

ISSN 1512-0325

საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი  
**JOURNAL OF THE GEORGIAN CERAMISTS' ASSOCIATION**



# kerami ka **CERAMICS**

და მოწინავე  
ტექნოლოგიები

**AND ADVANCED  
TECHNOLOGIES**

სამეცნიერო-ტექნიკური და საარმოო ილუსტრაციები,  
რეგისტრაციები, რეფერირებადი ჟურნალი

Vol. 24. 1(47).2022

## სარედაქციო კოლეგია:

მ. ბალახაშვილი, მ. ბიბილაშვილი, გ. გაფრინდაშვილი (მთ. რედ. მოადგილე), ნ. გელოვანი, ლ. გვასალია, ა. გრიგოლიშვილი, ნ. დარახველიძე, ელ. ელიზბარაშვილი, დ. ერისთავი, ლ. თოფურია, რ. თურმანიძე, ი. კახნიაშვილი, მ. კეკელიძე, ზ. კოეზირიძე (მთ. რედაქტორი), ნ. კუციავა, ნ. ლოლაძე, მ. მაისურაძე, ნ. მარგიანი, ზ. მესტვირიშვილი, ო. მიქაძე, გ. მუმლაძე, მ. მუჯირი, ნ. მჭედლიშვილი, ნ. ნიჟარაძე (პასუხისმგებელი მდივანი), დ. ნოზაძე, ა. სარუხანიშვილი (მთ. რედ. მოად.), გ. ტაბატაძე, ი. ქაშაკაშვილი, რ. ქაცარავა, ვ. ქინქლაძე, ე. შაფაქიძე, ჯ. შენგელია, მ. ცინცაძე, რ. ხუროძე, თ. ჭეიშვილი, მ. ხუციშვილი, დ. ჯინჭარაძე

## EDITORIAL BOARD:

**M. Balakhashvili, M. Bibilashvili, T. Cheishvili, N. Darakhvelidze, E. Elizbarashvili, D. Eristavi, G. Gaprindashvili** (vice-editor-in-chief), **N. Gelovani, A. Grigolishvili, L. Gvasalia, D. Jinchradze, R. Katsarava, I. Kakhniashvili, M. Kekelidze, V. Khinqladze, R. Khurodze, M. Khutsishvili, Z. Kovziridze** (editor-in-chief), **N. Kuciava, N. Loladze, M. Maisuradze, N. Margiani, N. Mchedlishvili, O. Miqadze, Z. Mestvirishvili, G. Mumladze, M. Mujiri, N. Nizharadze** (executive secretary), **D. Nozadze, I. Qashakashvili, A. Sarukhanishvili** (vice-editor-in-chief), **E. Shapakidze, J. Shengelia, G. Tabatadze, L. Topuria, M. Tsintsadze, R. Turmanidze**

შურნალში „კერამიკა“

გამოქვეყნებული სტატიების  
პირითადი თემატიკა

ყველა სახის მიწის,  
კერამიკის, კერამიკული და  
პოლიმერული კომპოზიტების,  
ჯელოგენური მასალების,  
ჭიმურის და მიწისქვეშის,  
სხვადასხვა სახის,  
მიწისქვეშის ბაზის,  
მჭიდვანი მასალების, ცემენტის და სხვა  
არაორგანული,  
ქვედაპირული,  
ახალი და ტრადიციული მასალების  
სფეროში  
ჩატარებული სამეცნიერო კვლევები,  
მათი მიღების ტექნიკა და  
ტექნოლოგია, ნანოტექნოლოგია და  
ნანოქიმიკა  
პოლიმერული პიომატალები  
ბიომედიცინა  
ორგანულ ნივთიერებათა  
ტექნოლოგია  
მეტალურგია  
მასალათმცოდნეობა  
კომპოზიციური მასალები და  
დანაწარმები  
არაორგანული და ორგანული  
სინთეზი  
ნანომასალებისა და კომპოზიტების  
მიღების ელექტროქიმიური  
ტექნოლოგიები  
თერმოდინამიკა, კინეტიკა და  
კატალიზი

შურნალში აბრეშვი

შესაქმებულია განთავსდეს

სტატიები შემდეგ საკითხებზე:

- ✓ ახალი ტექნიკა, მონოპოლიზაცია  
საწარმოთა და წარმოების ტექნიკური  
გადაიარაღება.
- ✓ სანედლეულო ბაზის განვითარება,  
ნედლეულის რაციონალური  
გამოყენება, მათ შორის ადგილობრივი  
წარმოების წარჩინების.
- ✓ რესურს- და ენერგოდამზოგველი  
ტექნოლოგიები. გარემოს დაცვა.
- ✓ საწარმოთა სამეურნეო მოღვაწეობა  
საბაზრო პირობებში, ეკონომიკა,  
მარკეტინგი.
- ✓ საქარხნო გამოცდილება.
- ✓ ინფორმაცია, რეკლამა.

გამოქვეყნების სფეროები

- ენერგეტიკა
- მშენებლობა
- სახალხო მოხმარების საგნები
- ქიმია და ქიმიური ტექნოლოგია
- მასალათმცოდნეობა
- მეტალურგია
- ელექტრონიკა და ელექტროტექნიკა
- მედიცინა
- ოპტიკა
- სხვა სფეროები
- გარემოს დაცვა

უაკ 538 945

## ბორის გავლენა Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემაში ზეგამტარი ფაზების ფორმირებაზე ტყვიით სტაბილიზაციის გარეშე

ი. ახვლედიანი<sup>1</sup>, ნ. პაპუნაშვილი<sup>2</sup>, რ. გოლიაძე<sup>3</sup>, მ. ბალახაშვილი<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ე. ანდრონიკაშვილის სახელობის ფიზიკის ინსტიტუტი, საქართველო, 0186, თბილისი, თამარაშვილის 6

<sup>2</sup> საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ვლადიმერ ჭავჭავაძის სახელობის კიბერნეტიკის ინსტიტუტი, საქართველო, 0186, თბილისი, სანდრო ეულის 5. ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველო, 0160, თბილისი, კოსტავას 69

<sup>3</sup> საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტი, საქართველო, 0159, თბილისი, დავით აღმაშენებლის ხეივანი 240

E-mail: papunashvilinatela@gmail.com; orest.kvitsiani@gtu.ge

**რეზიუმე:** მიზანი. კვლევის მიზანია ტყვიით სტაბილიზაციის გარეშე Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემის ზეგამტარზე ბორის ზემოქმედების შესწავლა.

**მეთოდი.** ნიმუშები მომზადდა ტრადიციული მყარფაზიანი კერამიკული მეთოდით: აგატის როდინში მრავალჯერადი პერიოდული გადაფქვითა და ალუნდის ფილაზე ხანგრძლივი თერმული დამუშავებით. სარეაქციო ნარევი (კაზმი) დამუშავდა 850°C-ზე 40 საათის განმავლობაში, დაახლოებით 900 MPa წნევით დაწნეხილი აბები კი გამოიწვა 840°C-ზე 30 საათის ხანგრძლივობით. აბები გააცივეს ორი ხერხით: 1. ღუმელთან ერთად მათი ინერციული გაცივებით და 2. ცხელი ღუმლიდან თხევად აზოტში გადატანით ანუ წრთობით. ნიმუშების ელექტროფიზიკური თვისებები გაიზომა სტანდარტული 4-კონტაქტიანი მეთოდით. რენტგენოფაზური ანალიზი ჩატარეს რენტგენოდიფრაქტომეტრზე DRON-3M. თერმოგრაფიკული ანალიზი განხორციელდა Q-1500D დერივატოგრაფით; ნიმუშების გახურების სიჩქარე 10°C/წთ შეადგენდა.

**შედეგი.** დადგინდა, რომ ბორი გარკვეულ გავლენას ახდენს Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემის ზეგამტარზე ტყვიით სტაბილიზაციის გარეშე. კერძოდ, მნიშვნელოვნად იზრდება ფაზწარმოქმნის სიჩქარე და იცვლება ზეგამტარი ფაზების შედგენილობა.

ძირითადად წარმოიქმნება 2212 დაბალტემპერატურული ზეგამტარი ფაზა. ამასთანავე, თითქმის არ ჩანს ბორის გავლენა კუთრი წინაღობის ტემპერატურულ დამოკიდებულებაზე, განსაკუთრებით წრთობით მიღებული ნიმუშების შემთხვევაში. რაც შეეხება გამოწვის შემდეგ ღუმელთან ერთად ინერციულად გაცივებულ ნიმუშებს, ხდება მათი დაახლოებით 2°K-ით გაუმჯობესება, 0.3 ატ.მ. ბორის კონცენტრაციის დროს. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ აბების გამოწვის შემდეგ მათი გაცივების ხასიათი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ზეგამტარის ელექტროფიზიკურ თვისებებზე: ღუმელთან ერთად ნიმუშების ინერციული გაცივების კუთრი წინაღობის ნულოვან მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურა  $T_K=68^{\circ}K$ , ხოლო მათი წრთობისას ანუ ცხელი ღუმლიდან აზოტის არეში გადატანისას 75°K-მდე იზრდება.

**დასკვნა.** ელემენტი ბორი გარკვეულ ზეგავლენას ახდენს ბისმუტიან ზეგამტარზე, კერძოდ მნიშვნელოვნად აჩქარებს დაბალტემპერატურული 2212 ზეგამტარი ფაზის წარმოქმნას, მაგრამ ტყვიით სტაბილიზაციის გარეშე არ წარმოიქმნება მაღალტემპერატურული 2223 ზეგამტარი ფაზა.

**საკვანძო სიტყვები:** Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემა; ბორის დოპანტი; ალუნდის ფილა; ნიმუშების ინერციული გაცივება; წრთობა; 2212 დაბალტემ-

პერატურული ზეგამტარი ფაზა; ფაზწარმოქმნის დაჩქარება; კუთრი წინაღობა; თერმული ანალიზი; XRD გამოსახულება.

## 1. შესავალი

განსახილველი Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემის ბისმუტიანი კუპრატები კერამიკული მასალაა, რომელშიც პირველად იქნა აღმოჩენილი მაღალტემპერატურული ზეგამტარობა იშვიათმიწა ელემენტების შემცველობის გარეშე [1]. მათი კრისტალური სტრუქტურა შედგება ზეგამტარი  $\text{CuO}_2$  სიბრტყეებისგან, რომლებიც ერთმანეთისგან გამოყოფილია სხვა შრეებით, რომლებიც მუხტის მატარებლების სარეზერვო ფენების როლს ასრულებს ზეგამტარი სიბრტყეებისთვის [2].

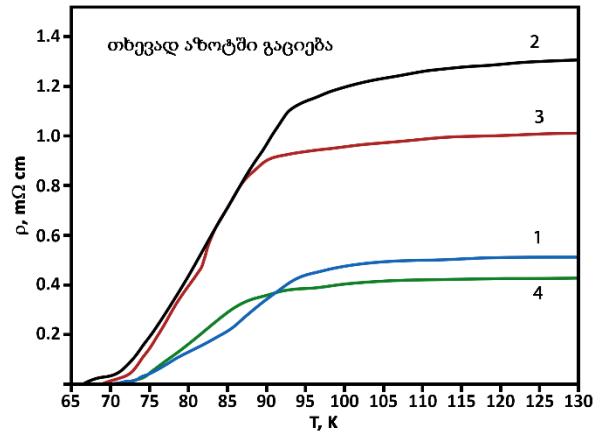
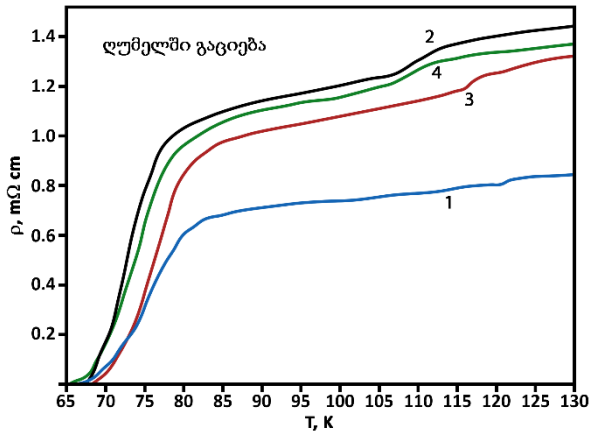
აღნიშნული სისტემების ზეგამტარი თვისებები, სხვა მაღალტემპერატურული ზეგამტარი კუპრატების მსგავსად, დამოკიდებულია  $\text{CuO}_2$  ფენების მუხტის მატარებელთა კონცენტრაციაზე, რაზეც, თავის მხრივ, დიდ გავლენას ახდენს სტოქიომეტრიიდან გადახრა [3]. ამასთან დაკავშირებით უნდა აღინიშნოს, რომ ზუსტი სტოქიომეტრიის დაცვა მასიურ ნიმუშში ძალიან რთულია იქიდან გამომდინარე, რომ საწყისი შედგენილობა, თერმული დამუშავების და სინთეზის პირობები გავლენას ახდენს დამატებითი ფაზების წარმოქმნასა და მათ რაოდენობაზე [4]. აღმოჩნდა, რომ ტყვიით დოპირება იწვევს თვისებების გარკვეულ გაუმჯობესებას:  $\text{Bi}^{3+}$ -ის ჩანაცვლება  $\text{Pb}^{2+}$ -ით იწვევს ფორმალურ Cu ვალენტობის და, შესაბამისად, ხვრელების რაოდენობის ზრდას, შედეგად მიიღწევა მაგნიტურ ველში  $J_c(H)$  კრიტიკული დენის საგრძნობი ზრდა Pb-ს ოპტიმალური შემცველობის ( $x=0.16$ ) შემთხვევაში, T<sub>c</sub>-ს უმნიშვნელო ცვლილების ფონზე [5]. ამის გამო, დღემდე სინთეზირებული Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემის ზეგამტარი კერამიკების უდიდესი ნაწილი მიეკუთვნება ტყვიით დოპირებულ კლასს (Bi,Pb)-2212 და დიდი ძალისხმევით მიმართული სხვა ჩამნაცვლებების გამოსავლენად, ზეგამტარი თვისებების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით.

მრავალმა მკვლევარმა დაადგინა, რომ ბორისა ან მისი ნაერთების შეყვანა Bi,Pb-Sr-Ca-Cu-O სისტემაში განსაკუთრებულ, თვალსაჩინო ზემოქმედებას ახდენს ზეგამტარის ფაზურ შედგენილობასა და მის თვისებებზე: აჩქარებს ზეგამტარი ფაზის წარმოქმნას, ზრდის წინაღობის ნულოვან მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურას (T<sub>K</sub>) და მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს კრიტიკული დენის სიმკვრივეს (I<sub>c</sub>) [6-14]. უაღრესად საინტერესოა, მოახდენს თუ არა ბორი ანალოგიურ ზეგავლენას მოცემულ სისტემაზე, თუ მასში სტაბილიზატორად ტყვია არ იქნება გამოყენებული.

