიისთვის უკეთესია თერმული ამოჭმის მეთოდი. ა და ბ სურათებზე მარცვლის საზღვრები არ ჩანს, თუმცა ფორიანობის მიხედვით შეიძლება მსჯელობა, რომ მარცვლის ზომა უმეტეს შემთხვევაში არ აღემატება 5 მკმ-ს. ფორები თანაბრად განაწილებულია. მათი საშუალო ზომა 2-4 მკმ-ია. ბ სურათზე ჩანს რომ ძირითადი მარცვალი 3-5 მკმ-ია, თუმცა არის შედარებით დიდი 7-9 მკმ ზომის მარცვლებიც. გ და დ სურათზე კარგად ჩანს მარცვლის საზღვრები, მარცვლების უმეტესობა 5

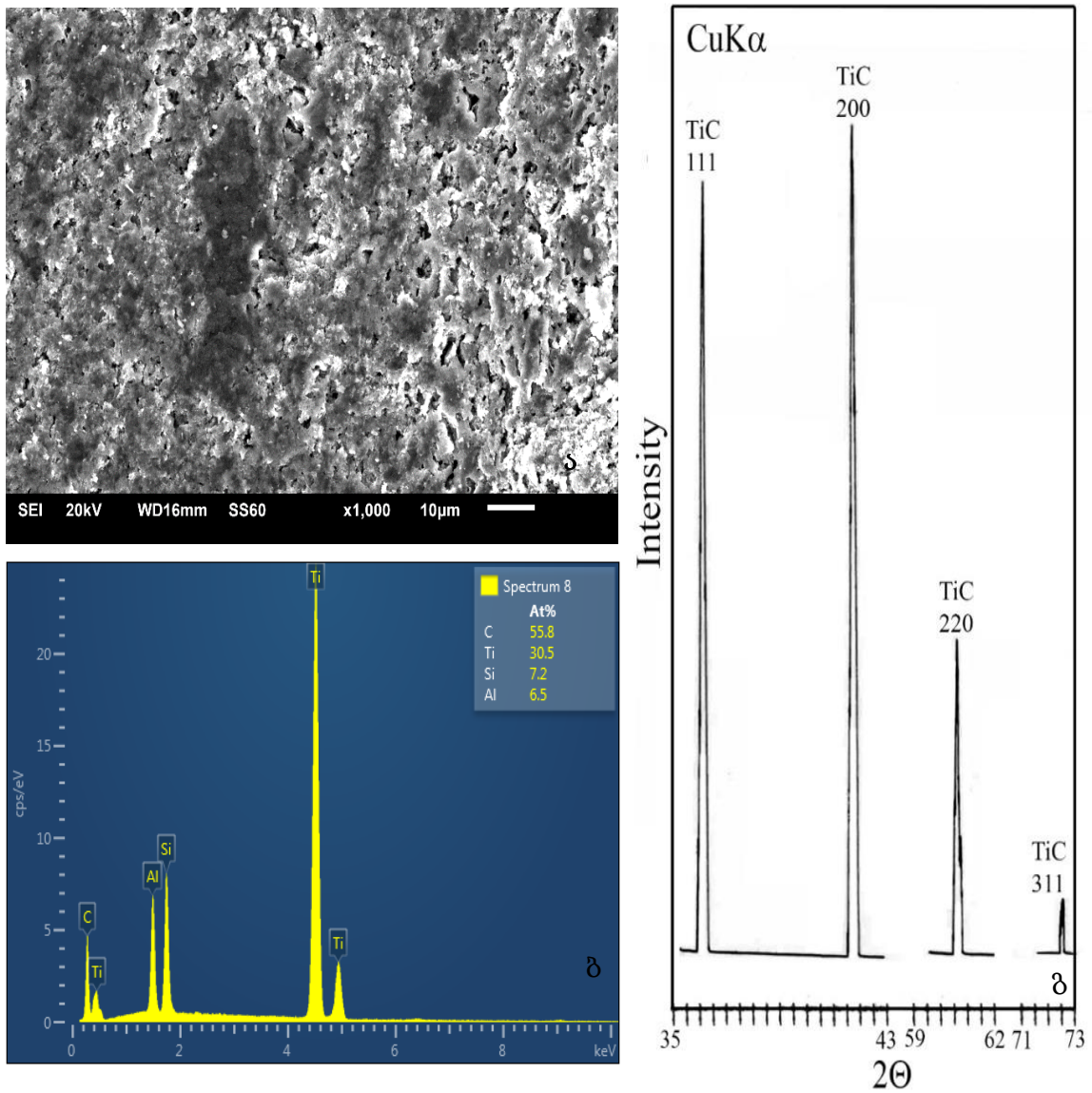
მკმ-ს არ აღემატება. იშვიათ შემთხვევაში არის 10 მკმ ზომის მარცვლები. როგორც ჩანს, თერმულად დამუშავების შემდეგ მარცვლის ზომა თითქმის არ გაზრდილა. ორივე შემთხვევაში, კერამიკებში საშუალო მარცვალი დაახლოებით ორჯერ აღემატება საწყისი ფხვნილის მარცვლის ზომას. შეინიშნება ბორის კარბიდის მახასიათებელი მრჩობლები.



