

უაკ 543.226:620.181.4

თერმული დამუშავების გავლენა ცხელი დაწნებით მიღებულ $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის ნაკეთობაზე

ზ. მესტირიშვილი^{1,2}, შ. ზურაბიშვილი^{1,2}, თ. მესტირიშვილი^{1,2}, ხ. ზლუაშვილი¹, ა. სიჭინავაძე³, ნ. ჯალაბაძე²

¹ საქართველოს მაღალი ტექნოლოგიების ეროვნული ცენტრი, საქართველო, 0186, თბილისი, ქავთარაძის 46,

² საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0175, თბილისი, კოსტავას 77

³ სოხუმის ილია ვეკუას ფიზიკა-ტექნიკის ინსტიტუტი, საქართველო, 0186, თბილისი, მინდელის 7

E-mail: zviad.mst@gmail.com

რეზიუმე: მიზანი. კვლევის მიზანია იზოტოპ ბორ-10-ით გამდიდრებული ბორის კარბიდის ნაკეთობების თერმული დამუშავების გავლენის შესწავლა ნაკეთობების ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებზე.

მეთოდი. ნამზადების მისაღებად გამოყენებული იქნა ცხელი დაწნების მეთოდი ვაკუუმში 2100°C ტემპერატურაზე და 30 მპა წნევის ქვეშ. ნიმუშები თერმულად დამუშავდა 1800°C ტემპერატურასა და 10^{-4} პა წნევის პირობებში. ჩატარდა ოპტიკური და რასტრული მიკროსკოპული კვლევა. შესწავლილ იქნა კერამიკების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

შედეგი. დადგინდა იქნა თერმული დამუშავების გავლენა ბორის კარბიდის კერამიკის მექანიკურ დამუშავებადობაზე, ზხარმედგობაზე, სისალეზე, დრეკადობის მოდულსა და მექანიკურ სიმტკიცეზე.

დასკვნა. თერმულად დამუშავების შედეგად გაუმჯობესდა მასალის მექანიკური დამუშავებადობა, შემცირდა ამონატეხების ზომა და რაოდენობა. მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე გაიზარდა 33%-ით. მკვედრად გაუმჯობესდა მიკროსისალე და დრეკადობის მოდული დაბალ დატვირთვებზე. მაღალ დატვირთვებზე ეს ტენდენცია შემცირდა. მაკროსისალის გაურესება ლოგიკურ კავშირშია დიდ დატვირთვებზე ზხარმედგობის გაზრდასთან, რასაც ასევე ადასტურებს გაუმჯობესებული დამუშავებადობა.

ზემოაღნიშნული სავარაუდოდ გამოწვეულია თერმული დამუშავების შედეგად მიკრომაბების მოხსნით, მიკროსტრუქტურული ჰომოგენიზაციით და სტაბილიზაციით. მაღალ დატვირთვებზე მეტალთა მსგავსად შეიმჩნევა „მოშვება“ - სისალის შემცირება და ზხარმედგობის გაზრდა.

საკვანძო სიტყვები: ბორის კარბიდი; ნეიტრონების შთანთქმელი; ზხარმედგობა; სისალე; ბორის კარბიდის თერმული დამუშავება.

1. შესავალი

ბორის კარბიდი, თავისი უნიკალური თვისებების გამო მნიშვნელოვანი მასალაა ტექნიკის სხვადასხვა სფეროსთვის. განსაკუთრებით აღსანიშნავია მისი გამოყენება ატომურ ტექნიკაში, სადაც შეუცვლელი შთანთქმელი მასალაა ბირთვულ რეაქტორებში. სხვადასხვა გამდიდრების $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -გან მზადდება ნეიტრონების შთანთქმელი ელემენტები როგორც ფხვნილის, ისე ნაკეთობების სახით ბირთვული რეაქტორების მარეგულირებელი და ავარიული დაცვის ღეროებისთვის [1-3]. $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის ფირები გამოიყენება ნეიტრონული ნაკადის ნახევარგამტარული სენსორების წარმოებაში [4-6].

ბორის კარბიდის მაღალი სისალე ($30-38\text{გ/სმ}^3$) და დაბალი კუთრი წონა ($2,51\text{ გ/სმ}^3$) განაპირობებს მის გამოყენებას ელიტარულ ჯავშანში [7], მისგან მზადდება როგორც მსუბუქი ტექნიკის და შვეულმფრენების ჯავშანი, ისე ჯავშანჩილეტები. მაღალი სისალის გამო ის გამოიყენება აბრაზიულ მასალებში, მისგან მზადდება აბრაზიული ფხვნილები, პასტები და ნაკეთობები [2, 3, 8, 9].

ბორის კარბიდი მაღალი მექანიკური სიმტკიცით ხასიათდება, მისი დრეკადობის მოდული $296-460\text{ გპა-ია}$ [2, 8, 10]. აღნიშნული მახასიათებელი იზრდება ბორის კარბიდის ჰომოგენურობის ზღვრებში ($\text{B}_{3.5}\text{C}-\text{B}_{6.5}\text{C}$) ნახშირბადის მატებასთან ერთად [1]. ბორის კარბიდს ასევე მაღალი აქვს სიმტკიცე კუმშვასა და ღუნვაზე [2, 11].

