

უაკ 666.762.93

სხვადასხვა ფაქტორის გავლენა B₄C-ის ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე

ზ. მესტირიშვილი^{1,2}, ნ. ნიჟარაძე¹, ს. გვაზავა^{1,3}, ზ. კოვზირიძე¹

¹ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ბიონანოკერამიკისა და ნანოკომპოზიტების ტექნოლოგიის ² ინსტიტუტი, საქართველო, 0160, თბილისი, კოსტავას 69

სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, საქართველო, 0186, თბილისი, მინდელის 7

³ ფერდინანდ თავაძის სახელობის მეტალურგიის და მასალათმცოდნეობის სამეცნიერო ინსტიტუტი, საქართველო, 0186, თბილისი, მინდელის ქ. 8^b

E-mail: zviad.mst@gmail.com

რეზიუმე: მიზანი. კვლევის მიზანია ბორის იზოტოპების კონცენტრაციის, დანამატებისა და სიმკვრივის გავლენის შესწავლა ბორის კარბიდის ნაკეთობების მექანიკურ მახასიათებლებზე.

მეთოდი. გამოსაცდელი კერამიკული ნიმუშები დამზადდა ცხელი დაწნეხის მეთოდით 2000°C ტემპერატურაზე და 40 მპა წნევით. ჩატარდა რასტრული მიკროსკოპული კვლევა. განისაზღვრა კერამიკის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები.

შედეგი. დადგინდა სიმკვრივის, იზოტოპური შედგენილობის და დანამატების გავლენა ბორის კარბიდის კერამიკის ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე.

დასკვნა. იზოტოპური ეფექტი ბორის კარბიდის სისაღეზე არ არის მკაფიოდ გამოკვეთილი. კერძოდ, ბორის იზოტოპებით გამდიდრებულ ბორის კარბიდებს არ აქვს გაუმჯობესებული სისაღე ბუნებრივი იზოტოპური შემცველობის ბორის კარბიდთან შედარებით. ბორის კარბიდის სისაღეზე უმნიშვნელოდ მოქმედებს კრისტალური მესრის პარამეტრების ცვლილება, რომელსაც იწვევს ბუნებრივი კონცენტრაციიდან გადახრა. ბზარმდეგობაზე ძირითადად მოქმედებს ფორების რაოდენობა, რაც ბზარის გავრცელების ერთ-ერთი ინჰიბიტორია. კერამიკების სიმკვრივის ზრდით იზრდება სისაღე და დრეკადობის მოდული. ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე ასევე მოქმედებს დოპანტის ოპტიმალური რაოდენობა, რომელიც განაპირობებს მიკროსტრუქტურის დახვეწას, სისტემის სტაბილურობას და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გაუმჯობესებას.

საკვანძო სიტყვები: ბორის კარბიდი; იზოტოპური ეფექტი; იუნგის მოდული; სიმკვრივე.

1. შესავალი

ქიმიური ელემენტი ბორი თავისი უნიკალური ბირთვული თვისებებით განსაკუთრებულ ადგილს იკავებს რეაქტორულ მასალებს შორის. მას ორი სტაბილური იზოტოპი აქვს - ¹⁰B და ¹¹B, რომელთა შედგენილობა ბუნებრივ იზოტოპურ ნარევეში შესაბამისად 19.8 და 80,2 ატ.% შეადგენს [1]. მოცემულ იზოტოპებს აქვს ანალოგიური ფიზიკური და ქიმიური თვისებები, მაგრამ მკვეთრად განსხვავდება ბირთვული თვისებებით. ძირითადი განსხვავებაა მათი ნეიტრონების შთანთქმის უნარში: მსუბუქი ბორის იზოტოპი ¹⁰B ეფექტური შთანთქმელია (თბური ნეიტრონების შთანთქმის კვეთი – ¹⁰B=3837 ბარნი), ხოლო ბორის მეორე იზოტოპი ¹¹B, თავის მხრივ, კარგი ამრეკლავი (შემნელებელი) საშუალებაა (თბური ნეიტრონების შთანთქმის კვეთი – ¹¹B = 0.005 ბარნი) [1]. ¹⁰B₄C-გან მზადდება ნეიტრონების შთანთქმელი მასალები როგორც ფხვნილის, ისე ნაკეთობების სახით ბირთვული რეაქტორების მარეგულირებელი და ავარიული დაცვის ღეროებისთვის [2-5]. ბორ-10 იზოტოპით გამდიდრებული B₄C-ის ფირები გამოიყენება ნეიტრონული ნაკადის ნახევარგამტარული სენსორების წარმოებაში [6-8]. ბორის კარბიდს აქვს კარგი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები, თერმომედეგობა, არატოქსიკურობა, ნაკლებად აალებადობა და სხვა. ის ხასიათდება მაღალი ცვეთამედეგობით, ლღობის

მაღალი ტემპერატურით (2245°C) და ქიმიური ინერტულობით.

ბორის კარბიდი გამოირჩევა მაღალი სისაღით (30-38 გპა) და დაბალი კუთრი წონით (2.51 გ/სმ^3) [9], რის გამოც შეუცვლელი მასალაა ელიტარულ ჯავშან-ფილისთვის [10], მისგან მზადდება როგორც მსუბუქი ტექნიკის, ისე შვეულმფრენების ჯავშანი. მაღალი სისაღის გამო გამოიყენება აბრაზიულ მასალებში, მისგან მზადდება როგორც აბრაზიული ფხვნილები, ისე პასტები და ნაკეთობები [3,4, 11-13]. ბორის კარბიდის დრეკადობის მოდული $300\text{-}460$ გპა-ია [3,11, 14]. აღნიშნული მახასიათებელი იზრდება ბორის კარბიდის ჰომოგენურობის ზღვრებში ($\text{B}_{3.5}\text{C}\text{-B}_{6.5}\text{C}$) ნახშირბადის მატებასთან ერთად [2]. ბორის კარბიდს ასევე მაღალი აქვს სიმტკიცე კუმშვასა და ღუნვაზე [3, 15].