## 2. ძირითადი ნაწილი

ამ თვალსაზრისით კვლევისათვის არჩეულ იქნა  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{y+8}$  ანუ 2223-B შედგენილობა, სადაც  $y=0; 0.1; 0.3; 0.5$  ატ.მ. ბორი. გამოსავალ ანუ კაზიმების შემადგენელ ნივთიერებებს შეადგენს მოცემული ელემენტების ოქსიდები ან კარბონატები. ელემენტი ბორი კაზიმებში შეყვანილ იქნა ოქსიდის ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) სახით. ნიმუშები მომზადდა ტრადიციული მყარფაზიანი კერამიკული მეთოდით. ფხვნილები თერმულად დამუშავდა ალუნდის ფილების გამოყენებით  $850^\circ\text{C}$ -ზე 40 საათის განმავლობაში, ხოლო 900 MPa წნევით დაწნეხილი აბები გამოიწვა  $840^\circ\text{C}$ -ზე 30 საათის ხანგრძლივობით. ნიმუშები გააცივეს ორი მეთოდით: როგორც ღუმლის ინერციული გაცივებით, ისე წრთობით ანუ ნიმუშების ცხელი ღუმლიდან თხევადი აზოტის არეში გადატანით.

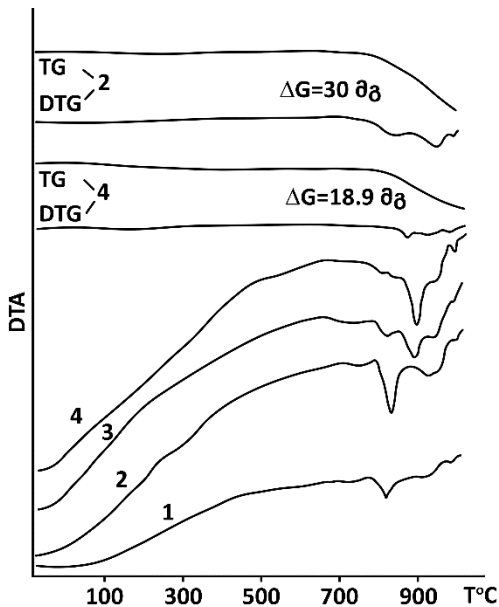
შესწავლილ იქნა მიღებული ნიმუშების ელექტროფიზიკური თვისებები (სურ.1). ტემპერატურული დამოკიდებულების მრუდებიდან ჩანს, რომ ნიმუშების გაცივების სახე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს წინაღობის ნულოვან მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურაზე. კერძოდ, ღუმელთან ერთად მისი ინერციული გაცივების შემთხვევაში T<sub>K</sub> არ აღემატება  $68^\circ\text{K}$ -ს, ხოლო ცხელი ღუმლიდან აზოტში გადატანის ანუ სწრაფი გაცივების პირობებში იზრდება  $73^\circ\text{K}$ -მდე.



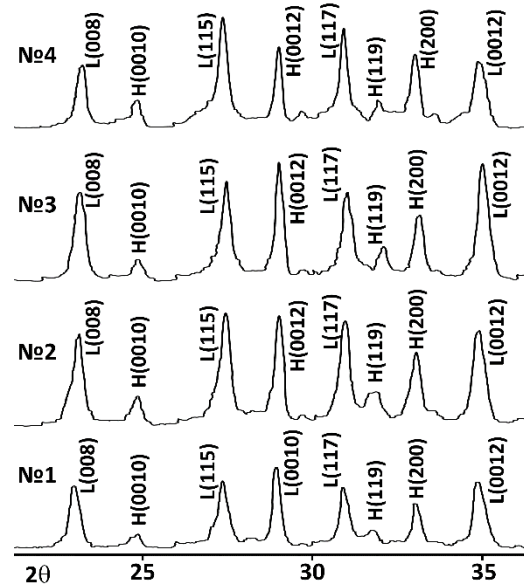
სურ. 1.  $\text{Bi}_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_x\text{-B}_y$  ნიმუშების კუთრი წინაღობის ტემპერატურული მრუდები: 1)  $y=0$  ატ.მ. B (სტანდარტი); 2)  $y=0,1$  ატ.მ. B; 3)  $y=0,3$  ატ.მ. B; 4)  $y=0,5$  ატ.მ. B

როგორც ცნობილია,  $\text{Bi-Sr-Ca-Cu-O}$  სისტემაში წარმოიქმნება სამი ზეგამტარი ფაზა: 2201, 2212 და 2223, რომელთა  $T_K$  შესაბამისად  $10^\circ\text{K}$ ,  $75^\circ\text{K}$  და  $110^\circ\text{K}$  უდრის [15-18]. აქედან გამომდინარე შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ჩვენს შემთხვევაში ძირითადად წარმოიქმნება 2212 ზეგამტარი ფაზა. როგორც 1-ელი სურ-დან ჩანს, ბორის გავლენა თითქმის არ

შეინიშნება, განსაკუთრებით ნაწრთობ ნიმუშებში. რაც შეეხება ლუმელთან ერთად ინერციული გაცივებით მიღებულ ნიმუშებს, აქ შეიძლება აღინიშნოს სულ მცირე, დაახლოებით  $2^\circ\text{K}$ -ით გაუმჯობესება ბორის 0.3 ატ.მ. კონცენტრაციის შემთხვევაში.



სურ.2. ნიმუშების თერმული ანალიზი



სურ.3. 2223-B ნიმუშების XRD გამოსახულებები

ამავე დროს თერმული ანალიზი (სურ.2) გვიჩვენებს, რომ მოცემულ სისტემაში ბორის შეყვანა გარკვეულ გავლენას ახდენს თერმოგრამების ხასიათზე: იცვლება როგორც ენდოთერმული ეფექტების რაოდენობა, ისე მათი ინტენსივობა. №1 ნიმუშის (სტანდარტის) თერმოგრამაზე აღინიშნება დაბალი ინტენსივობის ენდოთერმული ეფექტი მაქსიმუმით 800°C-ზე და კიდევ უფრო სუსტი ენდოთერმული ეფექტები 900 და 920°C-ზე. №2 ( $y=0.1$  ატ. მ. B) ნიმუშის შემთხვევაში საგრძნობლად გაზრდილია ამ ეფექტების ინტენსივობა. რაც შეეხება №3 ( $y=0.3$  ატ. მ. B) და №4 ( $y=0.5$  ატ. მ. B) ნიმუშებს, აქ შეცვლილია ენდოთერმული ეფექტების ხასიათი, იკვეთება სამი ენდოთერმული ეფექტი მაქსიმუმებით 800, 860 და 900°C-ზე. ტყვიით სტაბილიზებული საუკეთესო ზეგამტარი ნიმუშების DTA მრუდებზეც აღინიშნა ასევე სამი ენდოთერმული ეფექტი მაქსიმუმებით 860, 900–920 და 940–960°C-ზე [19]. გაიზომა ნიმუშების სიმკვრივე; აღსანიშნავია, რომ სიმკვრივე კლებულობს ბორის კონცენტრაციის მატებასთან ერთად როგორც ლუმელში, ისე თხევად აზოტში გაცივების შემთხვევაში. სიმკვრივის გაზომილი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით ლუმელში გაცივების დროს შეადგენს: N1–5,57 გ/სმ<sup>3</sup>; N2 – 5,52 გ/სმ<sup>3</sup>; N3 – 5,45 გ/სმ<sup>3</sup>; N4 – 5,23 გ/სმ<sup>3</sup>; ხოლო თხევად აზოტში გაცივების შემთხვევაში: N1 – 5,53 გ/სმ<sup>3</sup>; N2 – 5,50 გ/სმ<sup>3</sup>; N3 – 5,37 გ/სმ<sup>3</sup>; N4 – 5,08 გ/სმ<sup>3</sup>;

ნიმუშების რენტგენოგრამების (სურ.3) ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მოცემულ ნიმუშებში წარმოქმნილია ორივე ზეგამტარი ფაზა – როგორც დაბალტემპერატურული (2212-L), ისე მაღალტემპერატურული (2223-H). ამასთანავე შეიძლება აღინიშნოს, რომ ძირითადად გვაქვს 2212 ზეგამტარი ფაზა, რიმედიც წარმოდგენილია 5 რენტგენული პიკის სახით. რენტგენოგრამებიდან აშკარად ჩანს ბორის გავლენა. N1 ნიმუშში ანუ სტანდარტში რენტგენული პიკების ინტენსივობა საგრძნობლად დაბალია დანარჩენ ნიმუშებთან შედარებით. თანაც, ბორის კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად (0.1 და 0.3 ატომური მოლი), ბორის დამატებისას

პიკების ინტენსივობა ჯერ იზრდება, შემდეგ კი (0.5 ატომური მოლი ბორი) მცირდება.

### 3. დასკვნა

ელემენტი ბორი როგორც თავისუფალი ანუ მარტივი ნივთიერების სახით, ისე სხვადასხვა, თითქმის ნებისმიერი ქიმიური ნაერთის შედგენილობაში არსებული, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემის ზეგამტარზე, არა მარტო ტყვიის შემცველობის, არამედ ტყვიით სტაბილიზაციის პირობებში და მის გარეშეც. პირველ რიგში, უნდა აღინიშნოს ზეგამტარი ფაზების წარმოქმნის სიჩქარის მატება, ასევე აშკარა სარეაქციო ნარევის სისქეზე ზეგამტარის თვისებების დამოუკიდებლობა, რაც ერთჯერადად დიდი რაოდენობის ზეგამტარი მასალების სინთეზის საშუალებას იძლევა. ამავე დროს ადგილი აქვს ნიმუშებში როგორც დაბალტემპერატურული 2212, ისე მაღალტემპერატურული 2223 ზეგამტარი ფაზების კონცენტრაციის ზრდას ბორის კონცენტრაციის მატებასთან ერთად, დაბალტემპერატურული ზეგამტარი ფაზის კონცენტრაციის ზრდის უპირატესობით.

### ლიტერატურა

1. Maeda, H.; Tanaka, Y.; Fukutomi, M.; Asano, T. A new high-Tc oxide superconductor without a rare earth element. *Jpn. J. Appl. Phys.* 27, L209 (1988).
2. Cava, R.J., *Structural Chemistry and the Local Charge Picture of Copper Oxide Superconductors*, *Science* 247, 656 (1990).
3. Eisaki H., Kaneko N., Feng D.L., Damascelli A., Mang P.K., Shen K.M., Shen Z.-X., Greven M., Effect of chemical inhomogeneity in bismuth-based copper oxide superconductors, *Physical Review B* 69, 064512 (2004).
4. Togano, K.; Kumakura, H.; Maeda, H.; Yanagisawa, E.; Takahashi, K. Properties of Pb-doped Bi-Sr-Ca-Cu-O superconductors. *Appl. Phys. Lett.* 53, 1329 (1988).
5. Kumar, J.; Ahluwalia, P.K.; Kishan, H.; Awana, V.P.S. Significant Improvement in Superconductivity by Substituting Pb at Bi-site in

- $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  with  $x=0.0$  to  $0.40$ . *J. Supercond. Nov. Magn.* 23, 493–499 (2010).
6. Jgamadze V., Margiani N., Papunashvili N., Shurgaia G., Tsintsadze G. *Proceedings of the Institute of Cybernetics*, V.2, № 1-2, 211-212 (2002).
  7. Smrckova O., Sykorova D., Petrydes D., Vasek P.; Influence of Technological Parameters on the Quality of the Bi-Based Superconductors; *Int. J. Mod. Phys. B.* 13, 3729-3731 (1999).
  8. Eremina E.A., Kravchenko A.V., Kazin P.E., Tret'yakov Y.D. Jansen M.I.; Influence of boron-containing dopants on the formation of superconducting phase in the system Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O; *Supercond. Sci. Technol.* 11, 223 (1998).
  9. Eremina E.A., Kravchenko A.V., Kazin P.E., Tret'yakov Y.D., Jansen M.; Influence of Boron Containing Phases on Formation and Properties of Superconductor of  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  Composition; "Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2: Khimiya, 39, 5, 328-331 (1998).
  10. Kravchenko A.V., Eremina E.A., Kazin P.E.; Influence of Calcium Borate of  $\text{Ca}_2\text{B}_2\text{O}_5$  Composition on Formation and Microstructure of  $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  Phase; "Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2: Khimiya, 39, 5, 331-334 (1998).
  11. Margiani N., Nikoghosyan S., Adamia Z., Dzanashvili D., Kuzanyan V., Papunashvili N., Kvaratskhava I., Sarkisyan A., Zhghamadze V.; Enhancement of Phase Formation and Critical Current Density in (Bi,Pb)-2223 Superconductor by Boron Addition and Ball Milling; *International Journal of Advanced Applied Physics Research. Special Issue*, 1-5 (2016).
  12. Margiani N., Mumladze G., Adamia Z., Papunashvili N., Dzanashvili D.J.; Influence of  $\text{Pb}(\text{BO}_2)_2$  Doping on Superconducting Properties of (Bi,Pb)-2223 HTS; *Superconductivity and Novel Magnetism*, 28, 499-502 (2015).
  13. Margiani N., Mumladze G., Papunashvili N., Adamia Z., Dzanashvili D.J.; Effect of BN-Added Precursors on Phase Formation and Transport Properties of (Bi,Pb)-2223 HTS; *Superconductivity and Novel Magnetism*, 27, 397-400 (2014).
  14. Margiani N., Metskhvarishvili I., Adamia Z., Medoidze T., Papunashvili N., Dzanashvili D.J., Chubabria M.I.; Influence of Boron-Containing Dopants on Superconducting Properties of (Bi,Pb)-2223 HTS; *Superconductivity and Novel Magnetism*, 26, 965-968 (2013).
  15. Michel, C., Hervieu, M., Borel, M.M., Grandin, A., Deslandes, F., Provost, J., Raveau, B.; Superconductivity in the Bi- Sr- Cu- O System; *Z. Physik B - Condensed Matter* 68, 421–423 (1987).
  16. Liang, B., Bernhard, C., Wolf, Th., Lin, C., Phase evolution, structural and superconducting properties of Pb-free  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  single crystals, *Supercond. Sci. Technol.* 17 731 (2004).
  17. Eltsev Y., Lee S., Nakao K., Tajima S., The electrical transport properties of high quality Bi-2223 crystal, *Supercond. Sci. Technol.* 23, 5, 055007 (2010).
  18. Takano, M., Takada, J., Oda, K., Kitaguchi, H., Miura, Y., Ikeda, Y., Tomii, Y. and Mazaki, H., High- $T_c$  Phase Promoted and Stabilized in the Bi,Pb-Sr-Ca-Cu-O System, *Jpn. J. Appl. Phys*, 27, L1041-L1043 (1988).
  19. ჯ. ადამია, ი. მუჟანაძე, ნ. პაპუნაშვილი, ნ. საბაშვილი, გ.ცინცაძე, მ. ჭუბაბრია,  $\text{Bi}(\text{Pb})\text{-Sr-Ca-Cu-O}$  სისტემის ზეგამტარი კერამიკის თერმოგრაფიული გამოკვლევა სინთეზის სხვადასხვა საფეხურზე. კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები (საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი), №2, გვ. 22-25 (1999).

UDC 538 945

## INFLUENCE OF BORON ON FORMATION OF SUPERCONDUCTING PHASES IN Bi-Sr-Ca-Cu-O SYSTEM WITHOUT Pb STABILIZATION

I. Akhvlediani<sup>1</sup>, N. Papunashvili<sup>2</sup>, R. Goliadze<sup>3</sup>, M. Balakhashvili<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Ekvter Andronikashvili Institute of Physics; Tamarashvili str. 6, 0186 Tbilisi, Georgia.