ბორის კარბიდის მაღალი სიმკვრივის და სიმტკიცის ნამზადების მიღება რთულია მისი ხისტი კოვალენტური ბმების და დაბალი პლასტიკურობის გამო [12]. მკვრივი ნაკეთობის მისაღებად გამოიყენება ცხელი დაწნევა $1800-2200^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე და 40 მპა წნევაზე, შეცხოვა მაღალი წნევის ქვეშ (აფეთქება) და სხვა მეთოდები [10, 12, 13].

ბორის კარბიდი ხასიათდება იკოსაედრების შემცველი რომბოედრული სტრუქტურით. მას არ გააჩნია შორეული მოწესრიგებულობა, ეს კი განაპირობებს კრისტალური მესრის დაბალ სიმკვრივეს და დეფექტებს. ბორის კარბიდის სტრუქტურის

ნაკლოვანებები აისახება მის სიმციფესა და ზზარმედეგობაზე. ზზარმედეგობა კერამიკის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია და ზორის კარბიდისთვის შეადგენს 2-3 MPa/m-ს. ამ მაჩვენებლით ის ჩამორჩება ყველა მოწინავე კერამიკას [2].

დაბალი ზზარმედეგობა უარყოფითად მოქმედებს როგორც მის მექანიკურ დამუშავებადობაზე, ისე მის მდგრადობაზე თერმული და მექანიკური დარტყმების მიმართ. მაღალი სიმციფის გამო $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ის შთანმთქმელი ნაკეთობა ვერ უძლებს ძაბვებს, რომლებიც წარმოიქმნება ნეიტრონულ ველში რადიაციის გამო. [14] სამუშაოს მიხედვით ზორის კარბიდის გაბერვა (swelling- $V/\Delta V$) პირდაპირპროპორციულია ერთეულ მოცულობაში n , α რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი ჰელიუმის ატომების როდენობისა. [15] 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 გაბერვაც - 1% არ არის გამოწვეული მხოლოდ n , α რეაქციით. [4] სამუშაოს მიხედვით კრისტალური მესრის დეფექტებს იწვევს როგორც 2.79MeV ენერგიის მქონე α ნაწილაკებით შიგა ზომბარდირება, ისე სწრაფი ნეიტრონების ნარჩენი ფონი. [10]-ს ავტორების მიხედვით ნეიტრონული დასხივება წარმოშობს როგორც თერმულ ძაბვებს, ისე მექანიკურს. ეს უკანასკნელი გამოწვეულია ჰელიუმის ბუშტების გაერთიანების შედეგად ფორების სახით, რომლებიც ქმნიან ჯაჭვებს და იწვევენ მიკრო და მაკრო ზზარებს.

მაღალი ზზარმედეგობა აუცილებელია $^{11}\text{B}_4\text{C}$ -ისთვის, რომელიც ერთ-ერთ პერსპექტიულ მასალად მოიაზრება ნეიტრონულ ველში ხახუნის კვანძებში სამუშაოდ [16].

ზორის კარბიდზე ჩატარებული სამუშაოების დიდი ნაწილი ეძღვნება ზზარმედეგობის გაუმჯობესებას, რის მისაღწევადაც გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდები. ესენია ლეგირება, ზორის კარბიდის ნანოფხვნილების და ნანობოჭკოების გამოყენება, კომპოზიტების დამუშავება ზორის კარბიდის ბაზაზე და სხვა [2, 8, 9, 17, 18].

ზემოთ ჩამოთვლილი კვლევების გარდა, საწარმოო პრაქტიკაში ვხვდებით ზორის კარბიდის ნაკეთობების თერმულ დამუშავებას მისი თვისებების გასაუმჯობესებლად, თუმცა ინფორმაცია აღნიშნული მიმართულებით სამეცნიერო კვლევებზე ძალიან მწირია [2].

ჩვენი სამუშაოს მიზანია შევისწავლოთ ზორ-10-ით მაღალგამდიდრებული ზორის კარბიდის ნაკე-

თობების თერმული დამუშავების გავლენა მის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე.

2. ექსპერიმენტული ნაწილი

2.1. ნიმუშების დამზადება

საკვლევი ნიმუშების დასამზადებლად გამოვიყენეთ საქართველოს მაღალი ტექნოლოგიების ეროვნულ ცენტრში წარმოებული ზორის კარბიდის ფხვნილი შემდეგი მახასიათებლებით ^{10}B - 85.3 ატ.%, B - 77.5 მას.%, C - 22.3 მას.%, Fe - 0.1 მას.%, Si - 0.05 მას.%, D_{90} - 7.5 მკმ, D_{50} - 3.2 მკმ, D_{10} - 0.8 მკმ.