მიუხედავად ზემოაღნიშნული დადებითი თვისებებისა, ბორის კარბიდის გამოყენება, როგორც კონსტრუქციული მასალის, შეზღუდულია მისი სიმყიფის გამო [16], რაც განპირობებულია ბორის კარბიდის კრისტალური მესრის აღნაგობით (რომბოედრული მესერი, დამახასიათებელი იკოსაედრებითა და ახლო მოწესრიგებულობით). მას არ გააჩნია შორეული მოწესრიგებულობა, რაც განაპირობებს კრისტალური მესრის დაბალ სიმკვრივეს და დეფექტებს, ასევე დაბალ სიმყიფესა და ზნარმდეგობას. ზნარმდეგობა კერამიკის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია და შეადგენს $2\text{-}3\text{ MPa}\sqrt{\text{მ}}\text{-ს}$. ამ მაჩვენებლით ის ჩამორჩება ყველა მოწინავე კერამიკას [3].

ბორის კარბიდის ქიმიური ბმის კოვალენტური ბუნება საგრძნობლად ართულებს თავისუფალი შეცხოვის პროცესს [17], რის გამოც მიმართავენ ცხელი დაწნების ან სხვა ფხვნილების იძულებით კონსოლიდაციის მეთოდებს (ცხელი დაწნება $1800\text{-}2200^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე და 40 მპა წნევაზე, შეცხოვა მაღალი წნევით (აფეთქება და სხვა), რაც იწვევს რეკრისტალიზაციის უარყოფით პროცესს [14, 17, 18].

მაღალი სიმყიფე უარყოფითად მოქმედებს ბორის კარბიდის მექანიკურ დამუშავებასა და მდგრადობაზე თერმული და მექანიკური დარტყმების მიმართ. $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის შთამთქმელი მასალა ვერ უძლებს დაბრუნებას, რომლებიც წარმოიქმნება ნეიტრონულ

ველში დასხივების გამო. [19] სამუშაოს მიხედვით ბორის კარბიდის გაბერვა (swelling – $V/\Delta V$) პირდაპირპროპორციულია ერთეულ მოცულობაში n , α რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი ჰელიუმის ატომების რაოდენობის. [20] სამუშაოს ავტორებმა, სწრაფ რეაქტორში დასხივებული $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის და $^{11}\text{B}_4\text{C}$ -ის გაბერვის მაგალითზე დაადგინეს, რომ $^{11}\text{B}_4\text{C}$ -ის გაბერვის მხოლოდ 25% არის გამოწვეული n , α რეაქციით, შესაბამისად $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის გაბერვის 1% არ არის გამოწვეული მხოლოდ n , α რეაქციით. [6] სამუშაოს მიხედვით კრისტალური მესრის დეფექტებს იწვევს როგორც 2.79 MeV ენერგიის მქონე α ნაწილაკებით შიგა ბომბარდირება, ისე სწრაფი ნეიტრონების ნარჩენი ფონი. [14]-ს ავტორების აზრით ნეიტრონული დასხივება წარმოშობს როგორც თერმულ დაბრუნებას, ისე მექანიკურს. ეს უკანასკნელი გამოწვეულია ჰელიუმის ბუმტების გაერთიანებით ფორების სახით, რომლებიც ჯაჭვებს ქმნის და მიკრო- და მაკროზნარებს იწვევს.

მაღალი ზნარმდეგობა აუცილებელია როგორც ბორ-10 იზოტოპით გამდიდრებული ბორის კარბიდისთვის, ისე $^{11}\text{B}_4\text{C}$ -სთვის, ეს უკანასკნელი პერსპექტიულ რეაქტორულ მასალად მოიაზრება ნეიტრონული ველის ხახუნის კვანძებში სამუშაოდ [1].

ბორის კარბიდზე ჩატარებული სამუშაოების დიდი ნაწილი ეძღვნება ზნარმდეგობის გაუმჯობესებას, რის მისაღწევად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდი. ესენია: ლეგირება, ბორის კარბიდის ნანოფხვნილების და ნანობოჭკოების გამოყენება, კომპოზიტების დამუშავება ბორის კარბიდის ბაზაზე და სხვა [3, 11, 12, 21-23].

ჩატარებული და მიმდინარე მრავალი კვლევის ერთ-ერთი ძირითადი მიზანია ბორის კარბიდის ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებების გაუმჯობესება სხვადასხვა ტექნოლოგიური მეთოდით და საშუალებით [24].

ბორის კარბიდის კერამიკაში სხვა ფაზების შეყვანით და ჰეტეროფაზური სისტემის მიღებით შესაძლებელია ვმართოთ რეკრისტალიზაციის პროცესები, რის შედეგადაც ვღებულობთ კერამიკას მინიმალური მარცვლების ზომით [10]. კომპონენტების დისპერსიულობა ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ფაქტორია მასალის სტრუქტურის რეგულ-

ლირებისთვის. იმისათვის, რომ მივიღოთ მკვრივი კერამიკა, აუცილებელია ნანოზომების ნაწილაკების არსებობა [25].

გარდა ზემოაღნიშნული საშუალებებისა, ლიტერატურაში ცნობილია იზოტოპური ეფექტის შესწავლის მაგალითები, რა დროსაც მიკროსტრუქტურაზე მოქმედებს იზოტოპური შედგენილობის ცვლა (^{10}B -ის და ^{11}B -ის კონცენტრაციის ცვლა), რომლებიც, ზოგიერთ შემთხვევაში, გავლენას ახდენს ბორის კარბიდის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე [26], თუმცა ამ ეფექტის არსებობა ჯერ კიდევ საბოლოოდ არ არის შესწავლილი [27].