<sup>2</sup> Vladimir Chavchanidze Institute of Cybernetics of the Georgian Technical University; Sandro Euli str. 5, 0186 Tbilisi, Georgia. Department of Chemical and Biological Technologies, Str Costava 69. 0160 Tbilisi. Georgia

<sup>3</sup> Agricultural University of Georgia; David Aghmashenebeli Alley 240, 0159 Tbilisi, Georgia

E-mail: papunashvilinatela@gmail.com; orest.kvitsiani@gtu.ge

**Resume: Objective.** Objective of the study is investigation of Boron influence on superconductor of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> (2223) composition, without stabilizing by Lead (Pb).

**Method.** Samples were prepared by traditional solid phase ceramic method: by means of repeated intermediate grindings in agate mortar and prolonged heat treatment on alundum plate. Reaction mixture was annealed at 850°C for 40 hours and obtained material was pressed into pellets under 900 MPa pressure; these pellets were sintered additionally at 840°C for 30 hours. Pellets were cooled in two modes: 1) by inertial cooling in furnace and 2) by transition from hot furnace to cold nitrogen, i.e. by tempering. Electro-physical properties of samples were measured by standard four-point probe method. X-ray phase analysis was carried out on diffractometer DRON-3M and thermal analysis was conducted on Derivatograph Q-1500D with sample heating speed of 10°C/min.

**Result.** Certain influence of Boron on Bi-Sr-Ca-Cu-O (2223) superconductor was shown. Particularly, phase-formation speed increases significantly and composition of superconducting phases is changed. Mainly, low-temperature 2212 superconducting phase is formed. Moreover, there is no meaningful influence of Boron on temperature dependence of resistance, especially in case of tempered samples. In case of samples, cooled with furnace, improvement by 2°C is seen with concentration of 3 atomic moles of Boron. It also should be noted, that after annealing of pellets, sample cooling character has significant effect on electro-physical properties of superconductor: in case of inertial cooling with furnace, zero-state temperature of resistance is  $T_K=68\text{K}$ , while in case of tempering (transition from hot furnace to cold nitrogen)  $T_K$  increases up to 75K.

**Conclusion.** Boron has certain influence on Bismuth-based superconductor; particularly it significantly increases formation of low-temperature 2212 superconducting phase. However, without stabilization by Lead, high-temperature 2223 superconducting phase is not formed.

**Key words:** Bi-Sr-Ca-Cu-O system, Boron dopant, Alundum plate, inertial cooling of samples, tempering, 2212 lo-temperature superconducting phase, phase-formation acceleration, resistance, thermal analysis, XDR image.



უაკ 666.1/2

## ტექნოგენური მასალების საფუძველზე მიღებული ადვილდნობადი მინების მახასიათებელი თვისებების დადგენა

ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველო, 0160, თბილისი, კოსტავას 69

E-mail: keti.baakashvili@gmail.com

**რეზიუმე:** მიზანი. ორი სახის ტექნოგენური ნარჩენის – მინის ლეწისა და ძვლის ნაცრის, ხოლო ძირითად მაღლობლად ნატრიუმის მეტაბორატის შემცველ სამკომპონენტთან სისტემაში მიღებული მინამასალების ძირითადი მახასიათებელი თვისებების და მიზნობრივად გამოყენების პერსპექტიულობის დადგენა.

**მეთოდი.** სამკომპონენტური „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი –  $NaBO_2$ “ სისტემაში მიღებული მინის დნობადობის, სიმკვრივის, თბური გაფართოების კოეფიციენტის და ქიმიური მდგრადობის დადგენა მინისა და მინანქრების თვისებათა განსაზღვრის მეთოდების გამოყენებით.

**შედეგი.** სამი სერიის (10, 20 და 30 მას.% ძვლის ნაცრის შემცველობით) შედგენილობის მინის დნობადობის დადგენით გამოიკვეთა რამდენიმე შედგენილობის მინა, რომელთა გარბილება  $600^{\circ}C$ -მდე ხდება. შესწავლის საფუძველზე შეფასდა მათგან ადვილდნობადი მინების/მინანქრების მიღების პერსპექტიულობა და გამოყენების შესაძლო სფეროები.

**დასკვნა.** სინთეზირებული მინები ხასიათდება თერმული გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის მაღალი და დეფორმაციის ტემპერატურის დაბალი მნიშვნელობით, დამაკმაყოფილებელი ქიმიური მდგრადობით. მაგრამ, მათი მინის ნაწარმის ზედაპირის დეკორირებაში, ალუმინისა და მისი შენადნობების ზედაპირის ტექნიკურ-დეკორატიული დაფარვისათვის მიზნობრივი გამოყენება მოითხოვს თვისებების და, შესაბამისად, მიღებული მინების შედგენილობათა მიზნობრივ კორექტირებას.

**საკვანძო სიტყვები:** მინის შედგენილობა, დნობადობა, თერმული გაფართოება, ქიმიური მდგრადობა.

### 1. შესავალი

ადვილდნობადი მინები და საფარები (მინანქრები) გამოირჩევა იმით, რომ უნდა აკმაყოფილებდეს ერთ უპირობო მოთხოვნას – მათი გარბილების ტემპერატურა  $600^{\circ}C$ -ს არ უნდა აღემატებოდეს. აღნიშნული ფაქტორი განსაზღვრავს სხვადასხვა სახის მასალის/ნაკეთობის (მინა, კერამიკა, ლითონი) შერწყმას, დეკორირებას ან ზედაპირის პასივაციას, ნაკეთობათა დეფორმაციის გარეშე [1,2].

გარდა აღნიშნულისა, მნიშვნელობა ენიჭება ადვილდნობადი მინების/საფარების თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის მნიშვნელობას (განსაზღვრავს შერჩილვის და დაფარვის ხარისხს /სიმტკიცეს) და ქიმიურ მდგრადობას (ძირითადად ატმოსფერული გარემოს მიმართ), რომელთა მიმართ მოთხოვნა დამოკიდებულია კომპოზიციური ნაკეთობის საექსპლუატაციო პირობებზე [3].

ახალი სახის ეკოლოგიურად უსაფრთხო და ეკონომიკურად მისაღები ადვილდნობადი მინების მიღების მიზნით, კვლევის საწყის ეტაპზე შევისწავლეთ და შევაფასეთ ორი ტექნოგენური ნედლეულის შემცველ სამკომპონენტურ სისტემაში (მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი – ნატრიუმის მეტაბორატი) ადვილდნობადი მინების მიღება და მათი მოსალოდნელი თვისებრივი მაჩვენებლები [4].

დადგინდა, რომ საკვლევი სამკომპონენტური სისტემის შედგენილობათა სამ სერიაში (10, 20 და 30 მას.% ძვლის ნაცარი) 30 მას.% ძვლის ნაცრის შემცველობის ნაძნობები გადმოსხმისას კრისტალდება. ამავე დროს, 10 და 20 მას.% ძვლის ნაცრის შემცველობის შემთხვევაში ერთგვაროვანი ნაძნობები მიიღება დაბალ ტემპერატურაზე (1100°C), როდესაც შედგენილობებში 40–80 მას.%  $NaBO_2$  არის წარმოდგენილი. აქედან, საკვლევად შეირჩა ორი სერიის (10 და 20 მას.% ძვლის ნაცრის შემცველი) ცხრა შედგენილობა (ცხრილი 1). საკვლევად შერჩეულ მინებს განესაზღვრა გარბილების ტემპერატურა (მასობრივი დაკრისტალების მეთოდი), ქიმიური მდგრადობა (ფხვნილის მეთოდი) და დაუდგინდა თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტი (დილატომეტრიული მეთოდი), რომელთა ჩატარების მეთოდიცა წარმოდგენილია [5]-ში.

## 2. ძირითადი ნაწილი

სამკომპონენტური სისტემაში „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი –  $NaBO_2$ “ შეირჩა და თვისებები

დაუდგინდა ორი (D და E) სერიის მინებს, რომელთა შედგენილობა წარმოდგენილია 1-ელ ცხრილში.

საკვლევი მინების წამყვანი მახასიათებლის – გარბილების ტემპერატურის დასადგენად ნიმუშები (ფხვნილები) თერმულად დამუშავდა 450–650°C ტემპერატურულ ინტერვალში. ტემპერატურათა ცვლის ბიჯი 50°C-ს შეადგენდა. სხვადასხვა ტემპერატურაზე დამუშავებული სინთეზირებული მინების გარდაქმნა შეფასდა შეფასების „პირობითი ბალით“, რომელთა აღწერა წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში.

კვლევის შედეგების ანალიზისას გამოჩნდა კიდევ ერთი თავისებურება – აღმოჩნდა, რომ თერმულ დამუშავებას შეუძლია მინის ნიმუშების ფერის შეცვლა. ამ მხრივ დაფიქსირებული ცვლილებები ასევე შეფასდა სამი მდგომარეობით (ფერთა ცვლა), რომლებიც მოყვანილია მე-3 ცხრილში (შენიშვნის სახით). საცდელად აღებული 9 განსხვავებული შედგენილობის მინის თერმული დამუშავებით გამოწვეულ გარდაქმნათა ხასიათი და დონე წარმოდგენილია მე-3 ცხრილში.

ცხრილი 1

საკვლევი მინების შედგენილობა

D სერიის შედგენილობები	შემცველობა, მას. %			E სერიის შედგენილობები	შემცველობა, მას. %		
	მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	$NaBO_2$		მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	$NaBO_2$
D - 4	50	10	40	E - 4	40	20	40
D - 5	40	10	50	E - 5	30	20	50
D - 6	30	10	60	E - 6	20	20	60
D - 7	20	10	70	E - 7	10	20	70
D - 8	10	10	80				

**ნიმუშების თერმული დამუშავებით გამოწვეული  
სახეცვლილებათა შეფასების ბალები**

პირობითი ბალი	მინის ნიმუშების (მარცვლების) სახეცვლილება
0	მარცვლები უცვლელია და ინარჩუნებს ფხვიერებას
1	ცალკეული მარცვლები შეცხვა (ნაწილობრივ ფხვიერი)
2	მარცვლები შეცხვა (არაფხვიერი მასა)
3	მარცვლები შელღვა (არაერთგვაროვანი მასა)
4	მარცვლები გადნა (ერთგვაროვანი ნადნობი)

**D და E სერიის მინის ფხვნილების  
ტემპერატურული ტრანსფორმაცია**

№	ნიმუშის ინდექსი	თერმული დამუშავების ტემპერატურა და შედეგების შეფასება*				
		450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C
1	D – 4	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)
2	D – 5	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	4 (გამჭ.)	4 (გამჭ.)
3	D – 6	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	4 (გამჭ.)	4 (გამჭ.)
4	D – 7	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	2 (თეთრი)	2 (დახშ.)	2 (დახშ.)
5	D – 8	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (თეთრი)	3 (თეთრი)	2 (დახშ.)
6	E – 4	0 (გამჭ.)	0 (გამჭ.)	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)
7	E – 5	1 (გამჭ.)	2 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	3 (გამჭ.)	4 (გამჭ.)
8	E – 6	1 (გამჭ.)	3 (თეთრი)	3 (დახშ.)	3 (დახშ.)	3 (დახშ.)
9	E – 7	1 (გამჭ.)	3 (თეთრი)	3 (დახშ.)	3 (დახშ.)	3 (დახშ.)

\*შენიშვნა: (გამჭ.) – გამჭვირვალე უფერო მასა;

(თეთრი) – წმინდამარცვლოვანი/რძისფერი მასა;

(დახშ.) – ტლანქმარცვლოვანი რძისფერი მასა.

მიღებული შედეგებიდან გამოჩნდა, რომ საწყისი მინების შედგენილობები მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს მინის ფხვნილების ქცევას სხვადასხვა ტემპერატურაზე დამუშავებისას. დაფიქსირებული თავისებურებებიდან გამოვყოფთ შემდეგ გარემოებებს:

- 650°C-მდე ლღევა და „სუფთა“ ნადნობს წარმოქმნის მხოლოდ სამი (D – 5, D – 6 და E – 5) შედგენილობა, რომლებიც ადვილდნობადი მინების მისაღებ საბაზო შედგენილობებად მიიჩნევა;

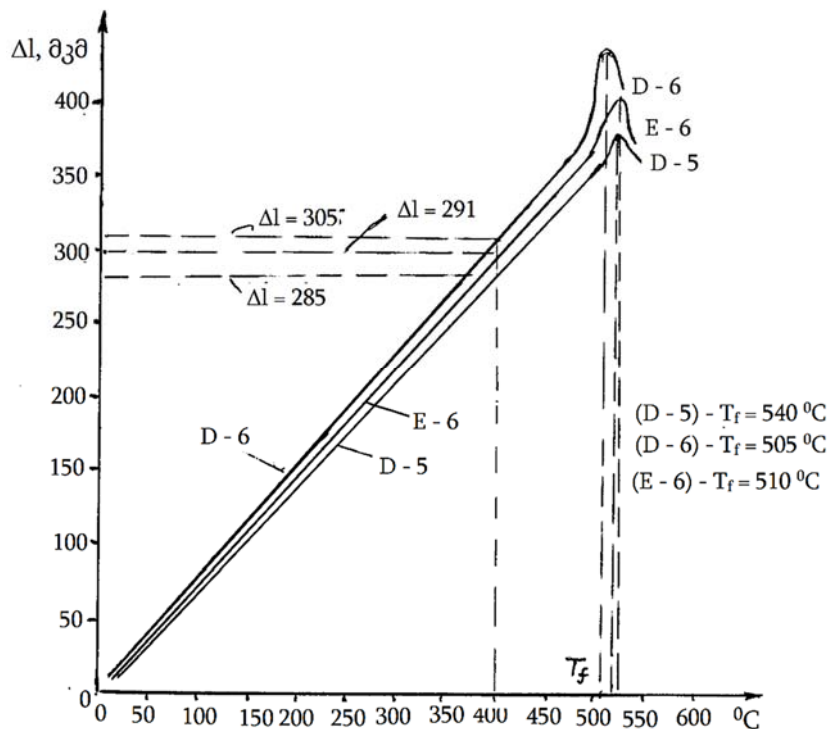
- 550–650°C-ზე ღრმა ტრანსფორმაციას განიცდის D – 7, D – 8 და ასევე E – 6, E – 7 შედგე-

ნილობები, რომლებიც მიდრეკილია გამინებისაკენ (უკვე 500°C-ზე), მაგრამ უფრო მაღალ ტემპერატურებზე იცვლის სტრუქტურას (კრისტალდება).

აღნიშნულიდან გამომდინარე, მომდევნო კვლევები (თერმული გაფართოება და ქიმიური მდგრადობა) წარიმართა სამი საბაზო და პერ-

სპექტიულ შედგენილობებთან მიჩნეული D-5, D-6 და E-5 შედგენილობის მინის გარშემო.

მინების თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის მნიშვნელობათა დასადგენად გამოყენებულ იქნა DKB - 4a ტიპის კვარცის დილატომეტრი.



**D - 5, D - 6 და E - 5 შედგენილობის მინის დილატომეტრიული მრუდები**

სამივე საკვლევი ნიმუშის „ $\Delta l - \Delta t$ “ დამოკიდებულება წარმოდგენილია სურათზე, საიდანაც ირკვევა, რომ E-5 მინის დილატომეტრიული მრუდი განლაგებულია D-5 და D-6 შედგენილობის მრუდებს შორის, ხოლო მინის ტრანსფორმაციის ანუ  $T_f$  ტემპერატურები, აღნიშნული შედგენილობის მინებისათვის, დიდად არ განსხვავდება და 500-540°C ტემპერატურულ ინტერვალში განლაგდება.