ცილინდრული ნიმუშები ზომით D24X27 მმ დამზადდა ცხელი დაწნების მეთოდით გრაფიტის წნებ ფორმებში 2100°C ტემპერატურასა და 30 მპა წნევაზე. გახურებისა და გაცივების სიჩქარეები შესაბამისად იყო 50°C/წთ და 20°C/წთ-ისა. ნიმუშების ერთ ნაწილს დამაბულობის მოსახსნელად ჩაუტარდა თერმული დამუშავება ვაკუუმურ ღუმელში შერჩეული რეჟიმით ($T_{\text{დაჟს}}=1800^\circ\text{C}$, $P=10^{-2}$ პა). ნიმუშების ორივე ჯგუფი (თერმულად დამუშავებული და დაუმუშავებელი) მექანიკურად დამუშავდა ალმასის ინსტრუმენტით D23,5X25 მმ ზომებამდე დასაყვანად.

2.2. ნიმუშების კვლევა

ნიმუშების კუთრი წონა და ფარდობითი სიმკვრივე განისაზღვრა გეომეტრიული ზომების მიხედვით მექანიკური დამუშავების შემდეგ.

კერამოგრაფია მოიცავდა ნიმუშების ზედაპირების გახეხვას პოლირების აპარატზე P180-220 მარკის სილიციუმის კარბიდის ზუმფარას ქაღალდით და ელექტროქიმიურ ამოჭმას 1%-იანი NaOH-ის წყალხსნარით 5-10 ვ ძაბვის და 200-300 მა დენის ძალის პირობებში.

მაღალი ფორიანობის გამო ნიმუშების ელექტროქიმიური ამოჭმა გართულდა. უკეთესი შედეგი მიღწეული იქნა ნიმუშების თერმული დამუშავებით (თერმული ამოჭმა). ზედაპირების მიკროსკოპული კვლევა ჩატარდა როგორც ფირმა „MEIJI TECHNO“-ს ინვერსიულ მეტალურგიულ ოპტიკურ მიკროსკოპზე „IM 7100“, ისე ფირმა „JEOL“-ის ელექტრონულ მიკროსკოპზე JSM-6510LV. სტატიკური/დინამიკური მიკროსისალე და დრეკადობის მოდული გაიზომა ფირმა „SHIMADZU“-ს ხელსაწყო „DUH-211S“-ზე სტანდარტული მეთოდით [2]. გამოცდა ჩატარდა 10 სხვადასხვა დატვირთვის პირობებში. თითოეულ დატვირთვაზე აღებული იყო 10-20 ანაბეჭდი.

ზხარმდეგობა განისაზღვრა ასევე სტანდარტული ფორმულით [19], „DUH-211S“ ხელსაწყოზე მიღებული მახასიათებლების გამოყენებით.

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

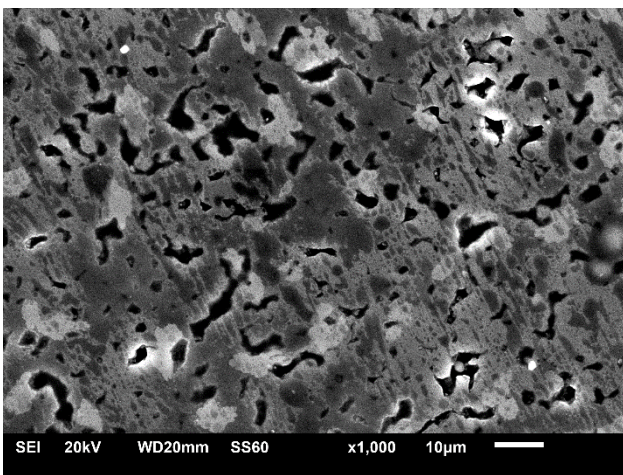
ნიმუშების გამოცდა კუმშვაზე ჩატარდა „MC-1000“ ტიპის ჰიდრაულიკურ წნეხზე.

3. შედეგები და მათი განსჯა

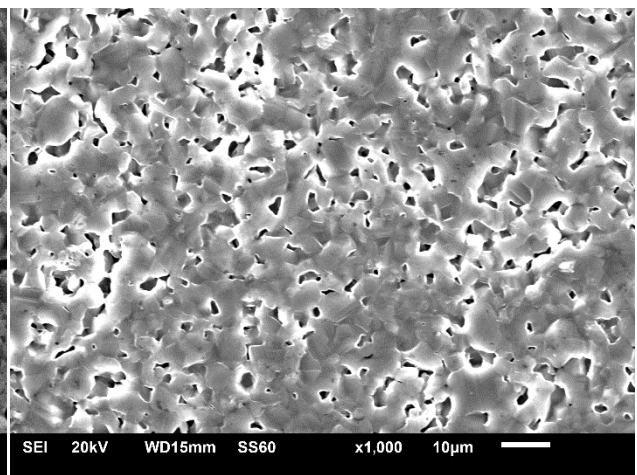
თერმულად დამუშავების შემდეგ ნიმუშების ზომები არ შეცვლილა. წონა შემცირდა 0,1%-ით.

წონის შემცირება სავარაუდოდ გამოწვეულია მაღალტემპერატურული რაფინირებით.