სურ. 10. ორმაგი კარბიდი Al₄SiC₄ (SPS-670):

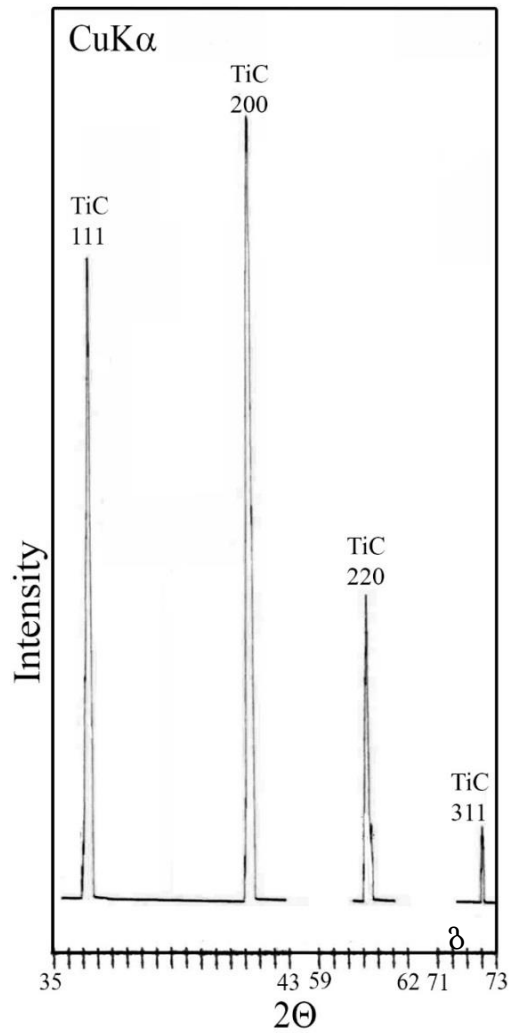
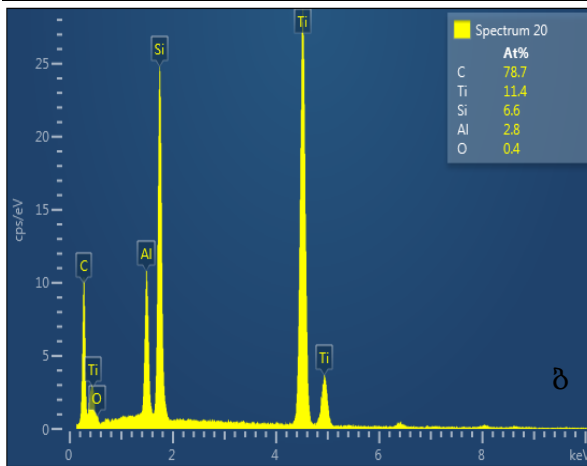
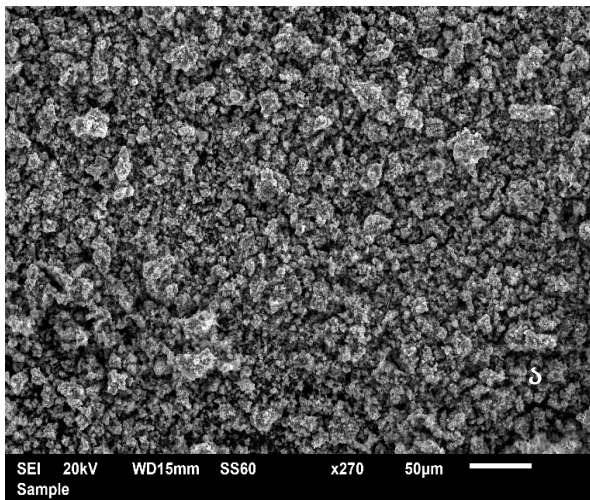
- ა- ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფია,
- ბ- ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი
- გ- რენტგენული დიფრაქტოგრამა

ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ ტიტან-ალუმინ-სილიციუმის კარბიდის (Ti,Al,Si)C სინთეზირება შესაძლებელია 700°C ტემპერატურაზეც კი (სურ. 11). სურ. 12-ზე ნაჩვენებია (Ti_{0.5}Al_{0.25}Si_{0.25})C შემადგენლობის სინთეზირებული ნიმუშის ანალიზის შედეგები. როგორც რენტგენული დიფრაქტოგრამა გვიჩვენებს წარმოქმნილია ტიტანის კარბიდის სტრუქტურის მქონე ნაერთი, რომლის შემადგენლობაშიც ტიტანის გარდა ალუმინიც და სილიციუმიც იმყოფება.