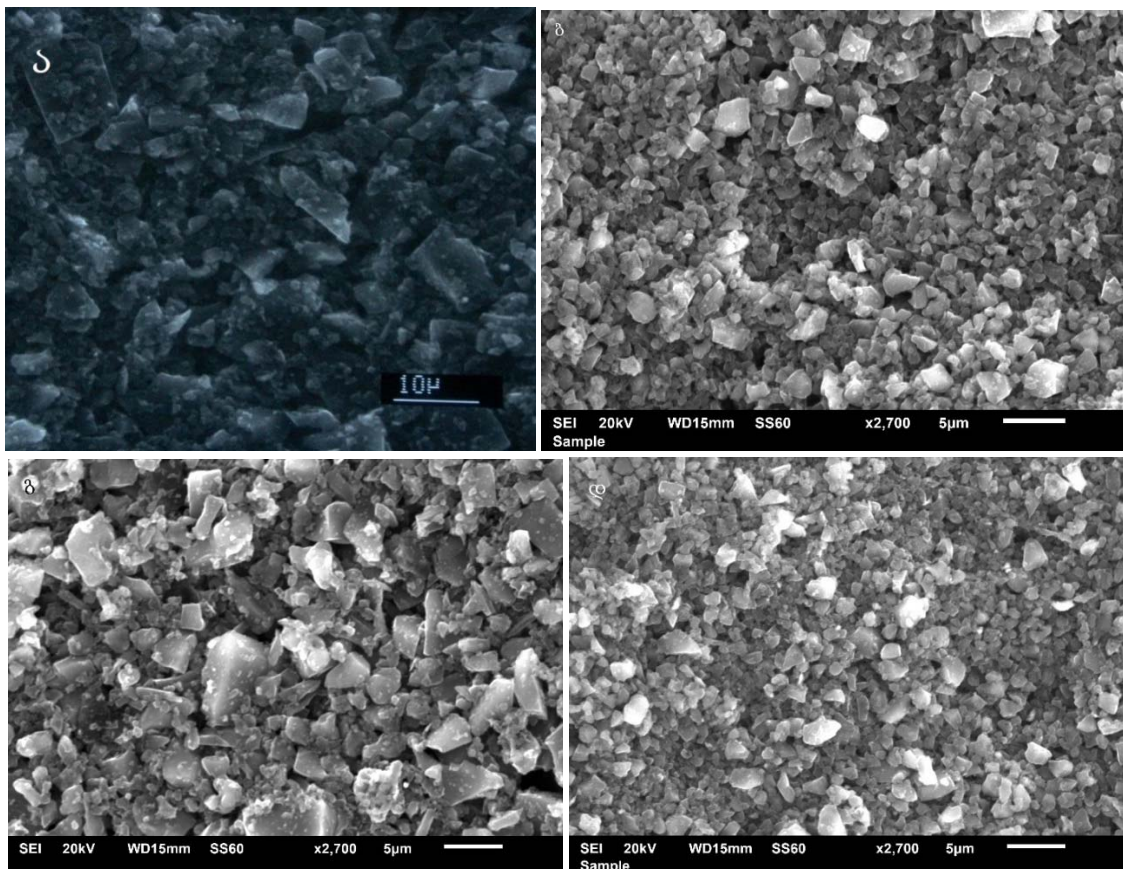
სამუშაოს მიზანია დადგინდეს რა გავლენას ახდენს ^{10}B და ^{11}B იზოტოპების კონცენტრაციის ცვლილება ბორის კარბიდის ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე. პარალელურად გამოყენებულია

დანამატი Zr, რომლის მიზანია ზემოქმედება ბორის კარბიდის კერამიკის სიმკვრივეზე, როგორც მექანიკური თვისების ერთ-ერთ ძირითად განმსაზღვრელ ფაქტორზე.

2. ძირითადი ნაწილი

2.1. ნიმუშების დამზადება

საკვლევი ნიმუშების დასამზადებლად გამოიყენეს სტაბილური იზოტოპების ინსტიტუტის (საქართველო) და შტარკის (გერმანია) მიერ წარმოებული ბორის კარბიდის წნებ-ფხვნილები და ჩვენ მიერ მომზადებული კომპოზიციური ფხვნილები. 1-ელ სურ-ზე მოყვანილია ნედლეულ წნებ-ფხვნილების ელექტრონული მიკროსკოპული სურათები.



სურ. 1. ნედლეული ფხვნილები. ა - B_4C (შტარკი),
ბ - $^{11}\text{B}_4\text{C}$, გ - $^{10}\text{B}_4\text{C}_{90}$, დ - $\text{B}_4\text{CZ1}$

სურათების მიხედვით წნეხ-ფხვნილების მორ-ფოლოგია მსგავსია. როგორც შესავალში აღვნიშნეთ, იზოტოპური კონცენტრაციის ცვლილების გარდა, სიმკვრივის ფაქტორის დასადგენად გამოვიყენეთ დოპანტი Zr. ცირკონიუმის წყაროდ გამოყენებულ იქნა დაფქვის მეთოდი ცირკონიუმის ორჟანგის ბურთულების საშუალებით (Inframat Advanced Materials, აშშ), სადაც ცირკონიუმის რაოდენობა რეგულირდება დაფქვის ხანგრძლივობის ცვლილებით [28]. მომზადებული ფხვნილებისგან

ნაკეთობა მიიღება ცხელი დაწნეხის მეთოდით გრაფიტის წნეხ-ფორმებში (მარკა APB, რუსეთი), რომელიც ფხვნილისგან იზოლირებულია კოლოიდური გრაფიტის – მარკა „B-1“ საშუალებით. გახურების და გაცივების სიჩქარეები, შესაბამისად, იყო 50°C/წთ და 20°C/წთ დაწნეხა მიმდინარეობდა 20 წთ-ის განმავლობაში 2000°C ტემპერატურაზე და 40 მპა წნევით. დამზადდა ცილინდრული ფორმის ნამზადები (Ø14*10 მმ). 1-ელ ცხრილში მოცემულია დაწნეხის პარამეტრები.