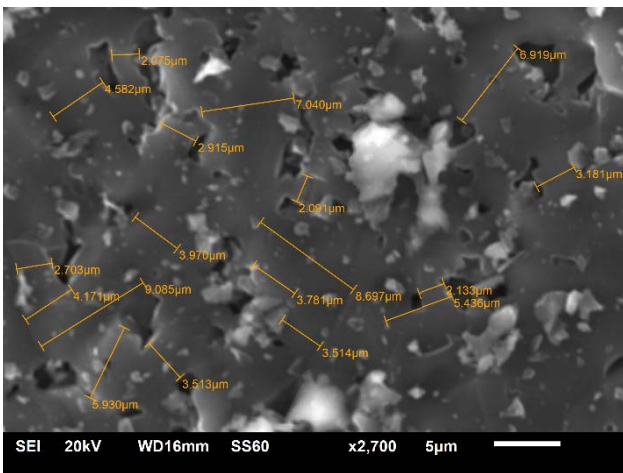
სურათ 1-ზე მოცემულია თერმულად დაუმუშავებელი ნიმუშის (TUHS) გაპრიალებული ზედაპირი შემდგომი ელექტროქიმიური ამოჭმით (ა) და TUHS-ის ტეხი (ბ), გაპრიალებული ნიმუშის ზედაპირი შემდგომი თერმული დამუშავებით (გ), გაპრიალებული და ელექტროქიმიურად ამოჭმული ნიმუშის ზედაპირი შემდგომი თერმულად დამუშავებით (დ).



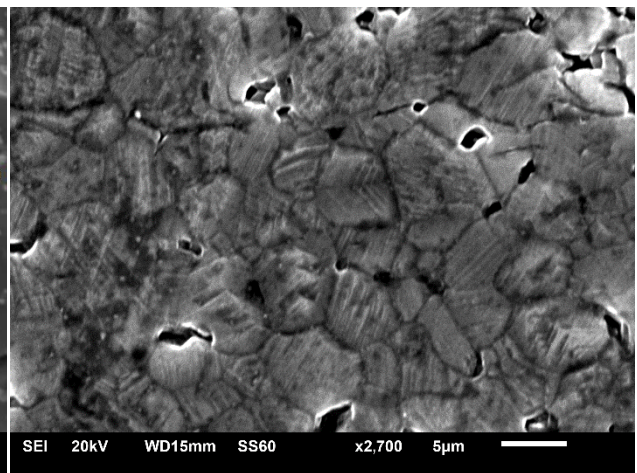
ა



ბ



გ



დ

სურ. 1. TUHS-ისდა THS-ისზედაპირები და ტეხი

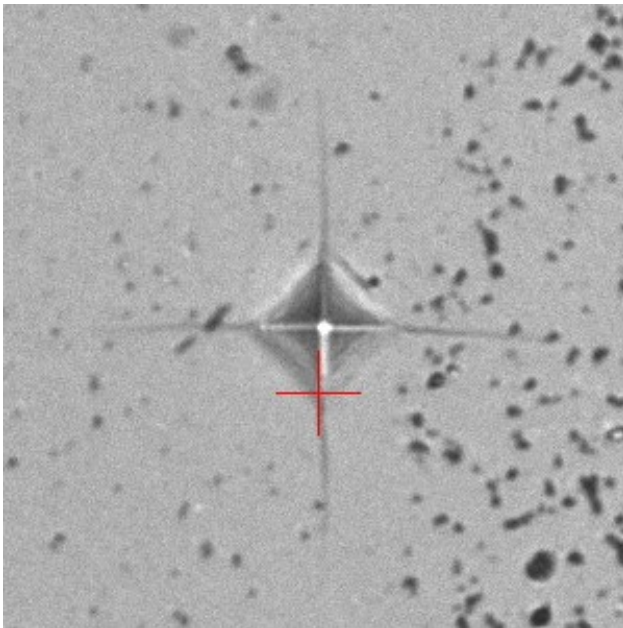
როგორც ვხედავთ, ფორიანი ბორის კარბიდის კერამიკის კერამოგრაფიისთვის უკეთესია თერმული ამოჭმის მეთოდი. ა და ბ სურათებზე მარც-

ვლის საზღვრები არ ჩანს, თუმცა ფორიანობის მიხედვით შეიძლება მსჯელობა, რომ მარცვლის ზომა უმეტეს შემთხვევაში არ აღემატება 5 მკმ-ს.