სურ. 11 . ტიტან, ალუმინ, სილიციუმის რთული კარბიდი (Ti,Al,Si)C (SPS-675):

- ა- ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფია,
- ბ- ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი
- გ- რენტგენული დიფრაქტოგრამა



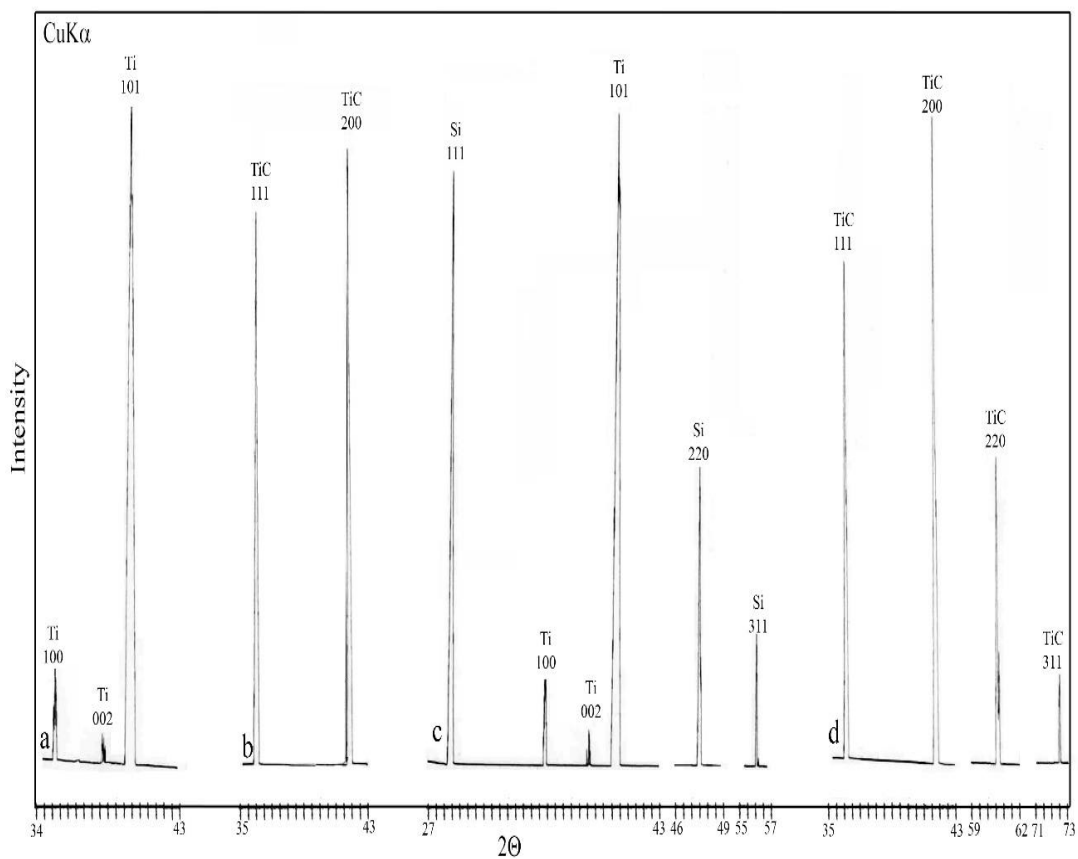
სურ. 12. $(Ti_{0.5}Al_{0.25}Si_{0.25})C$ კომპოზიტის სინთეზირება $700^{\circ}C$ ტემპერატურაზე

(SPS-680):

- ა- ელექტრონულ მიკროსკოპული მიკროფოტოგრაფია,
- ბ- ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი
- გ- რენტგენული დიფრაქტოგრამა