ცხრილი 1

ნიმუშების შედგენილობა და დაწნეხის პარამეტრები

ნიმუშის №	ნიმუშის აღნიშვნა	შედგენილობა	Zr, მას.%	¹⁰ B/ ¹¹ B, ატ.%	დაწნეხის პარამეტრები		
					T, °C	P, მპა	τ, წთ
1	B ₄ C	B ₄ C	0	20/80	2000	40,0	20
2	¹¹ B ₄ C	¹¹ B ₄ C	0	0.6/99.4			
3	¹⁰ B ₄ C90	¹⁰ B ₄ C	0	90/10			
4	¹⁰ B ₄ C50	¹⁰ B ₄ C	0	50/50			
5	B ₄ CZ07	B ₄ C-ZrB ₂	0.7	20/80			
6	B ₄ CZ1	B ₄ C-ZrB ₂	1.0	“-“			
7	B ₄ CZ2.5	B ₄ C-ZrB ₂	2.5	“-“			

2.2. ნიმუშების კვლევა

ნიმუშების კუთრი წონა გაიზომა გეომეტრიულად. ფარდობითი სიმკვრივე განისაზღვრა როგორც ლიტერატურული მონაცემების, ისე თეორიულად გაანგარიშებული სიმკვრივეების – B₄C=2.520 გ/სმ³; ¹¹B₄C=2.554 გ/სმ³; ¹⁰B₄C90=2.450 გ/სმ³; ¹⁰B₄C50=2.470 გ/სმ³; B₄CZ07=2.567 გ/სმ³; B₄CZ1=2.573 გ/სმ³; B₄CZ2.5=2.601 გ/სმ³ გამოყენებით. კერამოგრაფია მოიცავდა ნამზადების ზედაპირების გახეხვას 125÷100 მკმ მარცვლოვნების ალმასის დისკოზე და გაპრიალებას P150÷P240 მარკის სილიციუმის კარბიდის ზუმფარას ქაღალდზე პოლირების აპარატ „MIIΓ-8“-ს საშუალებით, 8000 ბრ/წთ სიჩქარით. ნიმუშებზე ელექტრონული მიკროსკოპული კვლევა ჩატარდა ფირმა „JEOL“-ის ელექტრონულ მიკროსკოპზე JSM-6510LV. ელემენტების შემცველობა (EDXA) განისაზღვრა მიკრორენტგენოსტრუქტურული ანალიზატორ X-Max^N-ის საშუალებით (Oxford Instruments, UK). მიკროსისალე

(ვიკერსი), დრეკადობის მოდული და ბზარმედეგობა გაიზომა ფირმა „SHIMADZU“-ის ხელსაწყოზე „DUH-211S“ (იაპონია) როგორც ინდენტირების, ისე დატვირთვა-განტვირთვის რეჟიმში საერთაშორისო სტანდარტ ISO-14577-ის მოთხოვნების შესაბამისად. დატვირთვა – 150 გ.

დინამიკური სისალის მნიშვნელობა დადგინდა უშუალოდ დატვირთვის პროცესში, ხელსაწყოთა პროგრამული უზრუნველყოფით, ხოლო სტატიკური ანუ რელაქსირებული სისალის დასადგენად მიღებული ანაბექტების დიაგონალები მიკროსკოპით გაიზომა (მათი სიდიდეების გასაშუალება მოხდა ავტომატურად), რომელთა საშუალებითაც ასევე პროგრამული უზრუნველყოფით გამოითვალა სისალე.

ბზარმედეგობა განისაზღვრა სტანდარტული ფორმულით [29]:

$$K_{IC} = 0.016 \sqrt{\frac{E}{H} \frac{P}{\sqrt{C^3}}} \quad (1)$$

3. შედეგები და მათი განსჯა

ნიმუშების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში. ფარდობითი სიმკვრივეების განსხვავება გამოწვეულია შემდეგი მიზეზით. ვინაიდან, კვლევის მიზანია რამდენიმე პარამეტრის გავლენის დადგენა კერამიკის ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე, ტექნოლოგიური

პარამეტრების სხვაობის შესამცირებლად შვიდივე ნიმუში დამზადდა ერთ პროცესში, დაწნეხა ჩატარდა ერთ შვიდადგილიან წნეხ-ფორმაში. მიზნობრივი კერამიკების განსხვავებულმა შედეგნილობამ და ხვედრითმა წონამ გამოიწვია მიღებული ნიმუშების სიმკვრივეების სხვადასხვაობა.

ცხრილი 2

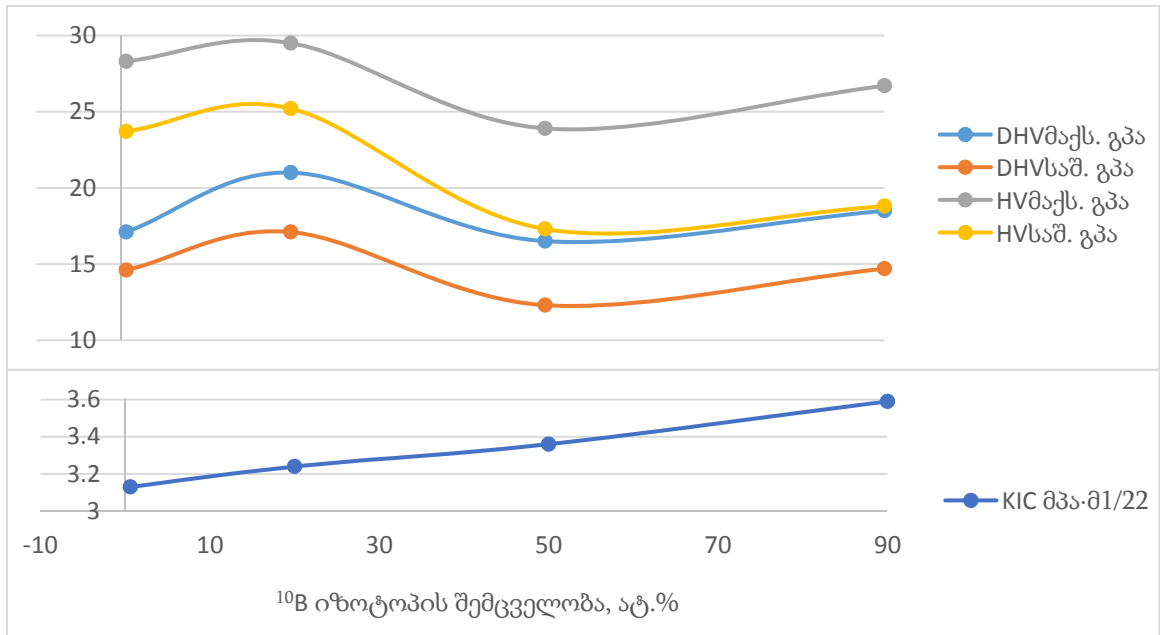
ნიმუშების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები