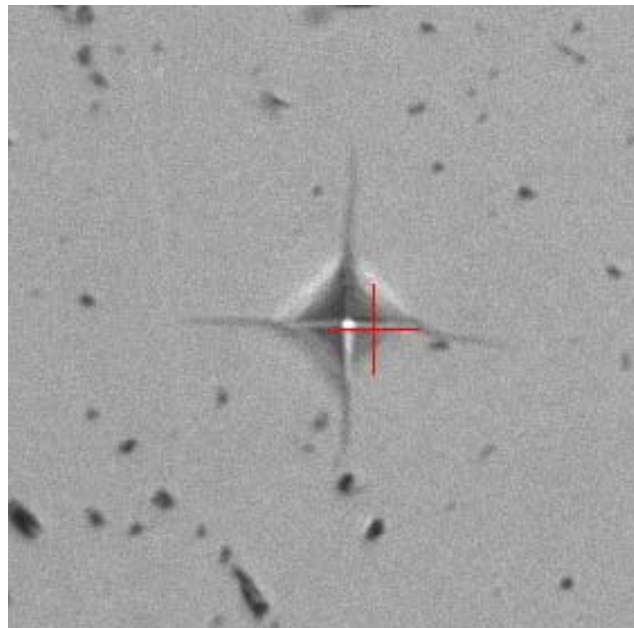
ფორები თანაბრად განაწილებულია. მათი საშუალო ზომა 2-4 მკმ-ია. ბ სურათზე ჩანს რომ ძირითადი მარცვალი 3-5 მკმ-ია, თუმცა არის შედარებით დიდი 7-9 მკმ ზომის მარცვლებიც. გ და დ სურათზე კარგად ჩანს მარცვლის საზღვრები, მარცვლების უმეტესობა 5 მკმ-ს არ აღემატება. იშვიათ შემთხვევაში არის 10 მკმ ზომის მარცვლები. როგორც ჩანს, თერმულად დამუშავების შემდეგ მარცვლის ზომა თითქმის არ გაზარდილა. ორივე შემთხვევაში, კერამიკებში საშუალო მარცვალი დაახლოებით ორჯერ აღემატება საწყისი

ფხვნილის მარცვლის ზომას. შეინიშნება ბორის კარბიდის მახასიათებელი მრჩობლები.

სურათ 2-ზე მოყვანილია ვიკერსის ინდენტერის ანაბეჭდები TUHS (ა) და THS (ბ) ნიმუშებზე, 150 გადატვირთვის დროს. ანაბეჭდების ზომა და ფორმა ერთნაირია, ორივე ნიმუშს ახასიათებს ბორის კარბიდისთვის დამახასიათებელი სწორი ბზარები. THS-ის შემთხვევაში ბზარების სიგრძე გაცილებით ნაკლებია TUHS-თან შედარებით, რაც THS-ის შედარებით მაღალ ბზარმედეგობაზე მეტყველებს.



ა



ბ

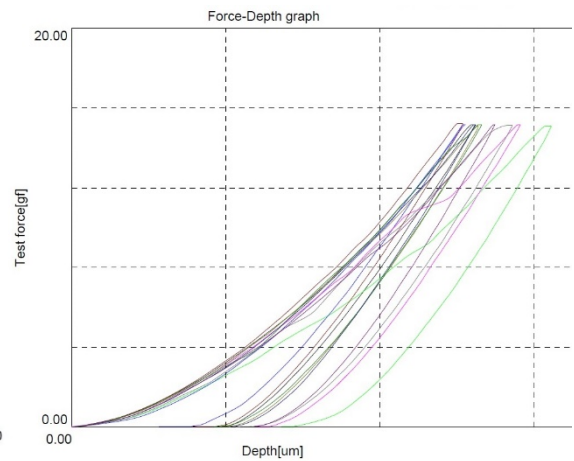
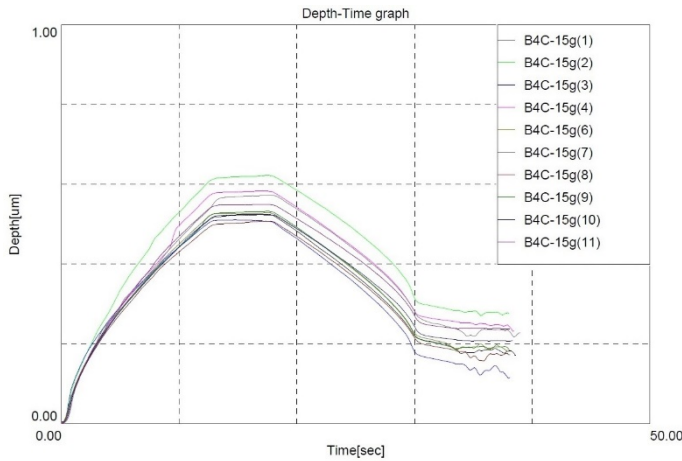
სურ. 2. ინდენტერის ანაბეჭდები TUHS-ის (ა) და THS-ის პოლირებულ ზედაპირზე

სურათ 3-ზე მოყვანილია გრაფიკები, რომლებსაც იძლევა სისალის მზომი ხელსაწყო პროგრამა.