დილატომეტრიული მრუდის სრული ანალიზის და გამოთვლილი თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) მნიშვნელობები მოყვანილია მე-4 ცხრილში. ცხრილში წარმოდგენილი

მონაცემებიდან ჩანს, რომ ყველაზე მაღალი გაფართოების კოეფიციენტით ( $\alpha$ ) და დაბალი ტრანსფორმაციის (გარბილების დაწყების)  $T_f$  ტემპერატურით ხასიათდება D-6 შედგენილობის მინა.

საკვლევი მინების კიდევ ერთი მახასიათებელი თვისებაა ქიმიური მდგრადობა, რომელიც მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს მისი გამოყენების პრაქტიკულ შესაძლებლობას. ზოგადად მიჩნევენ, რომ კარგი საექსპლუატო თვისებების მქონე ადვილდნობადი მინის ქიმიური მდგრადობა მდულარე წყალთან მიმართებაში (ფხვნილის წონის დანაკარგის მიხედვით) 1%-ს არ უნდა აღემატებოდეს.

**დილატომეტრიული მრუდიდან მიღებული მონაცემები, მინების  $\alpha$ -ს და  $T_f$ -ის მნიშვნელობა**

შედგენილობის ინდექსი	დილატომეტრიულ მრუდზე აღებული მონაცემები და $\alpha$ -ს მნიშვნელობები				
	დაგრძელების მნიშვნელობა, მკმ		ნიმუშის სიგრძე	$\alpha \cdot 10^7, ^\circ C^{-1}$	ტრანსფორმაციის დაწყების ტემპერატურა ( $t_f$ ), $^\circ C$
	20 $^\circ C$ -ზე ( $l_0$ )	400 $^\circ C$ -ზე ( $l_1$ )	$l_0$ (მმ)		
D – 5	0	282	52,1	141,8	540
D – 6	0	304	52,5	152,4	505
E – 5	0	291	52,3	146,4	510

D-5, D-6 და E-5 შედგენილობის მინებს მართებაში. შესაბამისი ცდის ჩატარების პირობები (მათი ფრიტებიდან მომზადებულ ფხვნილებს) და საკვლევი მინის სინჯების ქიმიური მდგრადობა დაუდგინდა ქიმიური მდგრადობა წყალთან მი- წარმოდგენილია მე-5 ცხრილში.

**D – 5, D – 6 და E – 5 შედგენილობის მინების ქიმიური მდგრადობა**

მინის ინდექსი	ფრიტის მარცვლების საწყისი წონა, გ	ცდის ჩატარების პირობები		ფრიტის მარცვლების წონა (დამუშავების შემდეგ), გ	წყალში მასის დანაკარგები, %
		რეაგენტი	დამუშავების ხანგრძ., სთ		
D – 5	2,205	წყალი (98 ± 2 $^\circ C$ )	1	2,148	2,51
D – 5	2,313	„	1	2,253	2,63
E – 5	2,276	„	1	2,217	2,60

ქიმიური მდგრადობის განსაზღვრით დადგინდა, რომ მინების ქიმიური მდგრადობა დამოკიდებულია მინების შედგენილობაზე. მასზე გავლენას ახდენს შედგენილობებში წარმოდგენილი  $NaBO_2$ -ის და ძვლის ნაცრის შემცველობა – ორივე კომპონენტის რაოდენობის ზრდა იწვევს ქიმიური მდგრადობის შემცირებას, რაც უშუალო კავშირშია მინამასალებში წყალხსნად  $Na_2O$ ,  $B_2O_3$  და  $P_2O_5$ -ის კონცენტრაციათა ზრდასთან.

**3. დასკვნა**

შესწავლილ იქნა 1100 $^\circ C$ -ზე შესაბამისი კაზმების ხარშვით მიღებული „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი

– ნატრიუმის მეტაბორატი” სისტემის მინების მახასიათებელი თვისებები. დადგინდა, რომ დარბილება-დნობის (500–600 $^\circ C$  ინტერვალში) უნარით გამოირჩევა სამივე შედგენილობა, რომელთა საწყის ინგრედიენტთა შემცველობაა (მას. %): 30–40 მინის ლეწი, 10–20 ძვლის ნაცარი და 40–50  $NaBO_2$ . აღნიშნული შედგენილობის მინები ხასიათდება თვისებათა შემდეგი მაჩვენებლებით: თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის მნიშვნელობა ( $\alpha \cdot 10^7, ^\circ C^{-1}$ ) შეადგენს 141–152, ხოლო ქიმიური მდგრადობა (მასის წონითი დანაკარგი, %) 2,1-დან 2,5-მდე იცვლება. მიღებული შედეგების შეჯერებით შეიძლება დავასკვნათ, რომ სამივე საკვლევი

მინა მიჩნეულია საბაზო შედგენილობებად, რომელთა საფუძველზე შესაძლებელია მიზნობრივად გამოყენებული (მაგ., ფანჯრის სავიტრაჟე მინის მოხატვა-დეკორირება, ალუმინის ნაწარმის პასივაცია – მხატვრული მომინანქრება და სხვა) მინა-საფარების მიღება.

### ლიტერატურა

1. Брагина Л.Л. и др. Технология эмали и защитных покрытий. Харьков, изд. ХПИ, 2003
2. Эмалирование металлических изделий. Под ред. Варгина В.В., Л., Машиностроение, 1972

3. Павлушкин Н.М. Журавлев А.К. Легкоплавкие стекла. М., Энергия, 1970
4. ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე, თ. ჭეიშვილი. სამრეწველო ნარჩენების საფუძველზე ადვილდნობადი მინანქრების მიღების შესაძლებლობის შეფასება. კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები, ტ.23, N1(45), 2021, გვ. 3-9.
5. Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Г., Ходаковская Р.Я. Практикум по технологии стекла и ситаллов. М., Стройиздат, 1970.

---

UDC 666.1/2

## DETERMINATION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES OF LOW-MELTING GLASSES OBTAINED ON THE BASIS OF TECHNOGENIC MATERIALS

K. Baakashvili-Kiknadze

Georgian Technical University, Department of Chemical and Biological Technologies. Str Costava 69. 0160 Tbilisi. Georgia

E-mail: keti.baakashvili@gmail.com

**Resume: Goal.** Determination of main characteristic properties of glass materials obtained in the three-component system containing two kinds of technogenic waste – crushed glass and bone ash, and sodium metaborate as a main flux and establishment of prospects of their targeted use.

**Method.** Determination of fusibility, density, thermal expansion coefficient and chemical resistance of glasses obtained in three-component “crushed glass – bone ash –  $[\text{NaBO}]_2$ ” system using glass and enamel properties definition methods.

**Result.** Glasses of several composition which are softened up to 600°C have been singled out through determination of fusibility of low-fusible glasses of three series of composition (with 10, 20 and 30 mass % content of bone ash). Prospects of low-fusible glasses/enamels receipt from them and possible areas of application have been evaluated based on the study.

**Conclusion.** Synthesized glasses are characterized by high values of linear thermal expansion coefficient and low magnitudes of deformation temperature, acceptable chemical resistance. However, their targeted use for decoration of the surfaces of glass wares and for technical-decorative coating of surfaces of aluminum and its alloys requires targeted adjustment of properties and respectively compositions of obtained glasses.

**Key words:** glass composition, fusibility, thermal expansion, chemical resistance.

---

უაკ666.762.93

## მაღალტემპერატურული კომპოზიტის მიღება და კვლევა SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> სისტემაში

ზ. კოვზირიძე<sup>1</sup>, ნ. ნიჟარაძე<sup>1</sup>, გ. ტაბატაძე<sup>1</sup>, ნ. დარახველიძე<sup>1, 2</sup>, ზ. მესტვირიშვილი<sup>1, 2</sup>, ნ. ჯალაღონია<sup>2</sup>, ნ. ჯალაბაძე<sup>1</sup>, მ. ბალახაშვილი<sup>1</sup>

1. სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკური ცენტრი, ბიონანოკერამიკისა და ნანოკომპოზიტების ტექნოლოგიის ინსტიტუტი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. საქართველო. 0160, თბილისი, კოსტავას 69

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

E-mail: kowsiri@gtu.ge

**რეზიუმე:** მიზანი. მაღალი სიმძლავრის ჰეტეროდულური სიალონური კომპოზიტის მიღება SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> სისტემაში: ჯავშანტექნიკის, ავაციისა და რაკეტული ტექნიკისათვის, რეაქტიული ძრავებისა და მაღალტემპერატურული აირადი ტურბინების დეტალებისათვის.

**მეთოდი.** მეტალოთერმული პროცესით ტექნიკური აზოტის მედიაში, რეაქციული შეცხოების მეთოდით, მიღებულია კომპოზიტი 15% ღია ფორიანობით. მასალა გადამუშავდა ბურთულეზიან წისქვილში 10 საათის განმავლობაში, შემდეგ 10 წუთი ატრიტორში 1-3 მკმ ზომის დისპერსიულობამდე, ცხელი წნეხით მაღალი სიმკვრივისა და საექსპლუატაციო თვისებების მქონე პროდუქტი 1620°C-ზე სინთეზირდა.

**შედეგი.** β-SiAlON-ის წარმოქმნას რეაქციული შეცხოებით ასეთ დაბალ ტემპერატურებზე (ნაცვლად 1800°C-სა) ხელს უწყობს როგორც საწყისი ნედლეულის – ალუმინის, სილიციუმის, SiC-ს, გეოპოლიმერისა და პერლიტის კომპოზიცია, ისე მინისებრი პერლიტიდან წყლისა და აირების დეჰიდრატაციის და დეაერაციის პროცესის 860°C-ის ნაცვლად, როგორც ეს პერლიტის თერმოგრამაზე ფიქსირდება, შედარებით მაღალ -1000-1050°C ტემპერატურებზე გადანაცვლება, რაც სტრუქტურას აფაშრებს და დიფუზურ პროცესს აქტიურს ხდის. შედეგად, უკვე 1250-1300°C ტემპერატურებიდან სიალონის წარმოქმნა უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს, გეოპოლიმერ-პერლიტის კომპოზიციაში 1000-1050°C-ზე განვითარებული პროცესების გამო. სიალონის წარმოქმნა იმდენად ძლიერი

ფიზიკურ-ქიმიური პროცესია, რასაც ხელს უწყობს ამ ტემპერატურულ ინტერვალში აზოტირების შედარებით მაღალი წნევა და მეტალოთერმია, რომ წარმოქმნილი სიალონი მოიხმარს გეოპოლიმერის შიგა მოლეკულური გარდაქმნების შედეგად წარმოქმნილ მულიტის ოქსიდებს და მაღალ ტემპერატურებზე სინთეზისას, 1620°C-ზე, ფაზურ შედგენილობაში მულიტი აღარ გვხვდება. სიალონი ხდება უპირატესი ფაზა სტრუქტურაში – 57მას.%.

**დასკვნა.** პროცესის განვითარებას ხელს უწყობს მინისებრი დოპანტ-არაგაცის პერლიტის გამოყენება, რომელიც გეოპოლიმერთან ევტექტიკით დაბალ ტემპერატურებზე კარგ წინაპირობას ქმნის დიფუზური პროცესების ინტენსიურად წარმართვისათვის სხვა დანარჩენ კომპონენტებთანაც. ნაშრომში წარმოდგენილია ელექტრონულ-მიკროსკოპული, რენტგენოსტრუქტურული და რენტგენოსპექტრული ანალიზების შედეგები, ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების მათემატიკური გათვლები, რამაც დაადასტურა ჩვენი თეორიული დასკვნები პრაქტიკული ექსპერიმენტების საფუძველზე.

**საკვანძო სიტყვები:** კომპოზიტი; ცხელი წნეხა; სტრუქტურა; ფაზური შედგენილობა.

### 1. შესავალი

ცნობილია, რომ კარბიდები, ბორიდები, ნიტრიდები, სილიციდები, სხვა მასალებთან შედარებით, უპირატესია ისეთი საექსპლუატაციო თვისე-

ბებით, როგორცაა: მაღალი ცეცხლგამძლეობა, მაღალი მხურვალმედეგობა, კოროზიული მედეგობა აგრესიული მედიების მიმართ, სიმაგრე მოოსის სკალით მეტი 9-ზე, მაკრო- და მიკრომექანიკური თვისებები, სპეციფიკური ელექტრული და თბოფიზიკური თვისებები და სხვა [1-6]. ასეთ მასალებს განეკუთვნება სიალონები. კერამიკას, რომელიც შეიცავს სხვადასხვა ფაზას Si-Al-O-N სისტემაში ეწოდება სიალონი და მას მიაკუთვნებენ სიმონების კლასს. სიალონი, მაღალი საექსპლუატაციო თვისებებით, ხშირად იწოდება სუპერკერამიკად [7]. მისი სტრუქტურული ერთეულია ტეტრაედრი (Si,Al)(ON<sub>4</sub>), მსგავსად SiN<sub>4</sub> ტეტრაედრისა სილიციუმის ნიტრიდში (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) და SiN<sub>3</sub>O-ისა, სილიციუმის ოქსინიტრიდში. სიალონები შეიცავს ისეთ სტრუქტურულ ტიპებს და ფაზებს, რომლებიც ეფუძნება: აპატიტს, ალუმინის ნიტრიდს, სილიციუმის α და β ნიტრიდს, სილიციუმის ოქსინიტრიდს, შპინელს და სხვა. როგორც ზემოთ აღინიშნა, რეაქციულად შეცხოვრილი სიალონი 1800°C-ზე მიიღება, ცხელი წნეხით – 1750°C-ზე და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე, ხოლო ნეიტრალურ გარემოში – 1600°C-ზე. ამდენად, ჩვენ მიერ წარმოდგენილ ინოვაციურ ტექნოლოგიაში, ენერგეტიკული ეკონომია მნიშვნელოვანია. ცნობილი ტექნოლოგიით ნარევეს ამზადებენ: ალუმინის ნიტრიდის, სილიციუმის ნიტრიდის, ალუმინის ოქსიდის, სილიციუმის ორჟანგისა და სილიციუმის ოქსინიტრიდისაგან. იშვიათ შემთხვევაში გამოიყენება ლითიუმ-ალუმინის ან მაგნიუმ-ალუმინის შპინელი. ერთფაზიანი სიალონი შეიძლება არსებობდეს ვიწრო უბანში ფორმულით: Si<sub>(6-x)</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub>N<sub>(8-x)</sub> სადაც 0 ≤ x ≤ 5. საუკეთესო თვისებებს სიალონი ამჟღავნებს Si<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>N<sub>4</sub> სისტემაში, რომელიც სტრუქტურულად და სიმტკიცით ახლოსაა სილიციუმის ნიტრიდთან, ხოლო ქიმიური თვისებებით – ალუმინის ოქსიდთან. ტექნოლოგიურად მრავალი მეთოდით დაყალიბების უნარის გამო, გავრცელებულია ტექნიკის მრავალ დარგში [7]. უნდა აღინიშნოს, რომ უპირატესი მჭრელი თვისებებით გამოირჩევა სიალონი მინისებრი ფაზის მაღალი – 20–25% შემცველობისას [7]. თერმომედეგობით სიალონები თითქმის ყველა

კერამიკულ მასალაზე უპირატესია. KYON [7] ითვლება ყველაზე ეფექტურ მჭრელ მასალად. სიალონების რამდენიმე ტიპი არსებობს [8-9].