№	ნიმუშის აღნიშვნა	ფარდ. სიმკ. %	დინამ. სისალე, DHV _{მაქს.გაბა}	დინამ. სისალე, DHV _{საშ.გაბა}	სტატ. სისალე, HV _{მაქს.გაბა}	სტატ. სისალე, HV _{საშ.გაბა}	დრეკად. მოდ. E _{მაქს.გაბა}	დრეკად. მოდ. E _{საშ.გაბა}	ბზარმდეგობა. K _{იკმპა-მ^{1/2}}
1	B ₄ C	90.0	21.0	17.1	29.5	25.2	427	365	3,24
2	¹¹ B ₄ C	90.9	17.1	14.6	28.3	23.7	330	297	3,13
3	¹⁰ B ₄ C90	86.7	18.5	14.7	26.7	18.8	397	344	3,59
4	¹⁰ B ₄ C50	87.6	16.5	12.3	23.9	17.3	348	296	3,36
5	B ₄ CZ07	94.2	22.5	20.9	32.4	29.2	481	454	3,88
6	B ₄ CZ1	93.1	20.4	19.0	32.4	29.9	408	396	3,58
7	B ₄ CZ2.5	92.3	16.9	14.5	29.3	26.3	305	281	3,11

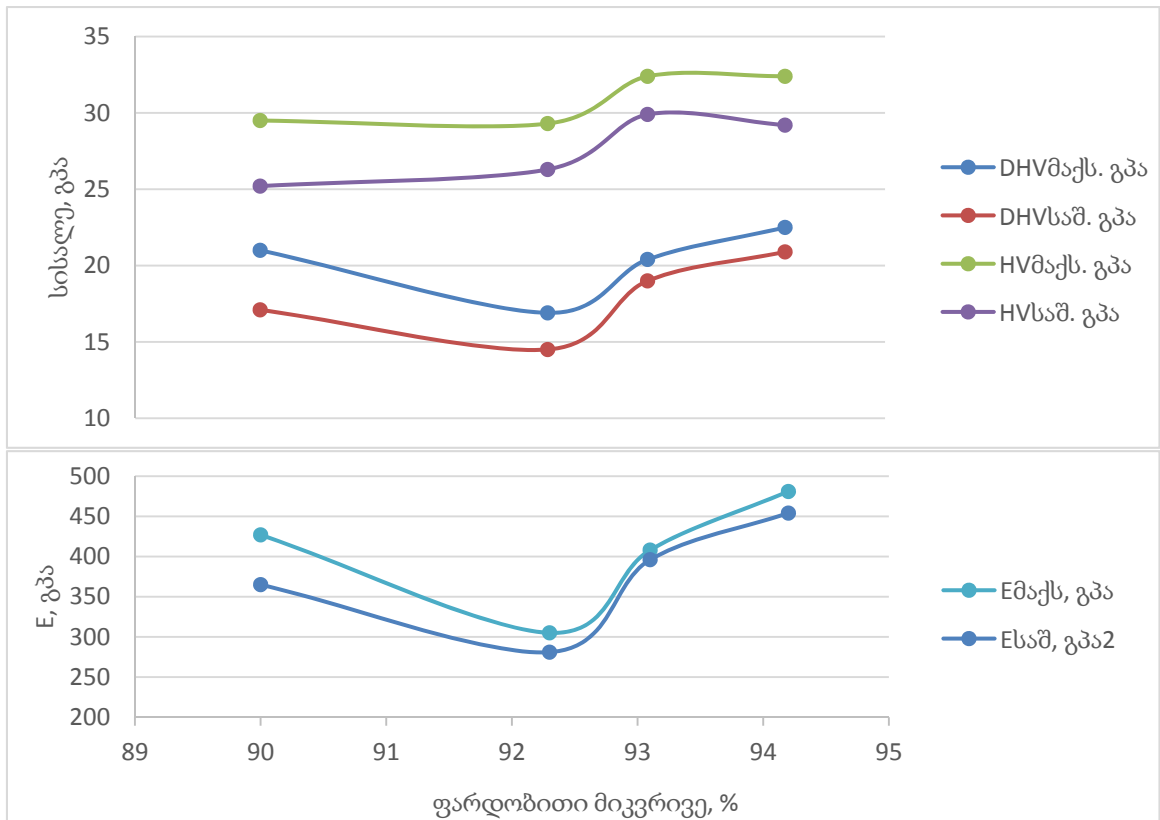
მექანიკურ თვისებებზე მოქმედი ფაქტორების გაანალიზებისთვის მოვიყვანოთ რამდენიმე დიაგრამა. მე-2 სურ-ზე მოყვანილი დიაგრამის მიხედვით იზოტოპური ეფექტი ბორის კარბიდის სისალეზე არ გამოიკვეთება. კერძოდ, როგორც ბორ-11-ით მაღალგამდიდრებულ, ისე ბორ 10-ით გამდიდრებული ბორის კარბიდებს არ აქვს გაუმჯობესებული სისალე ბუნებრივი იზოტოპური შემცველობის ბორის კარბიდთან შედარებით. ბორის კარბიდის სისალეზე უმნიშვნელოდ მოქმედებს კრისტალური მესრის პარამეტრების ცვლილება, რომელსაც იწვევს ბუნებრივი კონცენტრაციის

ცვლილება. რაც შეეხება ბზარმდეგობას, ის იზრდება ბორ-10-ის კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად, თუმცა ცალსახად იზოტოპურ ეფექტზე საუბარი ძნელია, ვინაიდან ამ შემთხვევაში ბზარმდეგობის ზრდა ემთხვევა ფორიანობის ზრდას. ფორები კი ცნობილია, როგორც ბზარის გავრცელების ერთ-ერთი ინჰიბიტორი.