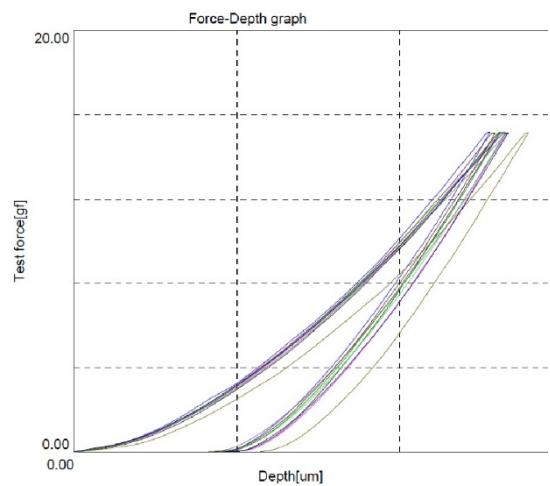
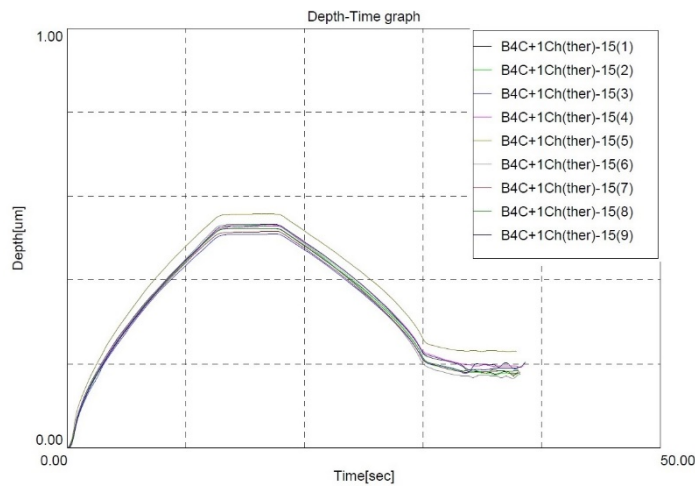
მარცხნივ მდებარე გრაფიკები ასახავს ანაბეჭდის სიღრმის ცვლილებას ტესტირების დროის მიხედვით. მარჯვნივ მდებარე გრაფიკები კი ასახავს ანაბეჭდის სიღრმის ცვლილებას დატვირთვის მიხედვით. TUHS-ის გრაფიკები გაბნეულია და არასტაბილური. რამდენიმე ადგილას შეიმჩნევა ინდენტერის ჩავარდნები. THS-ის გრაფიკები სტა-

ბილურია. ანაბეჭდების საშუალო სიღრმე როგორც დატვირთვის ქვეშ ისე განტვირთვის შემდეგ, ნაკლებია THS-ში. შესაბამისად მაღალია როგორც დინამიკური, ისე სტატიკური სისალე (ეს უკანასკნელი არ არის გაზომილი ანაბეჭდის ზომის სიმცირის გამო).

ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გაზომვის ძირითადი შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.



ა



ბ

სურ. 3. სისალის და იუნგის მოდულის გაზომვის პარამეტრების დამოკიდებულების გრაფიკები TUHS-სა (ა) და THS-სთვის (ბ). დატვირთვა 15 გ

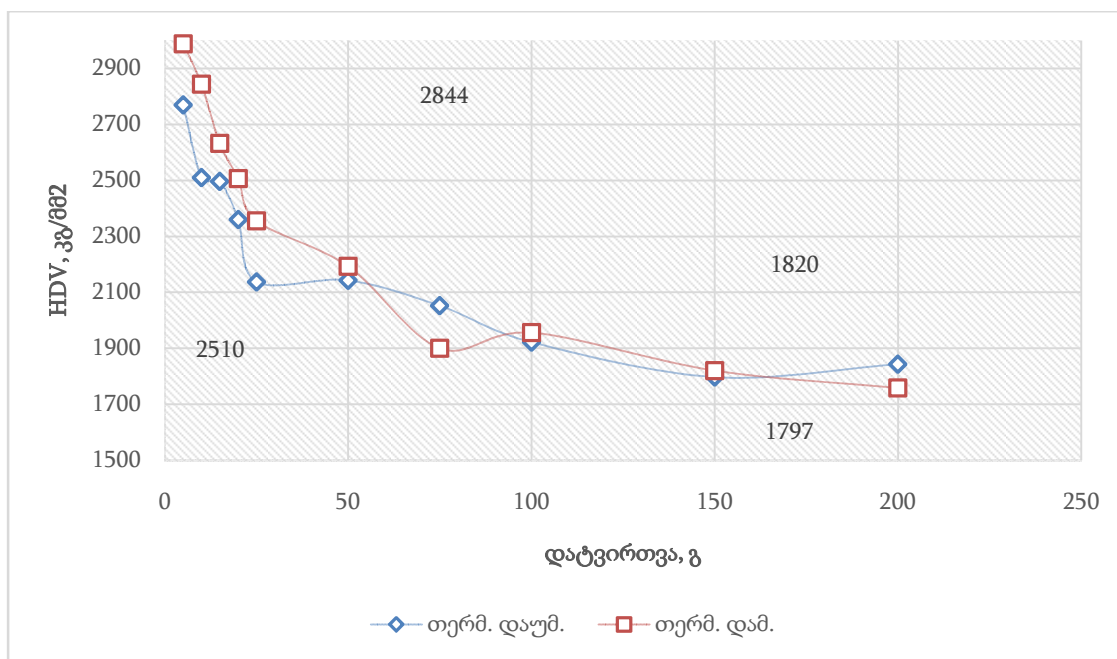
85-90% ფარდობითი სიმკვრივე აუცილებელია ბორის კარბიდის შთამნთქმელი ელემენტისთვის და გამიზნულად იქნა მიღებული. ღია ფორების საშუალებით ფორიანი მასალიდან გამოდის n , α რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი ჰელიუმი და მასალა ნაკლებად იბერება. ფორიანობის შემდგომი მომატებით მექანიკური სიმტკიცე საგრძნობლად მცირდება. კუმშვაზე სიმტკიცის მაჩვენებელი მიღებულ კერამიკებს დაბალი აქვს სხვა კვლევებში მოყვანილ მონაცემებთან შედარებით [2], რაც გამოწვეულია ნიმუშების ფორიანობით [10]. თერმუ-

ლად დამუშავებულ ნიმუშებს აღნიშნული მახასიათებელი 33%-ით გაუმჯობესებული აქვს.