## 2. ძირითადი ნაწილი

საწყისი მასალების სახით გამოყენებული ნედლეულებისაგან შევადგინოთ 1-ელი ცხრილი, საიდანაც ჩანს ვარიაციული შედგენილობები. აღნიშნული შედგენილობიდან შევარჩიეთ 1450°C-ზე რეაქციულად შემცხვარი ნიმუში CH-7, მისი, სხვა შედგენილობებთან შედარებით, მაღალი ფიზიკურ-ტექნიკური მაჩვენებლების გამო: σ<sub>კ</sub>=258 მპა, ქიმიური მედეგობა წყლის მიმართ – 99.79, მჟავას მიმართ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ρ=1.84) – 99.25 და შემდგომი კვლევა გავაგრძელებთ მისი თვისებების შესწავლით. კაოლინის ქიმიური შედგენილობა (მას%): SiO<sub>2</sub>-46.45; TiO<sub>2</sub>-0.33; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-38.70; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.46; MgO – კვალი; CaO-0.36; Na<sub>2</sub>O-0.45; K<sub>2</sub>O-0.60; ხ.დ. 13.63; ცეცხლგამძლეობა – 1770°C. პოლოგის თიხა (მას.%): SiO<sub>2</sub>-47.92; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-35.20; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2.06; TiO<sub>2</sub>-0.28; CaO-0.40; MgO-0.30; K<sub>2</sub>O-0.65; Na<sub>2</sub>O-0.42; ხ.დ. 12.24. ცეცხლგამძლეობა – 1760°C.

მკვრივი, მაგარი მასალის მისაღებად რეაქციულად შეცხოვრილი მასალა ჯერ დაიფქვა ბურთულეებთან წისქვილში 10 საათის განმავლობაში და შემდეგ 10 წუთი ატრიტორში. ცხელი დაწნეხისთვის პრეკურსორი მომზადდა ჰიდრავლიკური წნეხის საშუალებით, რომლის დისკის დიამეტრია 70 მმ, სიმაღლე – 5 მმ და ცილინდრი ზომით 15 მმ, 20 მპა წნევით. ცხელი დაწნეხა 1620°C-ზე ვაკუუმში 30 მპა წნევით ჩატარდა. ვაკუუმი 10<sup>-3</sup> პა შეადგენდა, დაყოვნება საბოლოო ტემპერატურაზე – 10 წთ. გამოწვის რეჟიმი: 20–500°C-მდე 7<sup>0</sup> წთ, 500–1400°C 150 წთ, 1400–1620°C, 10 წთ. გაცივება – 10 წთ. ცხლად დაწნეხილი ნიმუშის ღია ფორიანობამ 0.18% შეადგინა, საერთო ფორიანობა – 2.58 %, σ<sub>კ</sub>=1910 მპა, σ<sub>ღ</sub> = 470 მპა. უნდა აღინიშნოს, რომ მასალა იმდენად მაგარი აღმოჩნდა, რომ დისკების აღმასის ქარგოლით ჭრისას რამდენიმე დაზიანდა. ამის შემდეგ შევეცადეთ 3000 ატმოსფერო წყლის ჭავლის წნევით გაგვეჭრა დისკი, მაგრამ უშედეგოდ. ე.ი სინთეზირებული მასალების ჭრით



დამუშავება შესაძლებელია მხოლოდ ლაზერით. შემდეგ ნიმუშები გამოიცადა როკველის ხელსაწყოზე, სადაც HRA-მ შეადგინა 94. მიღებული მასალების დინამიკური მიკროსისალე და დრეკა-

დობის მოდული განისაზღვრა ISO – 14577 საერთაშორისო სტანდარტის მოთხოვნების შესაბამისად, დინამიკურ ულტრამიკროსისალის ტესტერზე DUN-211 S. შედეგები წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში და 1-ელ სურათზე.

ცხრილი 1

**ნარეგების შედეგნლობა**

კომპოზიტის ინდექსი	საწყისი კომპონენტის შემცველობა, მას. %								
	კალინი პროსიანაია (უკრაინა)	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Si	პერლიტი არაგაცის (სომხეთი)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	პოლოგის თიხა (უკრაინა)
SN-1	80,00	20.00							
SN-2	20.00	10.00		70.00					
SN-3	20.00	10.00	70.00						
SN-6	18.52	18.52	18.52	18.52	20.37	2.78	1.85	0.92	
SN-7	13.89	23.15		27.78	25.00	3.0	1.85	0.92	4.41
SN-8	13,89	23,15	27,78		25,00	2,78	1,85	0,92	4,63

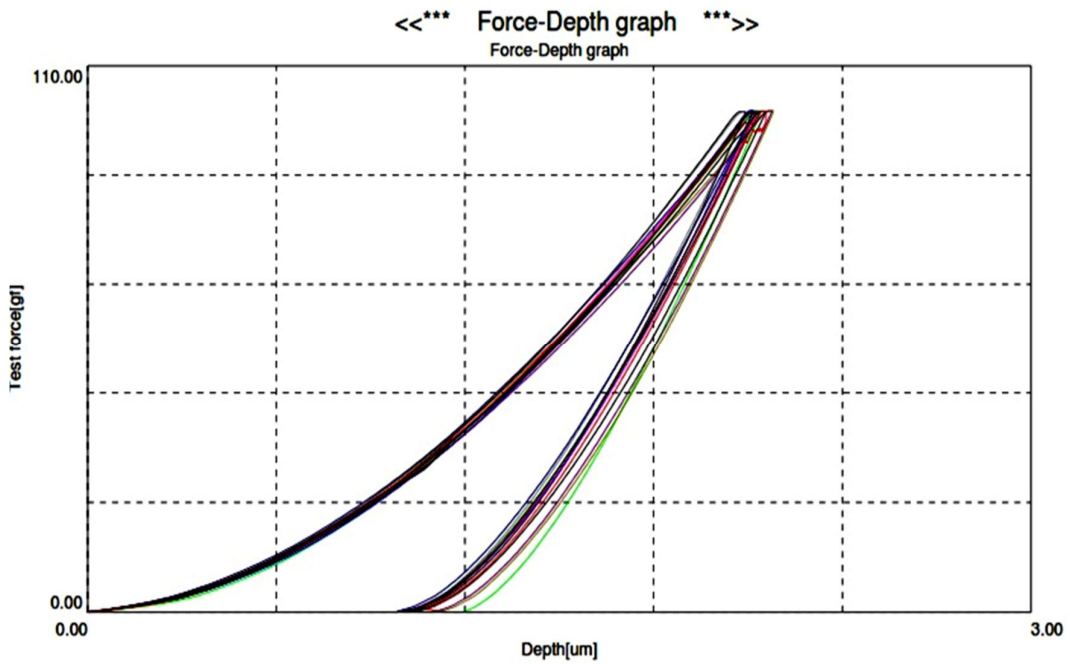
ცხრილი 2

**CN-7 კომპოზიტის ტექნიკური მახასიათებლები 1N დატვირთვისას  
<<Testcondition-SiAlon-100 >>**

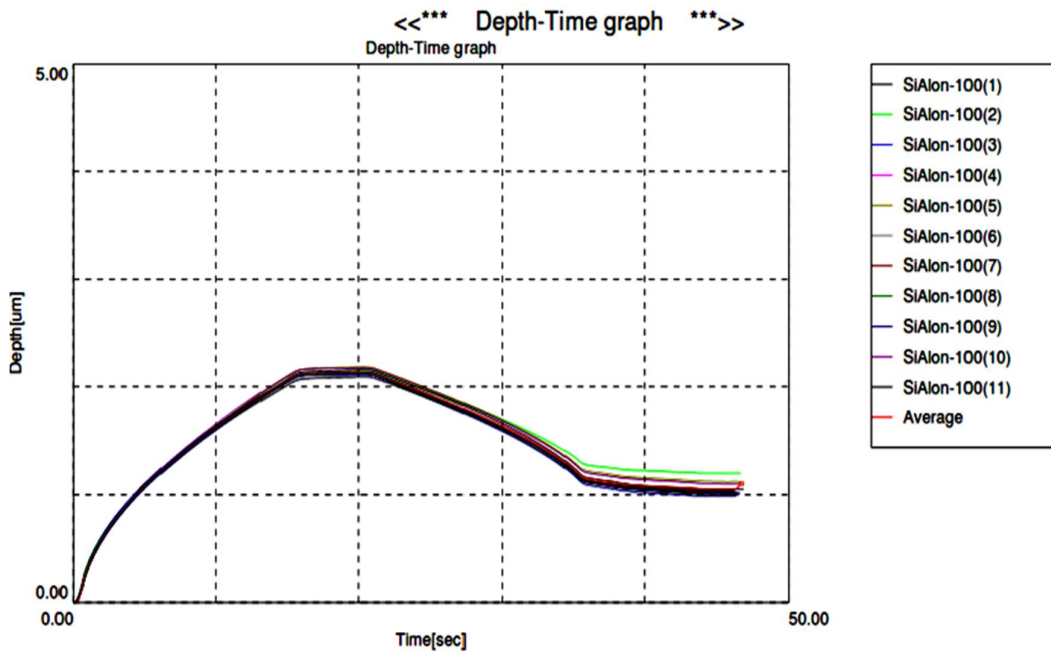
Testmode	Load-unload	SampleNo.	#1
Samplename	SiAlon-zv	Minimumforce	0.200[gf]
Testforce	100.000[gf]	Holdtimeatload	5[sec]
Loadingspeed	1.0(7.1448[gf/sec])	Testcount	23
Holdtimeatunload	3[sec]	Parameter	20
Parametername	Temp	Comment	20.06.17-SiAlon-zv-100;DHV5-3
Poisson'sratio	0.190	Indentertype	Vickers
Cf-Ap,AsCorrection	ON	Objectivelens	50
Readtimes	2	Indenterpoisson'sratio	0.070
Indenterelastic	1.140e+006[N/mm <sup>2</sup> ]		

**<Testresult>**

SEQ	Fmax	hmax	hp	hr	DHV-1	DHV-2	Eit	Length	HV	Dataname
	[gf]	[um]	[um]	[um]			[N/mm2]	[um]		
1	100.753	2.0927	1.0353	1.3623	1124.606	4595.143	2.023e+005	12.133	1269.108	SiAlon-100(1)
2	100.862	2.1408	1.1973	1.4454	1075.849	3439.729	2.028e+005	10.673	1641.878	SiAlon-100(2)
3	100.954	2.1185	1.0085	1.3472	1099.608	4852.203	1.911e+005	11.989	1302.427	SiAlon-100(3)
4	100.844	2.1300	0.9980	1.3526	1086.598	4949.256	1.881e+005	11.623	1384.295	SiAlon-100(4)
5	100.935	2.1822	1.1183	1.4290	1036.181	3945.265	1.855e+005	12.721	1156.721	SiAlon-100(5)
6	100.624	2.0945	1.0240	1.3135	1121.301	4691.482	1.921e+005	11.843	1330.428	SiAlon-100(6)
7	100.551	2.1229	1.0193	1.3350	1090.715	4731.042	1.868e+005	11.551	1397.624	SiAlon-100(7)
8	100.826	2.1357	1.0016	1.3362	1080.626	4912.610	1.834e+005	11.550	1401.679	SiAlon-100(8)
9	100.826	2.1173	0.9846	1.2881	1099.473	5084.458	1.815e+005	11.404	1437.730	SiAlon-100(9)
10	100.825	2.1761	1.0974	1.4160	1040.858	4092.733	1.848e+005	11.697	1366.620	SiAlon-100(10)
11	100.807	2.1566	1.0491	1.3859	1059.580	4477.130	1.857e+005	-----	-----	SiAlon-100(11)
Average	100.801	2.1334	1.0485	1.3646	1083.218	4524.641	1.895e+005	11.718	1368.851	
Std.Dev.	0.120	0.029	0.064	0.049	28.966	502.835	7155.469	0.529	125.730	



ა)



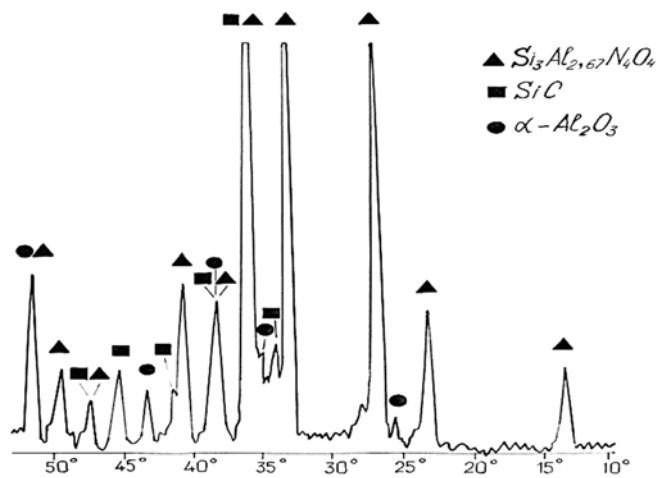
ბ)

სურ. 1. CH-7 კომპოზიტის მიკრომექანიკური მახასიათებლები 1 N დატვირთვისას  
 ა) ინდენტორის მასალაში ჩაღრმავების დამოკიდებულება დროზე, ბ) ინდენტორის  
 დატვირთვის დამოკიდებულება ანაბეჭდის სიღრმეზე

მე-2 ცხრილში და 1-ელ სურ-ზე ჩანს, რომ ანაბეჭდები მატრიცაში, რომელიც სიალონურია, თითქმის ერთი და იგივე სიღრმისაა 1N (100 გ) დატვირთვის დროს. აქედან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მოცემული ფაზური შედგენილობის - SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> მასალისათვის ოპტიმალური დატვირთვა 1 N შეადგენს. ცხრილიდან ჩანს, რომ სისაღე ვიკერსის მიხედვით 13.68 GPa-ია, ანაბეჭდის საშუალო სიღრმე (სურ. 1) – 2.13 მკმ, დინამიკური სისაღე – DHV=10.83 GPa, ელასტიკურობის მოდული – E=189 MPa, ანაბეჭდის

დიაგონალი – 11.72 მკმ. ცხრილი და გრაფიკული მასალა სურათზე გვიჩვენებს, რომ კომპოზიტის მატრიცა ჰომოგენურია და თვისებებში რყევები არ ახასიათებს, მიუხედავად იმისა, რომ ანაბეჭდები მატრიცის სხვადასხვა ადგილას იქნა აღებული.

მე-2 სურათზე მოცემულია მასალის ფაზური შედგენილობა. X-ray გადაღებულია DRON-3 საშუალებით. ფაზური ანალიზი კი გვიჩვენებს სიალონის, სილიციუმის კარბიდის და თიხურისგან წარმოქმნილი ალუმინის ოქსიდის შემცველობას.



სურ. 2. CN 7 კომპოზიტის X-ray

ნიმუშების სტრუქტურულ-მორფოლოგიური და ელემენტური შედგენილობის კვლევა შესრულებულია იაპონური კომპანია JEOL-ის მასკანირებელი JSM-6510LV ელექტრონული მიკროსკოპით, რომელიც აღჭურვილია ინგლისური კომპანია OXFORD INSTRUMENTS-ის ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენოსპექტრული X-Max<sup>N</sup> ანალიზატორით. ზედაპირის ელექტრონული გამოსახულებები მიიღეს როგორც მეორად (SEI), ისე არეკლილ (BES) ელექტრონებში, 20 კვ ამაჩქარებელი ძაბვის გამოყენებით. ზოგიერთ შემთხვევაში, ზედაპირული მუხტის შემცირების მიზნით, ნიმუშები დაიფარა Pt-ის დაახლოებით 10 ნმ ფენით, იაპონური კომპანია JEOL-ის ვაკუუმური JEC-3000FC დაფარვის მოწყობილობით.