მე-3 სურ-ზე დიაგრამის სახით წარმოდგენილია ბუნებრივი იზოტოპური შემცველობის ბორის კარბიდის სიმკვრივის და დოპანტის შემცველობის გავლენა მექანიკურ თვისებებზე, კერძოდ სისალესა და სიმტკიცეზე ღუნვისას.



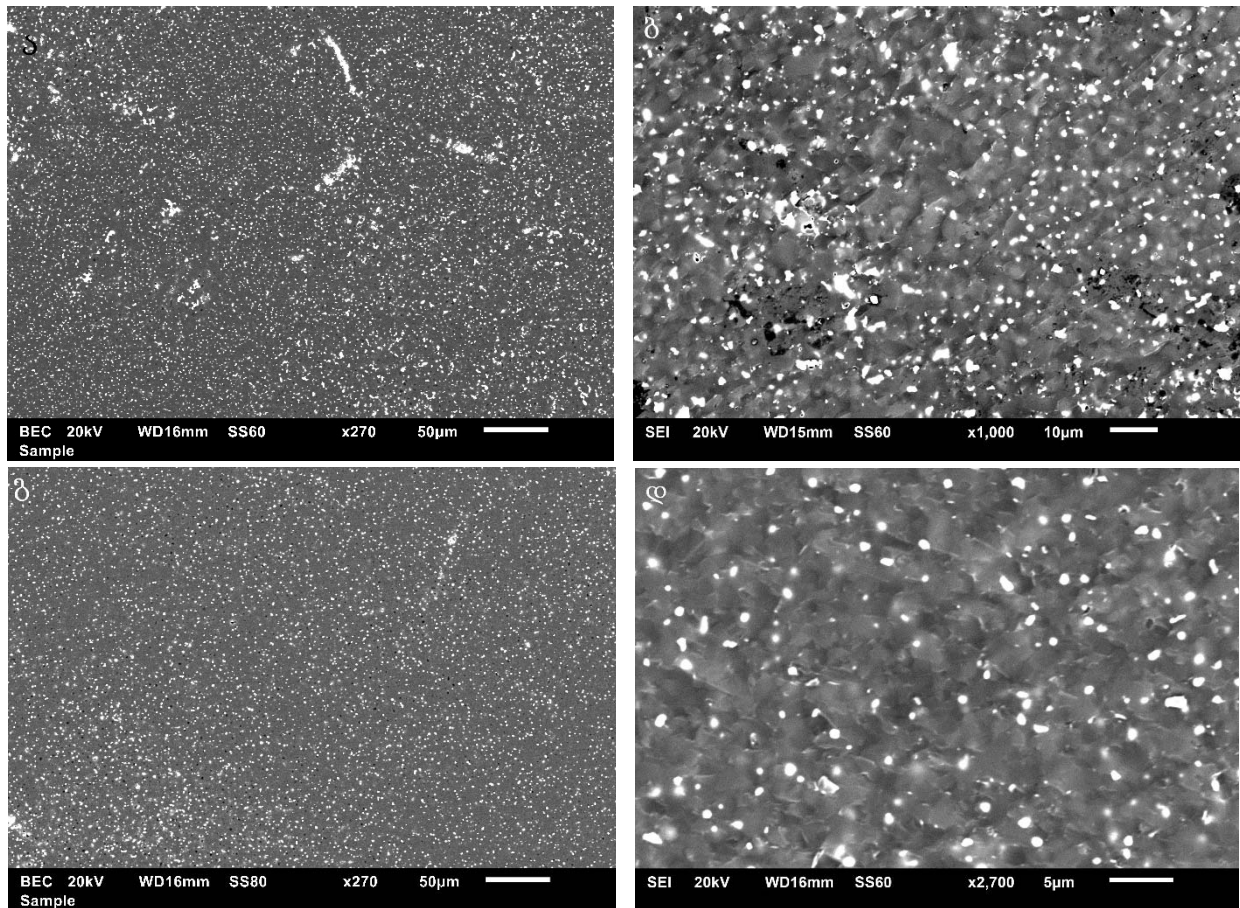
სურ. 2. ბორის იზოტოპების კონცენტრაციის დამოკიდებულება ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე



სურ. 3. ბორის კარბიდის სიმკვრივის დამოკიდებულება ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე

თავდაპირველად, სიმკვრივის მატებისას შეინიშნება სიმტკიცისა და სისალის „ჩავარდნა“, რომელიც მხოლოდ დოპანტ ელემენტს უკავშირდება. ვინაიდან ამ უკანასკნელის რაოდენობა აღემატება დისპერსიული განმამტკიცებლის ოპტიმალურ რაოდენობას [3], კომპოზიტის მიკროსტრუქტურა და, შესაბამისად, ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებები უარესდება. შემდეგი შედგენილობები – მაღალი სიმკვრივის ნიმუშები, სადაც დოპანტი ოპტიმალური რაოდენობის ფარგლებშია, ხასიათდება გაუმჯობესებული ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებებით. განსაკუთრებით აღსანიშნავია დრეკადობის მოდულის ზრდა. იზრდება ასევე დინამიკური მიკროსისალე. სტატიკური მიკროსისალის შემცირება ბოლო

ეტაპზე სავარაუდოდ გამოწვეულია სუბიექტური ფაქტორით. მისი გამოთვლის მეთოდიკა მოიცავს ანაბეჭდების გაზომვას ოპერატორის მიერ, რისი ცდომილებაც ზესალი ნიმუშებისთვის ბევრად მაღალია (ანაბეჭდის მცირე ზომის გამო), ვიდრე ხელსაწყოთა ცდომილება ნანონდენტერის ანაბეჭდის სიღრმის გაზომვის დროს. ცირკონიუმის დიბორიდის ოპტიმალური რაოდენობის გავლენა მიკროსტრუქტურაზე კარგად ჩანს მე-4 სურ-ზე. ოპტიმალური შემცველობის დროს დოპანტი ელემენტი თანაბრად ნაწილდება მატრიცაში, არ იწვევს ლოკალურ რეკრისტალიზაციას და განაპირობებს სტაბილურ, გაუმჯობესებულ ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებს.