ცხრილში მოყვანილი დანარჩენი მახასიათებლები შეესაბამება ერთ დატვირთვას (100 გ). აღნიშნულ დატვირთვაზე ყველა მახასიათებელი გაუმჯობესებულია თერმული დამუშავების შემდგომ. თითოეულ დატვირთვაზე გაზომილი მახასიათებლები წარმოდგენილია გრაფიკების სახით სურათებზე 4, 5, 6.

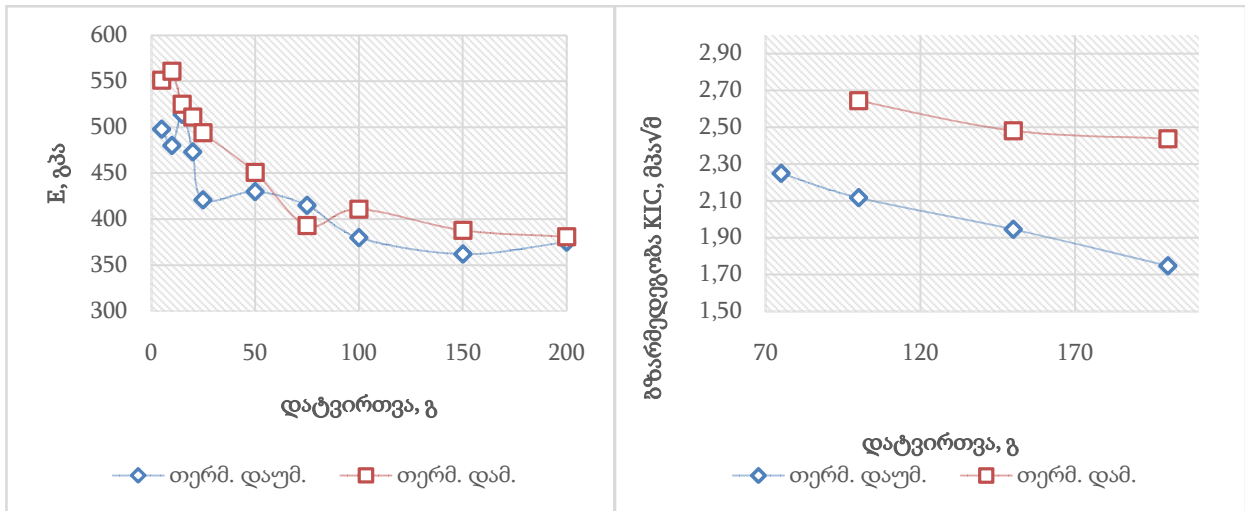
ნიმუშების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები

№	მახასიათებელი	გაზომვის შედეგი	
		TUHS	THS
1	ფარდობითი სიმკვრივე, %	88-89	89-90
2	სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა	700	930
3	დინამიკური მიკროსისალე DHV, 0.1Nგპა	19,2	19,6
4	სტატიკური მიკროსისალე HV, 0.1Nგპა	25,6	27,6
5	დრეკადობის მოდული E, გპა (0.1N)	380	411
6	ბზარმედეგობა, K_{IC} მპა $\sqrt{მ}$ (0.1N)	2,12	2,64



სურ. 4. დინამიკური სისალის დამოკიდებულება დატვირთვაზე

დაბალ დატვირთვებზე (5-25 გ) THS-ის მიკროსისალე საშუალოდ 10%-ით აღემატება TUHS-ისას. შედარებით მაღალ დატვირთვებზე (50-200 გ) სხვაობა მცირდება.



სურ. 5. დრეკადობის მოდულის (ა) და ბზარმედევობის (ბ) დამოკიდებულება დატვირთვაზე

დრეკადობის მოდულის დამოკიდებულება დატვირთვაზე სისალის მსგავსია - დატვირთვის გაზრდით დრეკადობის მოდული იკლებს. თერმულად დამუშავების შემდეგ დრეკადობის მოდული საგრძნობლად გაზრდილია. სხვაობა TUHS-სა და THS-ის დრეკადობის მოდულს შორის სხვადასხვა დატვირთვაზე თითქმის არ იცვლება.

რაც შეეხება ბზარმედევობას, თერმულად დამუშავების შემდეგ 25-40%-ით გაზრდილია. ბზარმედევობის გაზრდა სავარაუდოდ გამოწვეულია თერმული ძაბვების მოხსნით, რაც როგორც აღვნიშნეთ დიდი პრობლემაა ცხელი დაწეხით მიღებულ კერამიკაში.