სტრუქტურული კვლევისათვის გამოვიყენეთ ელექტრონული მიკროსკოპული მორფოლოგიური სურათები დიფერენცირებული გადიდებით, რათა ფაზური კვლევისას უკეთესად განგვესაზღვრა კრისტალების და ფორების ზომები. ფორები ძირითადად მომრგვალებულია, რაც მასალის სრულად შეცხოებაზე მიუთითებს (სურ. 3). დახურული ფორების საერთო მოცულობა 2.4%-ს შეადგენს, ხოლო მათი საშუალო დიამეტრი 1.7 მკმ-ია. ეს მონაცემები სრულად პასუხობს ბუდვორტის კვლევების შედეგებს ფორების მოცულობითი შემცველობისა და მათი გავლენის შესახებ მატრიცაში მასალის ტექნიკურ თვისებებზე [10]. სხვა სახის ფორები, როგორცაა გამჭოლი და ნახევრად გამჭოლი, სტრუქტურაში არ შეინიშნება.

კრისტალური ფაზის მორფოლოგიური ანალიზისათვის ელექტრონულ-მიკროსკოპული სურათების მიხედვით მოცემული სხვადასხვა გადიდება საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს თითოეული ფაზის აგებულება და ურთიერთგანლაგება. მცირედი გადიდების შემთხვევაში ( $\times 100$  და  $\times 270$ ) სიალონის მკვეთრი, უპირატესი შემცველობა სურათზე არ ფიქსირდება, სავარაუდოდ მისი არაგამოკვეთილი ფორმის გამო. ამ შემთხვევაში დომინანტი ფაზა, სურათებიდან გამომდინარე, არის SiC. რაც შეეხება ალუმინის ოქსიდს, რომლის არსებობა დასტურდება რენტგენოსტრუქტურული ანალიზითაც, ძირითადად წარმოიქმნება გეოპოლიმერიდან, რომლის შემცველობა ნარევი 18%-ია. ასევე შესაძლებელია მისი მცირე რაოდენობა ალუმინის ფხვნილისაგან წარმოიქმნას, ვინაიდან აზოტი ტექნიკურია, მისი შემცველობა კრისტალური ფაზის ანალიზისა და მარცვლების დათვლის მეთოდის გამოყენებით მიღებულ იქნა 5.7%-ს ტოლად. სილიციუმის კარბიდის შემცველობა სტრუქტურაში თითქმის უცვლელი რჩება, დაახლოებით 27.78%.  $\times 2700$  გადიდებისას სიალონის კონტურები სურათზე გამოიკვეთება და მისი ფორმები მორფოლოგიურ სურათზე უკეთესად შესამჩნევია, მაგრამ არა გამოკვეთილი. განსხვავებული სურათი გვაქვს  $\times 5500$  გადიდებისას, აქ უკვე შეიძლება ითქვას, რომ სტრუქტურა სიალონურია და ეს ფაზა მატრიცაში ვიზუალურად დომინანტური ხდება. მისი შემცველობა ყველა წინა მორფოლოგიებში ჩვენი გათვლებით იგივე იყო – 56.7%, მაგრამ ვიზუალურად ეს არ ჩანდა. ამდენად, სიალონური SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> შედგენილობის ჩვენ მიერ მიღებულ მასალებში, მორფოლოგიური სურათების ანალიზიდან გამომდინარე, მინიმალური გადიდება ვიზუალური ანალიზისათვის 5500-ს შეადგენს.  $\times 10\ 000$ -ზე ნათლად იკვეთება სიალონის ფურცლოვანი სტრუქტურა და მისი დომინანტური როლი მორფოლოგიურ სურათზე. ეს არის კლასიკური სიალონური მორფოლოგია. სხვა მდგენელები, მაგალითად SiC, რომლის შემცველობა 27.78 მას. %-ია, ნაკლებად დაიმზირება სიალონის ფურცლებით გადაფარვის გამო, თუმცა მისი როლი

მასალის საექსპლუატაციო თვისებების ჩამოყალიბებაში მაღალია. მინისებრი ფაზის როლი, რომელიც ჩვენი გათვლით 7.4% შეადგენს, ასევე მაღალია და შევეცადეთ წარმოგვედგინა ქვემოთ, მასალის წარმოქმნის პროცესის მათემატიკურ გათვლაში. მართალია, 3% პერლიტური დოპანტი დამატებულია, მაგრამ მისი ლლობისას დაბალ, 1240°C ტემპერატურაზე გეოპოლიმერის ინგრედიენტებთან წარმოიშობა ევტექტიკური ნალღობები, განსაკუთრებით ტუტე ოქსიდებთან, რის შედეგადაც მასალაში მინისებრი ფაზის შემცველობა 1620°C-ზე მოიმატებს.

ჩატარდა ფართო რენტგენოსპექტრული ანალიზი (სურ. 4-10), რომელიც საშუალებას იძლევა გამოსაკვლევ ობიექტში განვსაზღვროთ უმრავლესი ქიმიური ელემენტების უმცირესი რაოდენობები (მეთასედი %-ლი შემცველობები). რენტგენოსპექტრული ანალიზი ეფუძნება ელემენტების მახასიათებელი რენტგენული სპექტრის გამოსხივების ხაზების სიხშირის დამოკიდებულებას მათ ატომურ ნომერზე და ამ ხაზების ინტენსიურობებს შორის კავშირზე, ასევე ატომების იმ რაოდენობაზე, რომლებიც მონაწილეობს მათ წარმოქმნაში.

მე-4 სურ-ზე წარმოდგენილია მასალის მიკრორენტგენოსპექტრული იმიჯი 1, რომელიც მიღებულია ცხელი წნეხით 1620°C-ზე. ნიმუშზე აღებულია 4 “Spectrum” (სპექტრი). სურათზე და ცხრილში მოცემულია შემადგენელ ელემენტთა სქემა და მათი პროცენტული შემცველობა, საიდანაც ჩანს, რომ მასალის ძირითადი შემადგენელი სიალონია, რაც დასტურდება ჩვენი გათვლებითაც. მეოთხე სურათზე სიალონის შემცველი ელემენტების – სილიციუმის, ალუმინის, ჟანგბადისა და აზოტის პროცენტული შემცველობა ოთხივე სპექტრში თითქმის ერთნაირია. ოდნავ განსხვავებულია სპექტრი 4, სადაც მეტია აზოტის და ნაკლებია ალუმინის შემცველობა, მაგრამ ეს იმდენად მცირეა, რომ სურათის მორფოლოგიურ ერთგვაროვნობას არ აზიანებს. ნახშირბადი დაფიქსირებულია თითქმის თანაბარი რაოდენობით ოთხივე სპექტრში. მისი რაოდენობა ადასტურებს SiC-ს მნიშვნელოვან შემცველობას კომპოზიტში. ჩვენი გათვლებით ეს სიდიდე 27.78 მას. %-ია. ჟანგბადის მნიშვნელოვანი

მდგენელი სიალონის გარდა ადასტურებს  $Al_2O_3$ -ის მცირე შემცველობას – 5.7 მას.%. ამ შემთხვევაში ჟანგბადის უმეტესი რაოდენობა სიალონმა მოიხმარა.

მე-5 ელექტრონული სურათის ანალიზის მიხედვით 25 და 26 სპექტრზე გამოიკვეთება რკინის შემცველობა, შესაბამისად, 21.9 და 22 მას %, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ რენტგენოსპექტრული ანალიზის მიხედვით რკინის აღნიშნული შემცველობა მიღებულია გეოპოლიმერის შედგენილობიდან, რის გამოც ამ ორ სპექტრში, სავარაუდოდ, სიალონისა და ალუმინის ოქსიდის შემცველობა მცირეა. დანარჩენი ოთხი სპექტრი გვიჩვენებს სიალონის, SiC-ის და  $Al_2O_3$ -ის შემცველობას. უმნიშვნელო რაოდენობები, როგორებიცაა: Mg, Y – შეტანილია როგორც დოპანტი, კრისტალების ზრდის ინჰიბიტორად, ხოლო Ca, Zr, Mn, Fe – გეოპოლიმერის ქიმიური შედგენილობიდან და ასეთ მცირე მასურ შემცველობებს საექსპლუატაციო თვისებებზე მნიშვნელოვანი გავლენის მოხდენა არ შეუძლია, ეს შეიძლება იყოს მხოლოდ მცირედი განსხვავება თეორიული გათვლებით, რაც ნებისმიერ მასალაში ვლინდება.

მე-6 ელექტრონული სურათის ანალიზით მხოლოდ 31 და 35 სპექტრზე ვლინდება რკინის შემცველობა 5.5 და 4.2 მას.%, რაც ასევე, ჩვენი აზრით, გეოპოლიმერის შედგენილობიდან არის შეტანილი. დანარჩენ სპექტრებში, ანალიზის მიხედვით, მასალის ფაზური შემცველობა ძირითადად დაცულია მცირედი გადახრებით ფაზათა მასობრივი პროცენტიდან, რაც ჩვეულებრივი მოვლენაა.

მე-9 ელექტრონული სურათიდან ჩანს, რომ ყველა სპექტრი გვაძლევს SiAlON, SiC,  $Al_2O_3$  ფაზურ შედგენილობას. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ SiC, ატომური პროცენტების შემცველობით, სრულად არ იმზირება. როგორც ჩანს, სიალონმა გადაფარა მისი შემცველობა და ნახშირბადი სპექტრზე მხოლოდ 8% განისაზღვრა. დანარჩენი მდგენელები – Ca, Zr, Mg, Fe უმნიშვნელო რაოდენობით აღირიცხება.

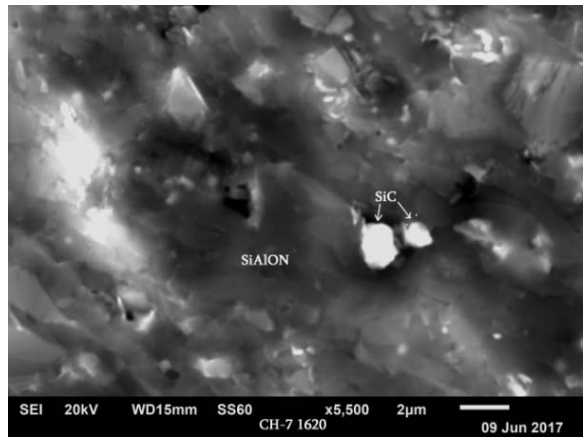
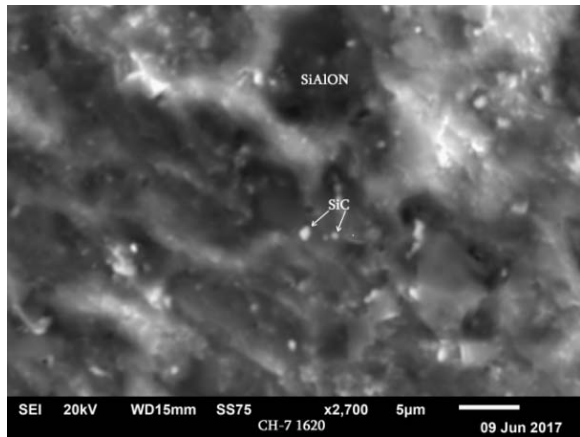
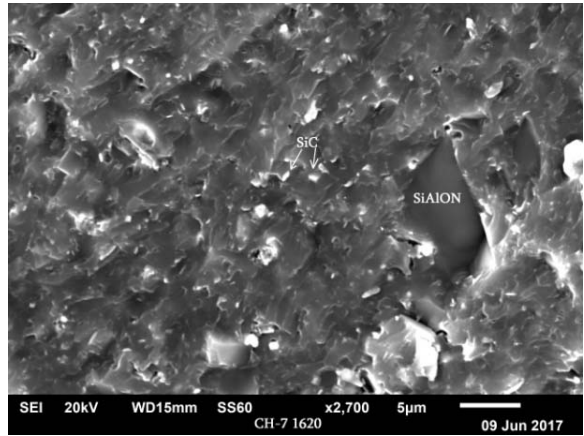
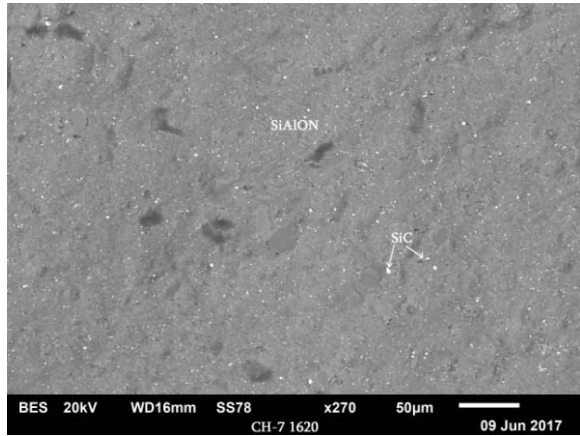
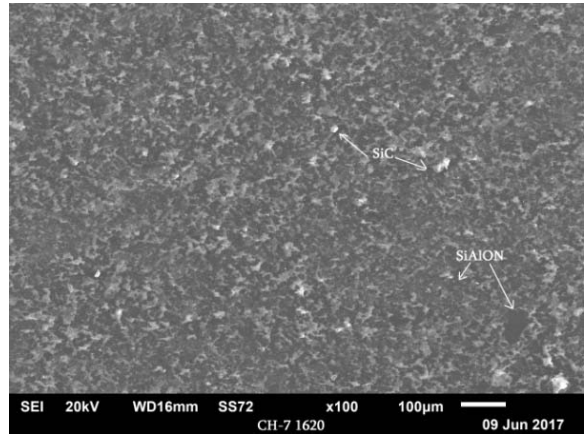
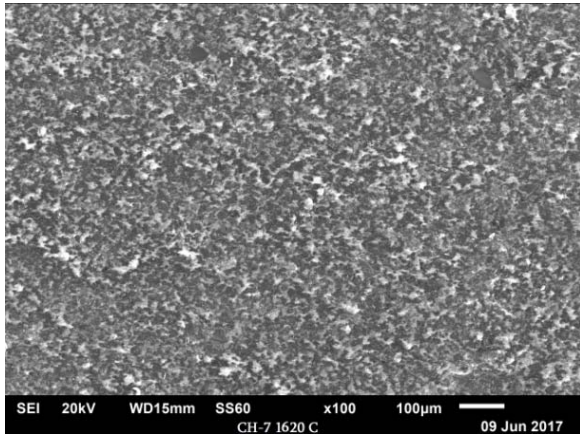
საინტერესოა მე-13 ელექტრონული სურათი. აქაც 74 -ე და 76-ე სპექტრებში რკინის შემცველობა,

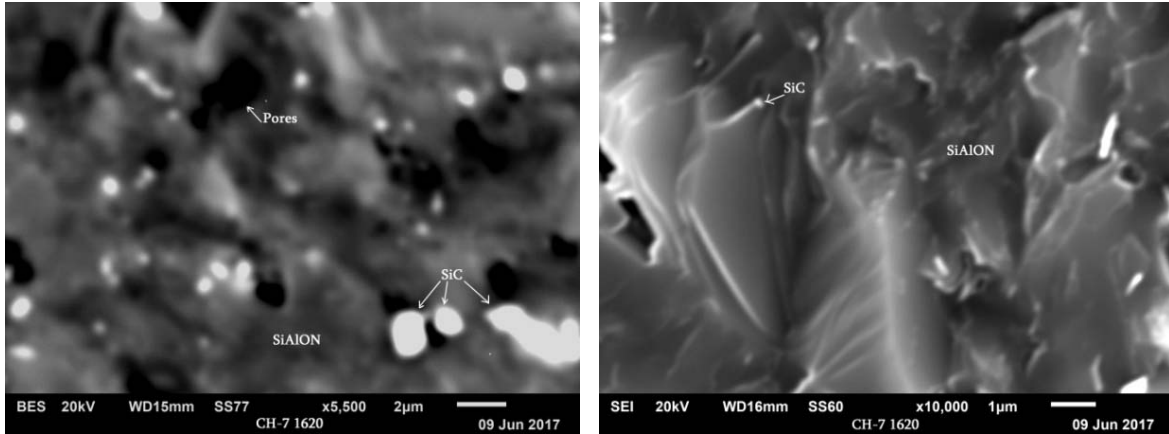
შესაბამისად, 26.3 და 38 %-ია, რაც გეოპოლიმერის მიერ არის შეტანილი. 77, 78 და 79 სპექტრები გვიჩვენებს მხოლოდ SiC-ს შემცველობას. როგორც ჩანს, სპექტრი SiC მარცვლისაგან არის აღებული. 80 და 81 სპექტრი ძირითადად სიალონია, ხოლო 82-ში რკინის შემცველობა მცირედ – 6%-ით გამოვლინდა გეოპოლიმერიდან. გეოპოლიმერიდან შეტანილი დანარჩენი ელემენტები უმნიშვნელო რაოდენობითაა.