სურ.4. კომპოზიტების რასტრული მიკროსკოპული სურათები:
 ა-ბ - B₄CZ2.5, გ-დ - B₄CZ07

3. დასკვნა

ცხელი დაწნევის მეთოდით მიღებულია სხვადასხვა იზოტოპური შემცველობის B₄C-ის კერამიკული ნიმუშები დანამატებით და დანამატების გარეშე 2000°C ტემპურატურაზე და 40 მპა წნევით.

შესწავლილია იზოტოპური ეფექტი, დოპანტი ელემენტის და სიმკვრივის გავლენა კერამიკების ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე.

იზოტოპური ეფექტი ბორის კარბიდის სისალეზე არ არის მკაფიოდ გამოკვეთილი. კერძოდ, ბორის იზოტოპებით გამდიდრებულ ბორის კარბიდებს არ აქვს გაუმჯობესებული სისალე, ბუნებრივი იზოტოპური შემცველობის ბორის კარბიდთან შედარებით. ბორის კარბიდის სისალეზე უმნიშვნელოდ მოქმედებს კრისტალური მესრის პარამეტრების ცვლილება, რომელსაც იწვევს ბუნებრივი კონცენტრაციიდან გადახრა.

ზხარმედეგობაზე ძირითადად მოქმედებს ფორმის რაოდენობა, რაც ზხარის გავრცელების ერთ-ერთი ინჰიბიტორია.

კერამიკების სიმკვრივის ზრდით იზრდება სისალე და დრეკადობის მოდული. ფიზიკურ-ტექნიკურ მახასიათებლებზე ასევე მოქმედებს დოპანტის ოპტიმალური რაოდენობა, რომელიც განაპირობებს მიკროსტრუქტურის დახვეწას, სისტემის სტაბილურობასა და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გაუმჯობესებას.

ლიტერატურა

1. I.A. Bairamashvili, M.V. Galustashvili, J.Sh. Jobava, V.G. Kvatchadze, Z.Z. Mestvirishvili. Composite ceramics based on boron carbide enriched in isotope ¹¹B as a promising radiation resistant structural material – in Russian. *Nano Studies*, vol. 8 (2013), 305-310.
2. Vladislav Domnich, Sara Reynaud, Richard A. Haber, and Manish Chhowalla. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. *J. Am. Ceram. Soc.*, 94 (11) (2011), 3605–3628 .
3. Zviad Mestvirishvili, Irakli Bairamashvili, Vakhtang Kvatchadze and Nugzar Rekhviashvili. Thermal and Mechanical Properties of B₄C-ZrB₂ Ceramic Composite. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 5 (9-10) (2015), 385-393.
4. Kevin Gillet, Guido Roma, Jean-Paul Crocombette, Dominique Gosset. The influence of irradiation induced vacancies on the mobility of helium in boron carbide. *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 512 (2018), 288-296.
5. Dominique Gosset, Bernard Kryger, Jean-Pierre Bonal, Caroline Verdeau, Karine Froment. Evolution of thermo-physical properties and annealing of fast neutron irradiated boron carbide. *Journal of Nuclear Materials* Vol. 500(2018), 166-175.
6. Yu.A.Bykovskii, K.N.Zatsev, P.D.Kervalishvili, I.N. Nikolaev, A.A.Portnov, S.O.Shalamberidze. Neutron fluence sensor based on boron carbide. *Technical Physics Letters*, Vol. 19, Issue 7 (1993), 457-458.
7. P.J.Kervalishvili, G.S.Karumidze, Sh.Sh.Shavelashvili, G.I.Kalandadze, S.O.Shalamberidze. Semiconductor sensor for neutrons. *Sensors and Actuators A*, 36 (1993), 43-45.
8. P.D.Kervalishvili, S.O.Shalamberidze Yu.A.Bykovskii. Oriented boron carbide films produced by laser spraying. *American Institute of Physics*, (1991), 524-527.
9. S. N. Perevislov,1,3 P. V. Shcherbak,1 and M. V. Tomkovich. HIGH DENSITY BORON CARBIDE CERAMICS. *Refractories and Industrial Ceramics. Vol. 59. No.1. 2018 33-37.*
10. Helmut Werheit, Murli H. Manghni, Udo Kuhlmann, Anwar Hushur, Sul Khan Shalamberidze. Mode Grüneisen parameters of boron carbide. *Solid State Sciences*, 72 (2017), 80-93.
11. Akihiro Nino, Ayumi Tanaka, Shigeaki Sugiyama and Hitoshi Taimatsu. Indentation Size Effect for the Hardness of Refractory Carbides. *Materials Transactions*, Vol. 51, No. 9 (2010), 1621-1626.
12. Atta U. Khan, Vladislav Domnich, and Richard A. Haber. Boron carbide-based armors: Problems and possible solutions. *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 96, No. 6, 30-36.
13. Kovziridze, Z., Mestvirishvili, Z. Tabatadze, G., Nizharadze, N., Mshvildadze, M. and Nikoleishvili, E. Improvement of Boron Carbide Mechanical Properties in B₄C-TiB₂ and B₄C-ZrB₂ Systems. *Journal*