3. დასკვნა

მიღებულია $^{10}\text{B}_4\text{C}$ -ისკერამიკული ნიმუშები, ნიმუშები ცხელი დაწეხის მეთოდით 2100°C ტემპერატურაზე და 30 მპა წნევის ქვეშ შემდგომი თერმული დამუშავებით 1800°C -სა და 10^{-4} პა წნევაზე.

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.

თერმულად დამუშავების შედეგად გაუმჯობესდა მასალის მექანიკური დამუშავებადობა, შემცირდა ამონატეხების ზომა და რაოდენობა. მექანიკური სიმტკიცე კუმშვაზე გაიზარდა 33%-ით.

მიკროინდენტრებით გაზომილი სისალე და დრეკადობის მოდული დაბალ დატვირთვებზე მკვედრად გაუმჯობესდა თერმული დამუშავების შედეგად. მაღალ დატვირთვებზე ეს ტენდენცია იკლებს და ბოლოს ქრება. მაკროსისალის გაურესება ლოგიკურ კავშირშია დიდ დატვირთვებზე ბზარმედევობის გაზრდასთან, რასაც ადასტურებს გაუმჯობესებული დამუშავებადობა.

ზემოაღნიშნული სავარაუდოდ გამოწვეულია თერმული დამაბულობის შედეგად მიკროძაბვების მოხსნით და მიკროსტრუქტურული ჰომოგენიზაციით და სტაბილიზაციით. მაღალ დატვირთვებზე მეტალთა მსგავსად შეიმჩნევა „მოშვება“ - სისალის შემცირება და ბზარმედევობის გაზრდა.

ლიტერატურა

1. 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
2. Zviad Mestvirishvili, Irakli Bairamashvili, Vakhtang Kvatchadze and Nugzar Rekhviashvili. Thermal and Mechanical Properties of B_4C - ZrB_2 Ceramic Composite. *Journal of Materials Science and Engineering B*, 5 (9-10) (2015), 385-393
3. 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

4. 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 (July 1993), 457-458
5. 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
6. P.D.Kervalishvili, S.O.Shalamberidze Yu.A. Bykovskii. Oriented boron carbide films produced by laser spraying. *American Institute of Physics*, (1991), 524-527
7. Helmut Werheit, Murli H. Manghnani, Udo Kuhlmann, Anwar Hushur, Sul Khan Shalamberidze. Mode Grüneisen parameters of boron carbide. *Solid State Sciences*, 72 (2017), 80-93
8. 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
9. 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
10. В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, В.Б. Пономаренко, Е. М. Муралева, Т. М. Гусева, Поглощающие материалы стержней управления ядерных реакторов. *Ульяновск 2012*, 57-95
11. 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
12. G.I.Kalandadze, S.O.Shalamberidze, A.B. Peikrshvili. Sintering of Boron and Boron Carbide. *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 154, N. 1 (2000), 194-198
13. Helmut Werheit and Sul Khan Shalamberidze. Advanced microstructure of boron carbide. *Journal of Physics Condensed Matter*, Volume 24, Number 38 (2012), 385-406
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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
18. B. Malmal Moshtaghioun, Angel L. 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
19. 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

UDC 543.226:620.181.4

IMPACT OF THERMAL TREATMENT ON $^{10}\text{B}_4\text{C}$ - WORK-PIECE OBTAINED BY HOT COMPRESSION

Z. Mestvirishvili^{1,2}, Sh. Zurabishvili^{1,2}, T. Mestvirishvili^{1,2}, Kh. bluashvili¹, A. Sitchinava³, N. Jalabadze²

¹ National High Technological Center of Georgia. Kavtaradze St. 46. 0186 Tbilisi, Georgia

² Georgian Technical University. Kostava St. 77. 0175 Tbilisi, Georgia

³ LEPL Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology, Mindeli St.7 , Tbilisi, 0186, Georgia

E-mail: zviad.mst@gmail.com

Resume: Goal. The research aims to study impact of thermal treatment of boron carbide work-pieces enriched with isotope Bor-10 on physical and mechanical properties of work-pieces.

Method . To receive ingots we used hot-compression method in vacuum at 2100°C temperature and 30 MPa pressure. Samples were thermally treated at the conditions of 1800°C and 10^{-4} Pa pressure. Optic and raster microscopic study was carried out. Physical-mechanical properties of ceramics were investigated.

Result. Effect of thermal treatment on boron carbide's mechanical workability, crack-resistance, hardness, flexibility module and mechanical strength - was determined.

Conclusion. As a result of thermal treatment the mechanical workability of the material was improved, size and number of splinters were decreased; mechanical strength at compaction increased by 33%; micro-hardness and flexibility module at low loadings significantly increased; at high loadings this tendency decreased. Worsening of macro-hardness is in logical connection with increase of crack-resistance at high loadings, which is evidenced also by improved workability.

Apparently the above stated is conditioned by the removal of micro-tensions as a result of thermal tension and micro-structtural homogenization and stabilization. At high loadings we observe "tempering" similar to metals – decrease of hardness and increase of crack-resistance.

Key words: Boron carbide; neutron absorber; fracture toughness; hardness; thermal healing of boron carbide.