მე-17 ელექტრონული სურათი გვიჩვენებს, რომ, 104–107 სპექტრების მიხედვით, ფაზურ შედგენილობაში მხოლოდ სილიციუმის კარბიდი ანუ სპექტრი აღებულია SiC მარცვლებიდან. დანარჩენი სპექტრები გვიჩვენებს კომპოზიტის ფაზურ შედგენილობას SiC-SiAlON- $Al_2O_3$  სისტემაში.

სიალონის ფურცლოვანი სტრუქტურა ნათლად იკვეთება მე-18 ელექტრონულ სურათზე. აქ გადიდება 10000-ია. 111 და 113 სპექტრები გვიჩვენებს მხოლოდ სილიციუმის კარბიდის შემცველობას ანუ სპექტრი აღებულია კარბიდის მარცვალში. დანარჩენ სპექტრებზე დაიმზირება მიღებული კომპოზიტის ფაზური შემცველობა SiC-SiAlON- $Al_2O_3$  სისტემაში.

სურათებზე წარმოდგენილი მიკრორენტგენოსპექტრული ანალიზები მკვეთრ სურათს იძლევა აღებულ წერტილებში არსებული ფაზის შემცველი ელემენტების შესახებ, საიდანაც ჩანს სიალონის, სილიციუმის კარბიდისა და კორუნდის შემცველი ელემენტების ძირითადი ფაზების პროცენტული შემცველობა, გარდა რამდენიმე სპექტრისა, სადაც მხოლოდ სილიციუმის კარბიდის შემცველობაა აღრიცხული. ეს არის ჩვეულებრივი მოვლენა რენტგენოსპექტრული ანალიზისათვის. ყველა უბანზე პროცენტული თანაფარდობა, გარდა ასეთი გამონაკლისებისა, თითქმის ერთნაირია, რაც საკვლევი კომპოზიტის ერთგვაროვან სტრუქტურაზე მიუთითებს იმ ფაზური შედგენილობით, რომელიც ჩვენ გამოვთვალეთ მას.%. 56.7 – სიალონი, 27.78 – სილიციუმის კარბიდი, 5.7 – ალუმინის ოქსიდი, 7.4 – მინისებრი ფაზა, 2.4 – ფორიანი ფაზა და გეოპოლიმერის ნარჩენი (სურ. 4–10).

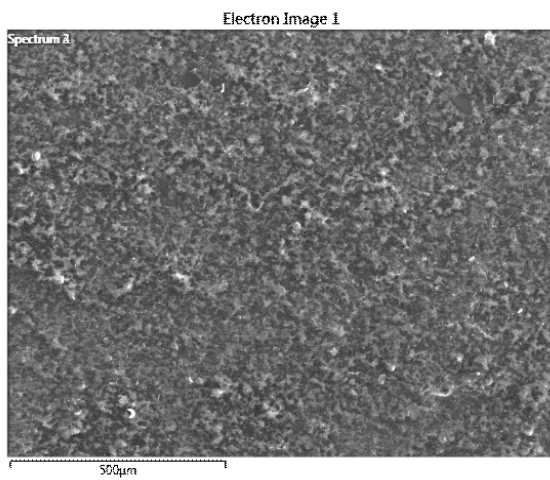




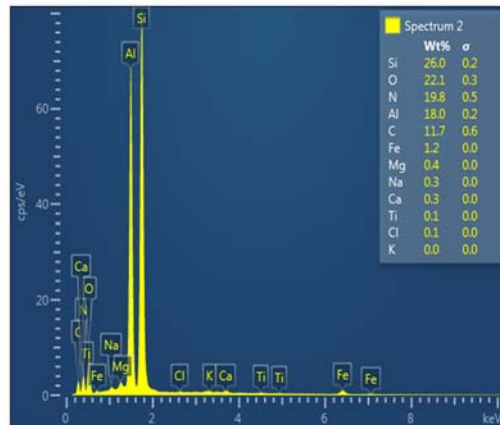
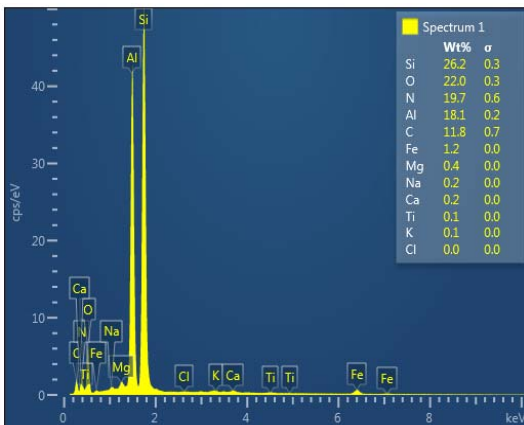
სურ. 3. CH-7 ნიბუმის ელექტრონულ-მიკროსკოპული სურათები სხვადასხვა გადიდებით

EDS CH-7 1620oC

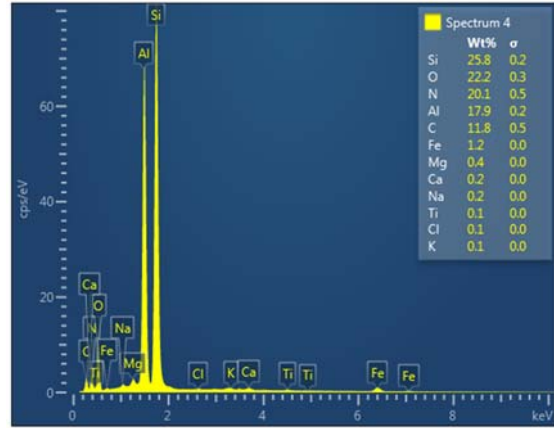
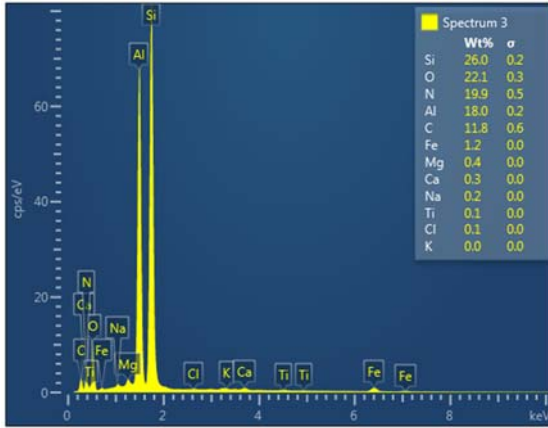
6/9/2017



Click here to enter text.







სურ. 4. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 1. ანალიზისათვის აღებულია 4 წერტილი

ცხრილი 3

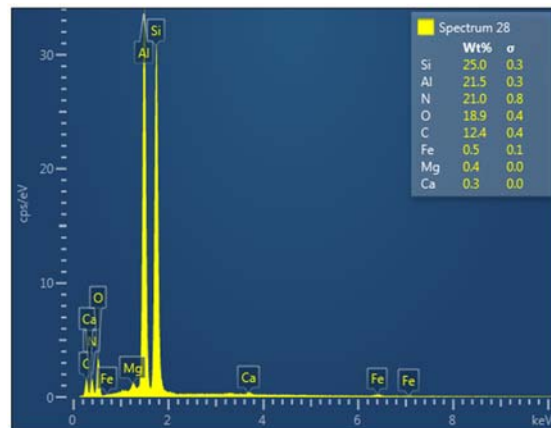
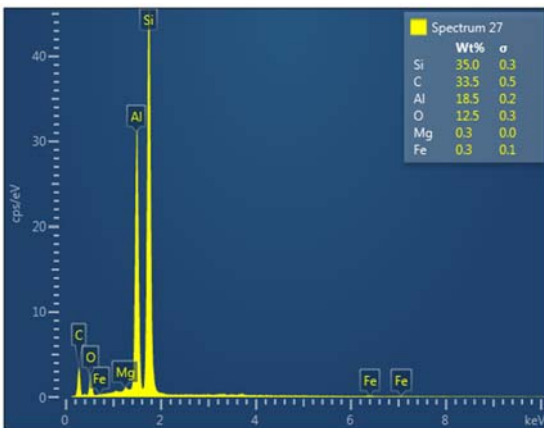
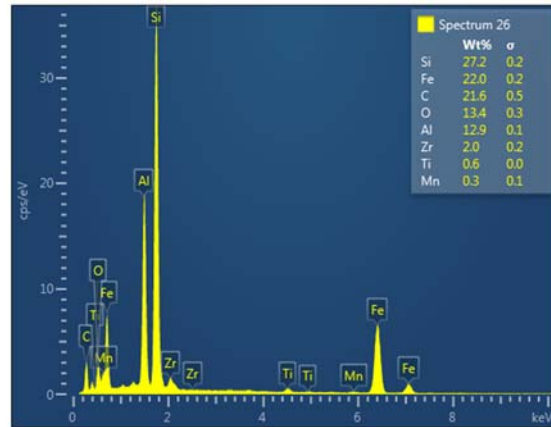
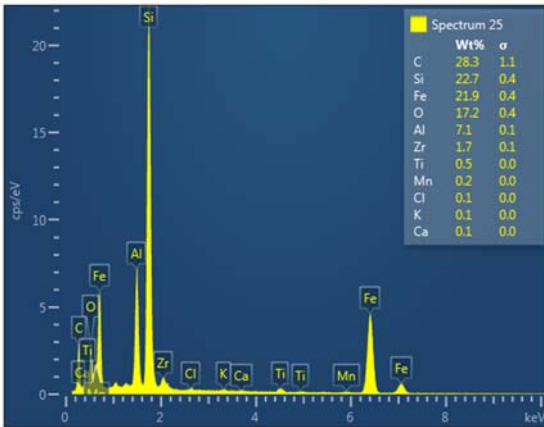
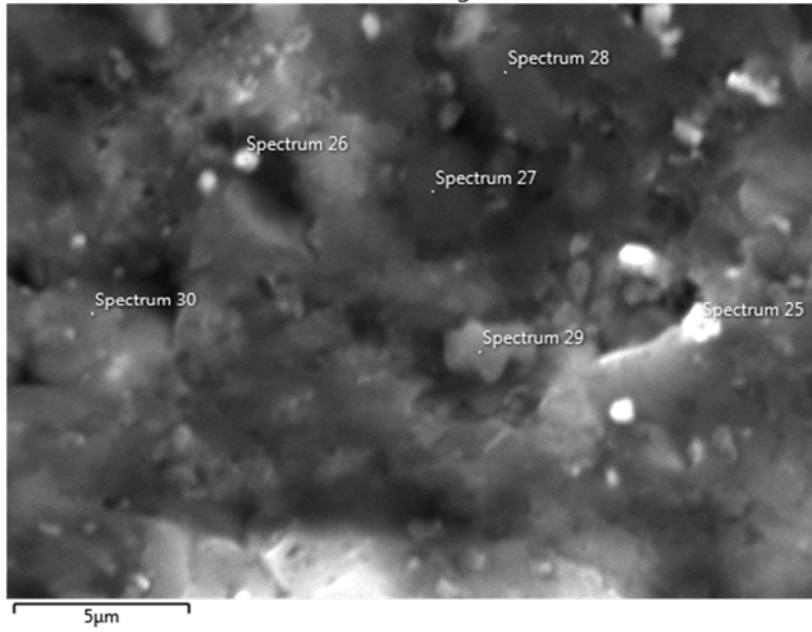
ელემენტთა შედგენილობა

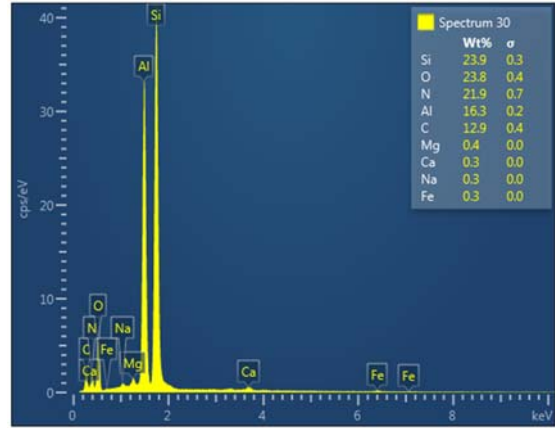
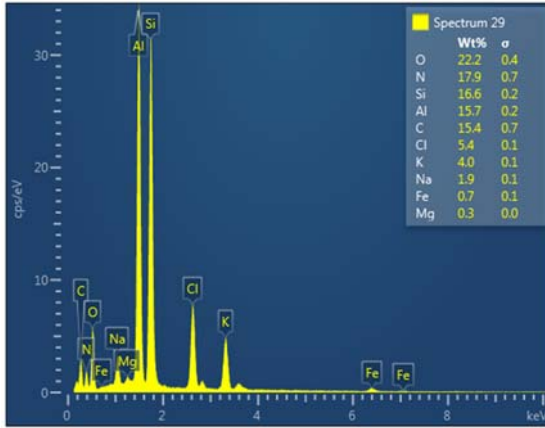
Result Type	Atomic %			
Spectrum Label	Spectrum 4	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
C	17.99	18.17	18.01	18.02
N	26.34	25.91	26.01	26.16
O	25.52	25.34	25.50	25.46
Na	0.18	0.18	0.21	0.19
Mg	0.28	0.28	0.29	0.28
Al	12.19	12.35	12.32	12.26
Si	16.88	17.19	17.07	17.04
Cl	0.04	0.02	0.04	0.03
K	0.03	0.03	0.02	0.01
Ca	0.11	0.10	0.12	0.12
Ti	0.05	0.04	0.04	0.04
Fe	0.39	0.40	0.38	0.38
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Max	18.17	26.34	25.52	0.21	0.29	12.35	17.19	0.04	0.03	0.12	0.05	0.40
Min	17.99	25.91	25.34	0.18	0.28	12.19	16.88	0.02	0.01	0.10	0.04	0.38
Average	18.05	26.10	25.46	0.19	0.28	12.28	17.05	0.03	0.02	0.11	0.04	0.39
Standard Deviation	0.08	0.19	0.08	0.01	0.00	0.07	0.13	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01