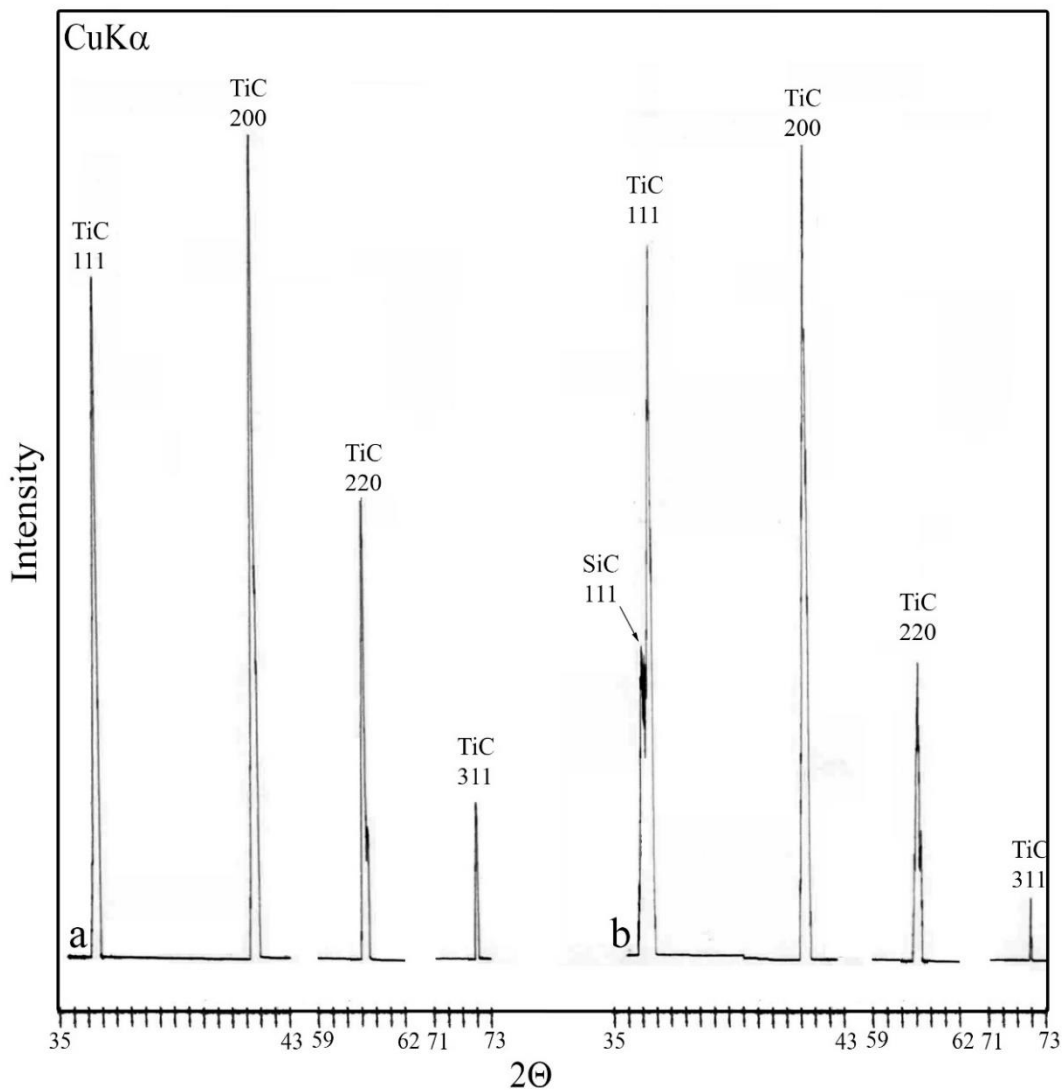
სტრუქტურის წარმოქმნის მექანიზმის დასადგენად ჩატარებული იქნა მოდელური ექსპერიმენტები Ti-C, Ti-Al-C, Ti-Si-C და Ti-Al-Si-C სისტემების გამოყენებით. აღმოჩნდა, რომ ტიტანის კარბიდის სტრუქტურის მქონე ნაერთი $700^{\circ}C$ სინთეზირებისას მხოლოდ Ti-Al-C და Ti-Al-Si-C სისტემებში ყალიბდება. ე.ი. იმ სისტემაში სადაც ალუმინი ფიგურირებს. ალუმინი ხელს უწყობს სინთეზირების პროცესს. სურ.13-ზე ნაჩვენებია $700^{\circ}C$ სინთეზირებული Ti-C, Ti-Al-C, Ti-Si-C და Ti-C (ინიცირებული