- of Electronics Cooling and Thermal Control. Vol.3 No2 (2013) 43–48.
14. В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Ключков, В.Б. Пономаренко, Е.М. Муралева, Т.М. Гусева, Порлощающие материалы стержней управления ядерных реакторов. Ульяновск 2012, 57-95.
 15. T.G.Abzianidze, A.M.Eristavi, S.O. Shalamberidze. Strength and Creep in Boron Carbide (B₄C) and Aluminum Dodecaboride (α -AlB₁₂). Journal of Solid State Chemistry, Volume 154, Issue 1 (October 2000), 191-193.
 16. B. Malmal Moshtaghioun, Diego Gomez-Garcia, Arturo Dominguez-Rodriguez. Richard I. Todd. Grain size dependence of hardness and fracture toughness in pure near fully-dense boron carbide ceramics. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 36 Issue 7, (2016) 1829–1834.
 17. G.I.Kalandadze, S.O.Shalamberidze, A.B.Peikrishvili. Sintering of Boron and Boron Carbide. Journal of Solid State Chemistry, Vol. 154, N. 1 (2000), 194-198.
 18. Helmut Werheit and Sulkhan Shalamberidze. Advanced microstructure of boron carbide. Journal of Physics Condensed Matter, Volume 24, Number 38 (2012), 385-406.
 19. Tadashi MARUYAMA, Shoji ONOSE, Takeji KAITO & Hiroto HORIUCHI. Effect of Fast Neutron Irradiation on the Properties of Boron Carbide Pellet. Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 34, No. 10 (October 1997), 1006-1014.
 20. Yuko MOROHASHI, Tadashi MARUYAMA, Takako DONOMAE, Yoshiaki TACHI and Shoji ONOSE. Neutron Irradiation Effect on Isotopically Tailored 11B₄C. Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 45, No. 9, (2008), 867–872.
 21. Tao Jianga, Haiyun Jinb, Zhihao Jina, Jianfeng Yanga and GuanJun Qiaoa. An investigation of the mechanical property and thermal shock behavior of machinable B₄C/BN ceramic composites. Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 10, No. 1 (2009), 113-116.
 22. B. Malmal Moshtaghioun, Angell. Ortiz, Diego-Gómez-García, Arturo Domínguez-Rodríguez. Toughening of super-hard ultra-fine grained B₄C densified by spark-plasma sintering via SiC addition. Journal of the European Ceramic Society, Volume 33, (2013) 1395–1401.
 23. Matthew DeVries, Ghatu Subhash. Influence of carbon nanotubes as secondary phase addition on the mechanical properties and amorphization of boron carbide. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 39 Issue 6, (2019) 1974–1983.
 24. T. S. R. CH. MURTHY, SAIRAM ANKATA, J. K. SONBER, K. SAIRAM, KULWANT SINGH, A. NAGARAJ, P. SENGUPTA, R. D. BEDSE, SANJIB MAJUMDAR, VIVEKANAND KAIN. MICROSTRUCTURE, THERMO-PHYSICAL, MECHANICAL AND WEAR PROPERTIES OF IN-SITU FORMED BORON CARBIDE – ZIRCONIUM DIBORIDE COMPOSITE. Ceramics-Silikáty 62 (1), 15-30 (2018).
 25. Zviadi Mestvirishvili, Vakhtang Kvatchadze, Irakli Bairamashvili, Nikoloz Jalabadze and Tornike Mestvirishvili. Development of the method of production of the ultrafine macrohomogeneous composite powder. Materials Science and Technology Vol. 36, Issue 3 (2020) 327-333.
 26. T. Abzianidze. G. Karumidze. L. Kekelidze. Effect of Boron Isotopic Composition on Boron Carbide Microhardness. Bulletin of The Georgian Academy of Sciences 169. No.2 (2004) 338-340.
 27. Yoshimasa NISHI, Yuji ARITA, Tsuneo MATSUI, Takanori NAGASAKI. Isotope Effects on Thermal Conductivity of Boron Carbide. Journal of Nuclear Science and Technology. Vol. 39, No. 4 (2002), 391–394.
 28. Zviadi Mestvirishvili, Vakhtang Kvatchadze, Irakli Bairamashvili, Nikoloz Jalabadze, Tornike Mestvirishvili. Development of the method of production of the ultrafine macrohomogeneous composite powder. Materials Science and Technology. Vol. 36, Issue 3 (2020) 323-333.
 29. Anstis, G.R., Chantikul, P., Lawn, B. R. and Marshall, D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness – I. Direct crack measurements. J. Am. Ceram. Soc., 64 (1981), 533-538.

THE EFFECT OF VARIOUS FACTORS ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF B₄C

Z. Mestvirishvili^{1,2}, N. Nizharadze¹, S. Gvazava^{1,3}, Z. Kovziridze¹

¹Institute of Bionanoceramic and Nanocomposite Technology. Georgian Technical University. Str Costava 69. 0160 Tbilisi. Georgia

²LEPL Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology, Mindeli St.7. Tbilisi, 0186, Georgia

³Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute. Str. Mindeli 8b. 0186 Tbilisi. Georgia

E-mail: zviad.mst@gmail.com

Resume: *Purpose.* The purpose of the study is to study the effect of boron isotope concentration, additives and density on the mechanical properties of boron carbide products.

Method. ceramic samples were prepared by hot pressing at 2000 ° C and under a pressure of 40 MPa. Scanning microscopic examination was performed. The physical and mechanical characteristics of the ceramics have been determined.

Result. The effect of density, isotopic composition and additives on the physical and mechanical properties of boron carbide ceramics was determined.

Conclusion. The isotope effect on boron carbide hardness is not clearly defined. In particular, boron carbides enriched in boron isotopes do not have improved hardness compared to naturally isotopic boron carbide. The hardness of boron carbide is slightly affected by changes in the parameters of the crystalline structure, which is caused by a deviation from the natural concentration. Crack resistance is mainly influenced by the number of pores, which is one of the inhibitors of crack propagation. The hardness and modules of resilience increase with increase the density of the ceramics. The optimal amount of dopant also affects the physical and mechanical characteristics, which contributes to the refinement of the microstructure, the stability of the system and the improvement of the physical-mechanical characteristics.

Key words: Boric carbide; isotope effect; Young's Modulus; density.