აფეთქებით) სიტემების რენტგენული დიფრაქტოგრამები. ამ სურათის ბოლო დიფრაქტოგრამაზე ტიტანის კარბიდის სტრუქტურის ჩამოყალიბება გამოწვეულია სინთეზირების დროს გამოყოფილი წყალბადის მიკროაფეთქებით. წყალბადი გამოიყოფოდა ერთერთი კომპონენტის ტიტანის ჰიდრიდის დაშლისას, რომელიც იწყება 500°C ტემპერატურაზე. თუ არ მოხდა ამ ტემპერატურაზე დაყოვნება, რათა მოხდეს წყალბადის მთლიანი გაწოვა, შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მიკროაფეთქებას. ამ დროს ხდება ტემპერატურის სწრაფი აწევა და შესაბამისად კარბიდის სინთეზირების პროცესის წარმართვა. 1 000°C და უფრო მაღალი ტემპერატურაზე სინთეზირების დროს კი ზემოთ აღნიშნულ სისტემებში მიდინარეობს რეაქციები და ყველგან ყალიბდება ნაერთი ტიტანის კარბიდის

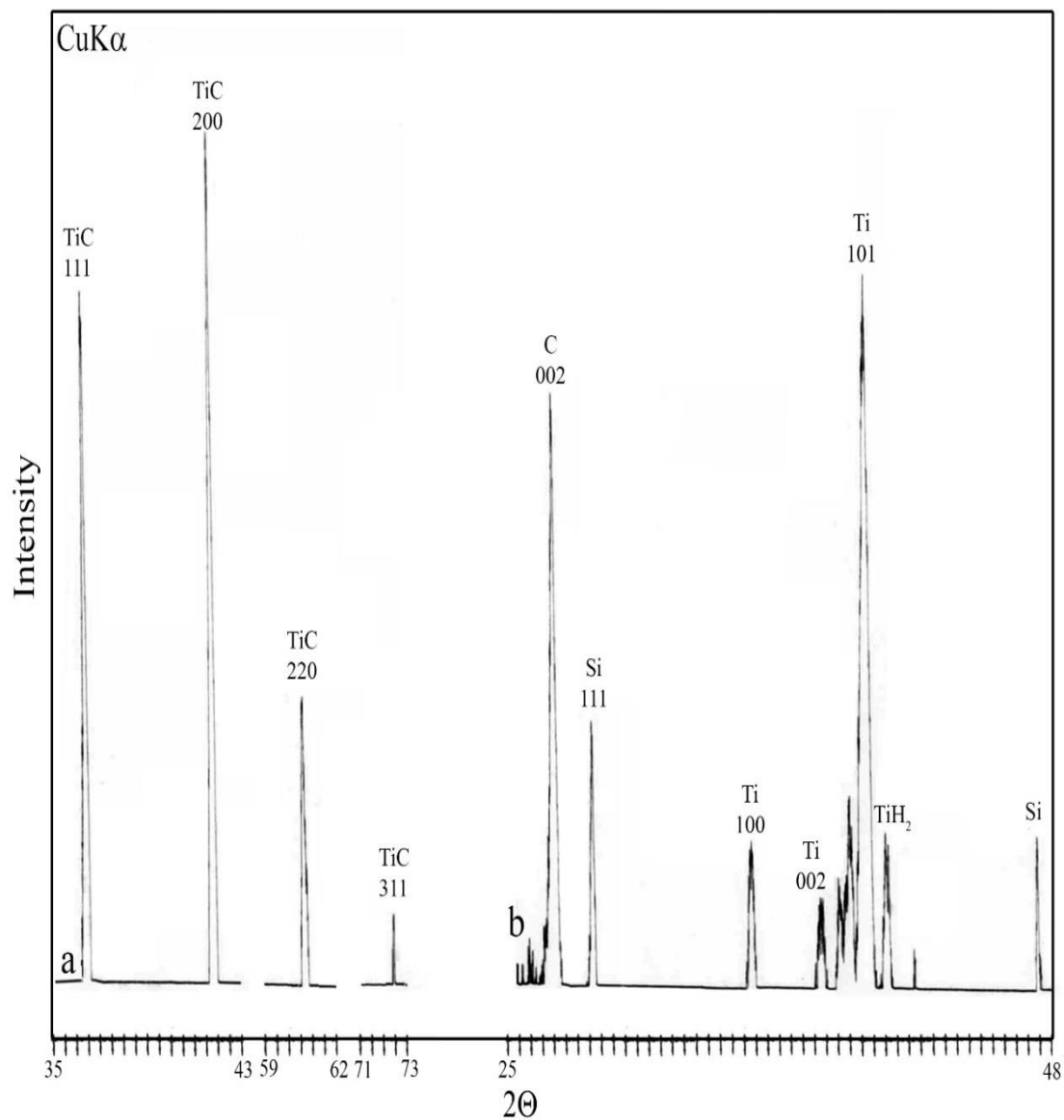


სურ. 13. 700°C სინთეზირებული Ti-C (a), Ti-Al-C (b), Ti-Si-C (c) და Ti-C (d) (ინიცირებული აფეთქებით) სიტემების რენტგენული დიფრაქტოგრამები (SPS-686, SPS-687, SPS-688 და SPS-685)

სტრუქტურით. ამის დასტურია სურ.14-ზე მოყვანილი რენტგენული დიფრაქტოგრამები. უნდა აღინიშნოს, რომ Ti-Si-C სისტემის კომპოზიტის სინთეზირებისას ადგილი აქვს სილიციუმის კარბიდის წარმოქმნასაც. როგორც ვხედავთ, დაბალ ტემპერატურაზე (700°C) კარბიდწარმოქმნა ალუმინის თანაობისას ხდება, ხოლო 1000°C ზემოთ მის გარეშეცაა შესაძლებელი. ალუმინის რაოდენობის შემცირებისას დაბალ ტემპერატურაზე ძნელდება კარბიდწარმოქმნა (სურ.15 ბ), მაშინ როდესაც ტემპერატურის აწევა 1000°C ტიტანის კარბიდის სტრუქტურის მქონე კარბიდი ადვილად წარმოიქმნება (სურ.15 ა).



სურ. 14. 1000°C სინთეზირებული Ti-C და Ti-Si-C სიტემების რენტგენული დიფრაქტოგრამები (SPS-690 და SPS-692B)



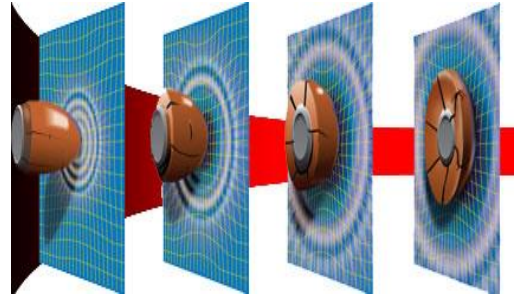
სურ. 15. $(\text{Ti}_{0.6}\text{Al}_{0.2}\text{Si}_{0.2})\text{C}$ კომპოზიტის რენტგენული დიფრაქტოგრამები: სინთეზირებული 1000°C და 600°C - 800°C ტემპერატურებზე (SPS-694 და SPS-693).

როული კარბიდების სინთეზირებისას პირველადაა მიღებული ტიტანის კარბიდის სტრუქტურის მქონე ტიტან, ალუმინ, სილიციუმის კარბიდი. ლიტერატურაში მსგავსი ნაერთის არსებობის შესახებ მონაცემები არ მოიძებნება, თუ არ ჩავთვლით ცნობებს $(\text{Ti,Al,Si,C})\text{N}$ და $(\text{Ti,Al,Si})\text{CN}$ თხელი დანაფარების შესახებ, სადაც მსგავსი სტრუქტურის წარმოქმნის შესაძლებლობებზეა ლაპარაკი. ბალისტიკური გამოცდებისათვის შერჩეული კომპოზიციდან მზადდებოდა ფილები კვადრატული ფორმის

ზომით 60x60 მმ ან ცილინდრული ფორმის დიამეტრით 70 მმ. სისქე ნიმუშებისა შეირჩეოდა ექსპერიმენტალურად. საწყისი ზომა ნიმუშის სისქისა 10-12 მმ შეადგენდა. გამოცდის შედეგად თუ კი ის გაუძლებდა ტყვიის დარტყმას, თანდათანობით მცირდებოდა მათი სისქე ფილის ტყვიით განჭოლვამდე. თუ კი ფილა ვერ გაუძლებდა ტყვიის დარტყმას, მაშინ კომპოზიცია უვარგისი იყო ჯავშანნაკეთობებში გამოყენებისათვის. ფილის დანიშნულებაა შეჯახებისას დაამსხვრიოს ტყვია და დააკარგინოს კინეტიკური ენერგია. ცხადია ტყვიის ენერგიის დისსიპაციისათვის ტვით ფილაც განიცდის რღვევას. ფილის რღვევის შემდეგ ტყვიის და ფილის ნამსხვრევები უნდა შეაკავოს სპეციალურმა სადებმა, რომელიც ბალისტიკური ნაჭრისაგან არის დამზადებული. ჩვენს შემთხვევასი გამოიყენებოდა კველარი. იმედის მომცემი იყო ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალი მასალა აბრეშუმის ნაჭრის გამოყენებით. მიზანშეწონილია მასზე მუშაობის გაგრძელება.

ბალისტიკური ტესტირების შედეგები (სურ. 16) ფასდებოდა ფილის წონით. იგი ნაკლები უნდა ყოფილიყო სტანდარტული ფილის წონაზე. ლიტერატურულ მონაცემებზე ზუსტი დაყრდნობა შეუძლებელია არასრული და ზუსტი მონაცემების არსებობის გამო. მგრამ ჩვენს ხელთ არსებული მონაცემებით ჩვენს მიერ შემუსავებული ხუთივე კომპოზიცია აკმაყოფილებს შესაბამის მოთხოვნებს. სურ. 17-ზე ნაჩვენებია ფილების სახე ბალისტიკური გამოცდამდე და მის შემდეგ. სადების გამობურცულობის დასაშვები მაქსიმალური ზღვარი 44 მმ შეადგენს

ტესტირება წარმეზდა აშშ
იუსტიციის ნაციონალური
ინსტიტუტის სტანდარტის (NIJ)
მიხედვით (type-IV)



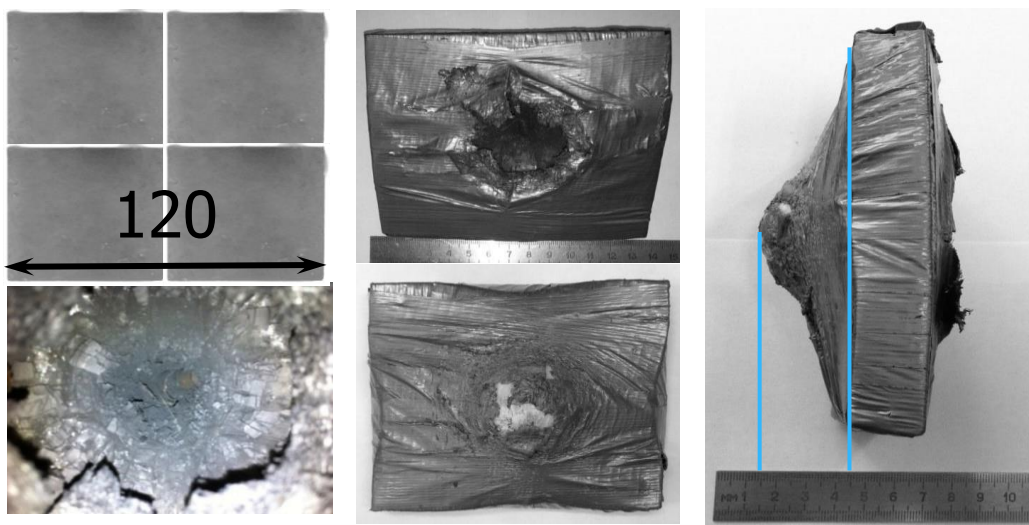
ტყვის
მიმართულება

სალი კომპოზიცია
(B_4C , B_4C-SiC , $B_4C-SiC-TiB_2$)

სადები მასალა
მეტალური (Ti-6Al-4V)
/ტექსტილი (დენიმა,
კეკლარი, ტვარონი)

- ❑ ფილის ზომა -120x120 მმ;
- ❑ ფილის ფრაგმენტების ზომა 60x60 მმ;
- ❑ წონა - 50-100გ.
- ❑ ფილის სადებად გამოყენებული იყო ბალისტიკური ტექსტილი - კეკლარი.
- ❑ წონა საფენისა შეადგენდა 0,6 – 0,8 კგ;
- ❑ ტესტირებისას სროლა წარმოებდა მოსინის ტიპის კარაბინიდან;
- ტყვია - ჯავშან გამტანი. B-3 2 7.62x54
- ტყვის მასა – $10.8 \pm 0,1$ გ;

სურ. 16. ბალისტიკური ტესტირების სქემა



სურ. 17 . საჯავშნე ფილები ბალისტიკური ტესტირებამდე და შემდეგ

დასკვნა

1. შემუშავებულია ბორის კარბიდის მიღების ახალი ტექნოლოგია;
2. ბორის კარბიდის ნაკეთობების სიმყიფის შესამცირებლად შემუშავებულია თერმული დამუშავების ტექნოლოგია;
3. მიღებულია $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის კერამიკული ნიმუშები ცხელი დაწნების მეთოდით $2100\text{-}2150^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე და 30 მპა წნევის ქვეშ შემდგომი თერმული დამუშავებით 1800°C -სა და 10^{-4} პა წნევაზე.
4. შესწავლილია თერმულად დამუშავების გავლენა $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის მექანიკურ დამუშავებადობაზე და მის ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე. თერმულად დამუშავების შედეგად ადგილი არ ჰქონია ნიმუშების ზომაში ცვლილებას. ასევე არ შეიცვალა ბორის კარბიდის მარცვლის ზომა - კერამიკის ერთ-ერთი ფუნქციური მახასიათებელი.
5. თერმულად დამუშავების შედეგად გაუმჯობესდა მასალის მექანიკური დამუშავებადობა, სისალე და დრეკადობის მოდული. შემცირდა ამონატეხების ზომა და რაოდენობა. მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე გაიზარდა 33%-ით, ბზარმდეგობა კი 25-40%-ით
6. ნაპერწკალურ-პლაზმური სინთეზის მეთოდით მიღებულია კარბიდული ნაერთები: $\text{Al}_8\text{B}_4\text{C}_7$, $\text{Ti}_3\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{C}_2$ და Al_4SiC_4
7. პირველადაა სინთეზირებული ტიტან, ალუმინის და სილიციუმის რთული კარბიდი - $(\text{Ti,Al,Si})\text{C}$;
8. მიღებულია ახალი კომპოზიციური მასალები: $\text{B}_4\text{C-SiC-TiB}_2\text{-Al}_8\text{B}_4\text{C}_7$, $\text{TiC-SiC-TiB}_2\text{-Al}_4\text{SiC}_4$, $\text{TiC-SiC-TiB}_2\text{-Ti}_3\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{C}_2$ და $(\text{Ti,Al,Si})\text{C-SiC-TiB}_2$;
9. ბალისტიკურმა ტესტირებამ აჩვენა პერსპექტიულობა ამ მასალების გამოყენებისა ჯავშანნაკეთობებში.

აპრობაცია. ნაშრომის მნიშვნელოვანი საკითხები წარმოდგენილი იყო ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტის თემატურ სემინარებსა და შემდეგ საერთაშორისო კონფერენციებზე და კონგრესებზე:

1. მე-5-ე საერთაშორისო კონფერენცია „ნანოტექნოლოგიები“. **“ულტრადისპერსიული ფხვნილოვანი მაკროჰომოგენური კომპოზიტის მიღების მეთოდის დამუშავება”.** თბილისი, საქართველო. 2018
2. მე-5-ე საერთაშორისო კონფერენცია „ნანო ტექნოლოგიები“. **„გრაფენის შემცველი კერამიკული მატრიცის კომპოზიტის მომზადება ინტერკალირებული გრაფიტის ნაერთების გამოყენებით“,** თბილისი, საქართველო 2018.

გამოქვეყნებული ნაშრომები. დისერტაციის საკვანძო საკითხები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“, Vol.21.1(41). **“თერმული დამუშავების გავლენა ცხელი დაწნებით მიღებულ $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის ნაკეთობაზე”.** ზ. მესტვირიშვილი, შ. ზურაბიშვილი, თ. მესტვირიშვილი, ხ. ბლუაშვილი, ა. სიჭინავა, ნ. ჯალაბაძე. (გვ 61-69), თბილისი, საქართველო. 2019
2. „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“, Vol.21.1(41). **„ულტრადისპერსიული ფხვნილოვანი მაკროჰომოგენური კომპოზიტის მიღების მეთოდის დამუშავება“,** ზვიად მესტვირიშვილი, ვახტანგ კვაჭაძე, ირაკლი ბაირამაშვილი, ნიკოლოზ ჯალაბაძე, თორნიკე მესტვირიშვილი. (გვ 52-60), თბილისი, საქართველო. 2019
3. Nano Studies“, #19 **„Влияние термической обработки на горячее прессование изотопа модифицированного карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ “.** 3. Мествиришвили, Ш. Г. Зурабишвили, Т. З. Мествиришвили, Х. Т. Блуашвили, А. В. Сичинава. Н. В. Джалабадзе. თბილისი, საქართველო. 2019

Abstract

The history of composition materials dates back to time. The predecessors of modern high-tech composite materials were primitive instruments and agricultural inventory obtained from the synthesis of clay, hay, stone, wood and metal. The main purpose of their creation was to combine the properties - synergism, which deprived them of the well-being of clay houses, using natural and tortured arms and land-making weapons.

Composite materials were constantly growing and occupying a great place in many fields of technology and science. Technologies for making composites have evolved so that they belong to advanced and high technologies that are mainly developed and developed by developed countries. The significance of composites reveals that man uses and maintains them during its existence. For their specialty, it is evident that none of the technological or scientific innovations in modern life has been created bypassing them.

The development of nuclear physics, informatics and electronics in the second half of the twentieth century developed techniques such as nuclear technology, machine-building, construction of supersonic spacecraft, etc. The development of such areas has led to the demand for materials that are characterized by combined mechanical, thermal, chemical, technical and other functional characteristics of other materials (ceramic, metallic, polymer). Since the above features are mainly ceramic materials, they are used to create composites for these areas. The composition of these compositions belongs to carbide composites whose processing is the main area of our work.