EDS CH-7 1620°C

Electron Image 5





სურ. 5. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 5. ანალიზისათვის ადებულია 6 წერტილი  
და ცხრილი 4 ელემენტა შედგენილობით

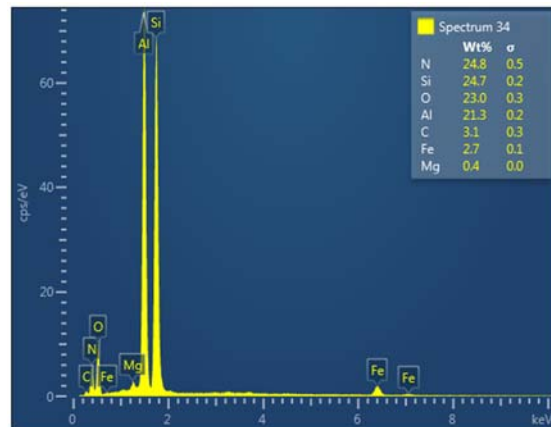
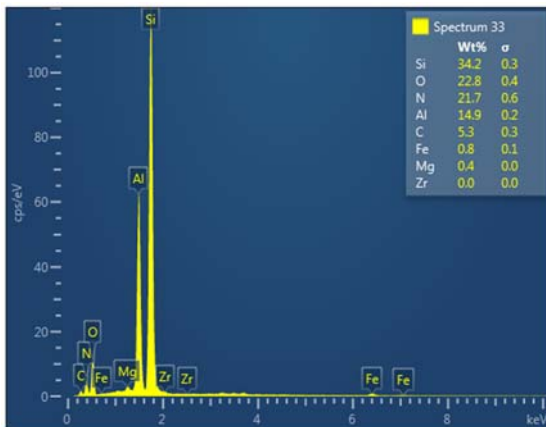
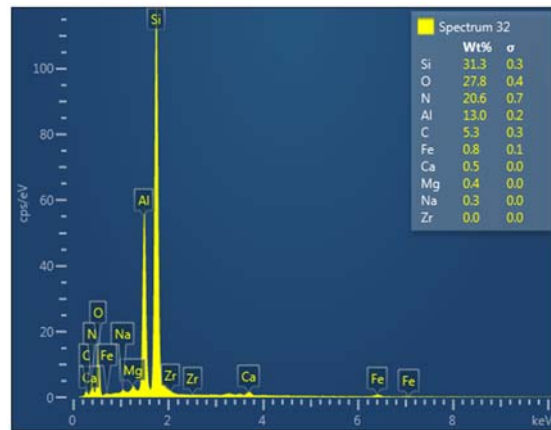
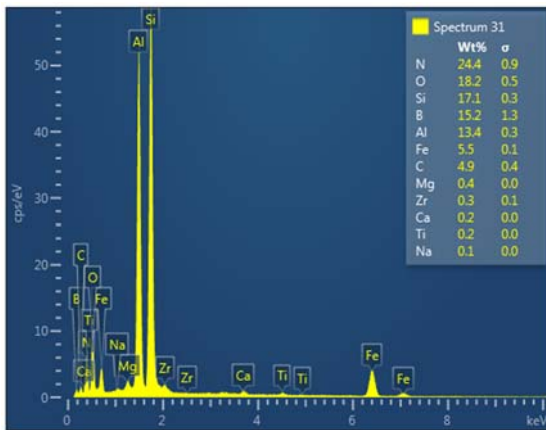
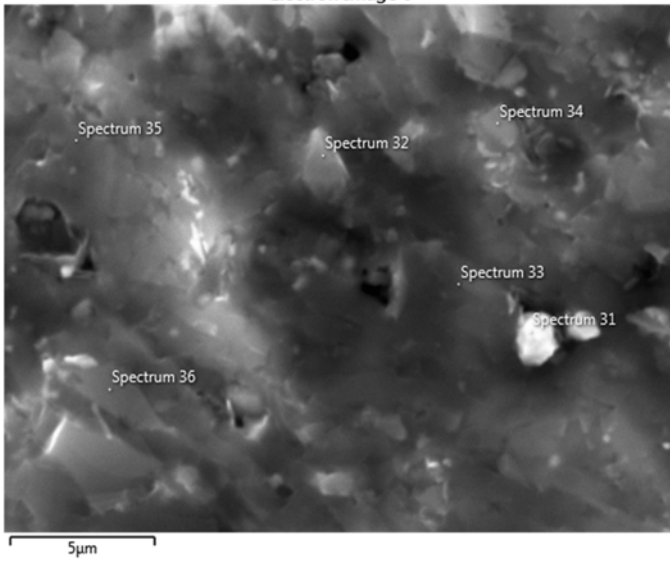
ცხრილი 4

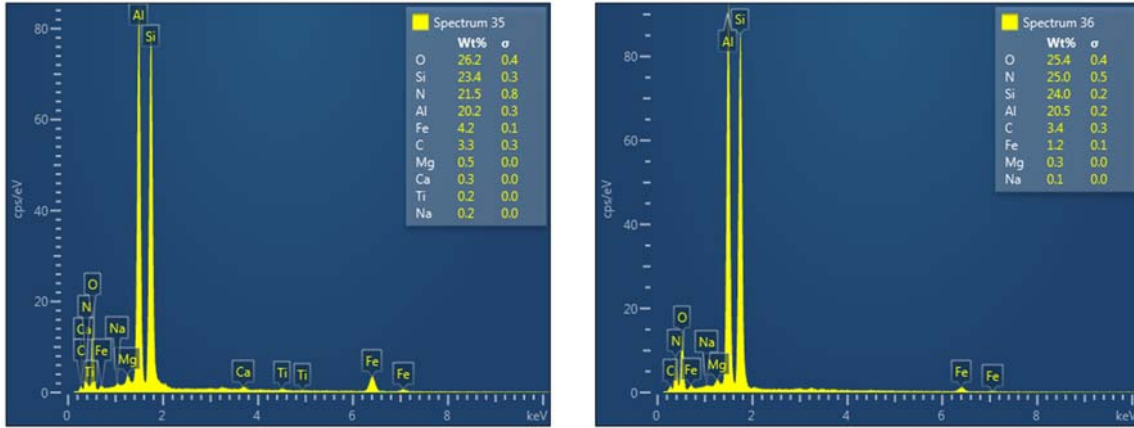
ელემენტა შედგენილობა

Result Type	Weight %					
Spectrum Label	Spectrum 30	Spectrum 25	Spectrum 26	Spectrum 27	Spectrum 28	Spectrum 29
C	12.87	28.31	21.58	33.47	12.44	15.39
N	21.89				20.99	17.91
O	23.80	17.17	13.37	12.53	18.95	22.22
Na	0.26					1.92
Mg	0.42			0.27	0.42	0.25
Al	16.29	7.11	12.93	18.46	21.49	15.66
Si	23.91	22.68	27.21	35.01	25.00	16.58
Cl		0.15				5.42
K		0.14				3.95
Ca	0.31	0.13			0.26	
Ti		0.52	0.57			
Mn		0.23	0.31			
Fe	0.26	21.91	21.99	0.26	0.46	0.69
Zr		1.66	2.04			
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr
Max	33.47	21.89	23.80	1.92	0.42	21.49	35.01	5.42	3.95	0.31	0.57	0.31	21.99	2.04
Min	12.44	17.91	12.53	0.26	0.25	7.11	16.58	0.15	0.14	0.13	0.52	0.23	0.26	1.66
Average	20.68		18.01			15.32	25.06						7.59	
Standard Deviation	8.71		4.57			4.94	6.04						11.12	

Electron Image 6





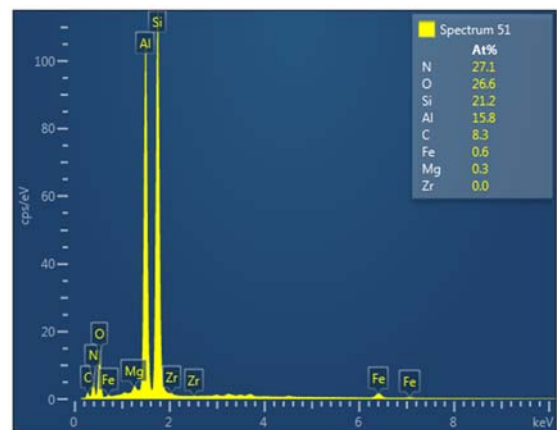
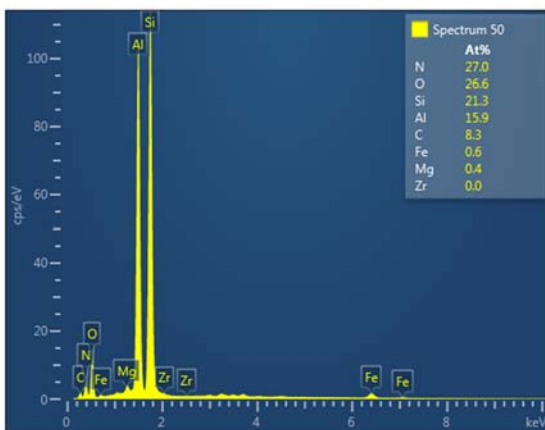
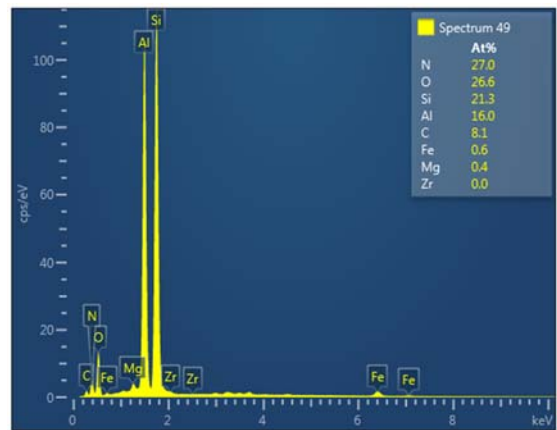
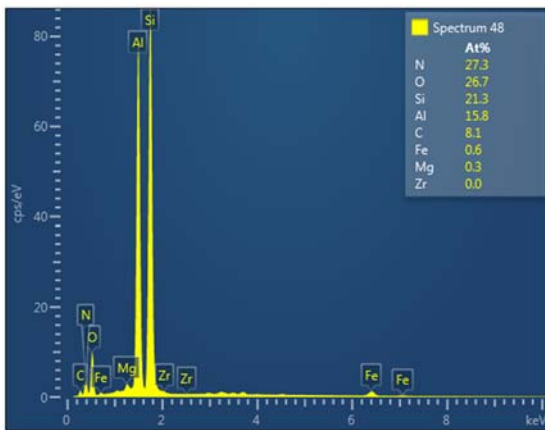
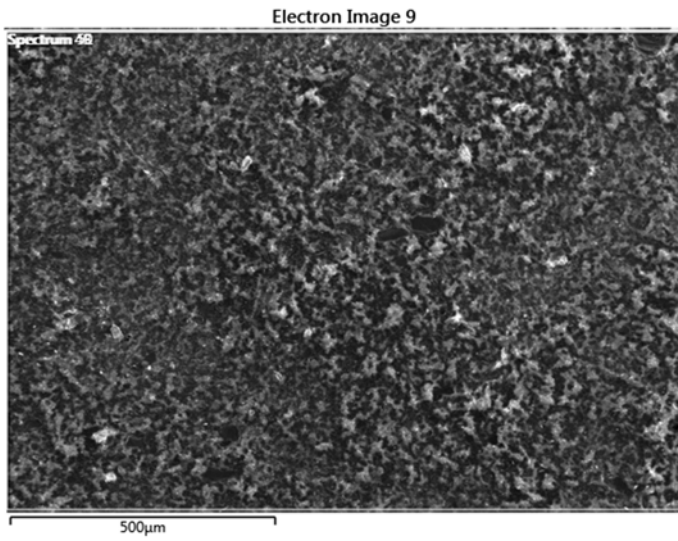
სურ. 6. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 6. ანალიზისათვის აღებულია 6 წერტილი

ცხრილი 5

ელემენტთა შედგენილობა

Result Type	Weight %					
Spectrum Label	Spectrum 36	Spectrum 31	Spectrum 32	Spectrum 33	Spectrum 34	Spectrum 35
B		15.23				
C	3.42	4.88	5.25	5.28	3.08	3.32
N	25.03	24.44	20.59	21.66	24.79	21.45
O	25.39	18.15	27.82	22.82	23.04	26.19
Na	0.09	0.14	0.34			0.20
Mg	0.35	0.35	0.43	0.36	0.44	0.54
Al	20.50	13.43	12.97	14.87	21.27	20.18
Si	23.99	17.09	31.32	34.20	24.67	23.38
Ca		0.24	0.51			0.29
Ti		0.23				0.20
Fe	1.23	5.49	0.76	0.80	2.71	4.25
Zr		0.34	0.00	0.00		
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	B	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe	Zr
Max	15.23	5.28	25.03	27.82	0.34	0.54	21.27	34.20	0.51	0.23	5.49	0.34
Min	15.23	3.08	20.59	18.15	0.09	0.35	12.97	17.09	0.24	0.20	0.76	0.00
Average		4.20	22.99	23.90		0.41	17.20	25.78			2.54	
Standard Deviation		1.04	1.97	3.40		0.07	3.84	6.12			1.98	



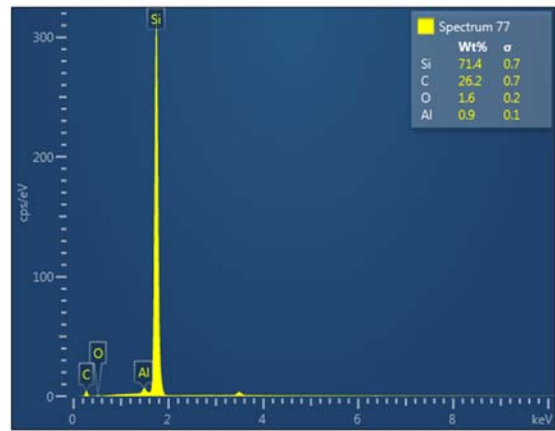
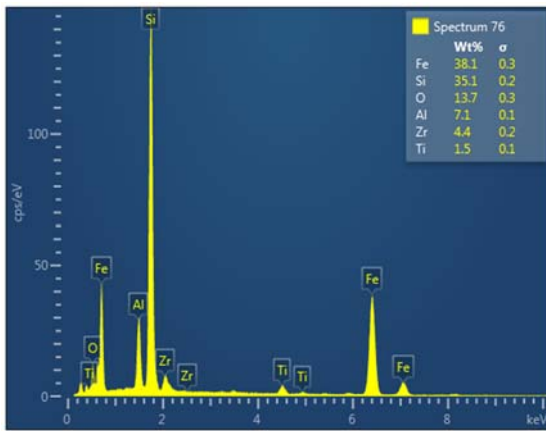
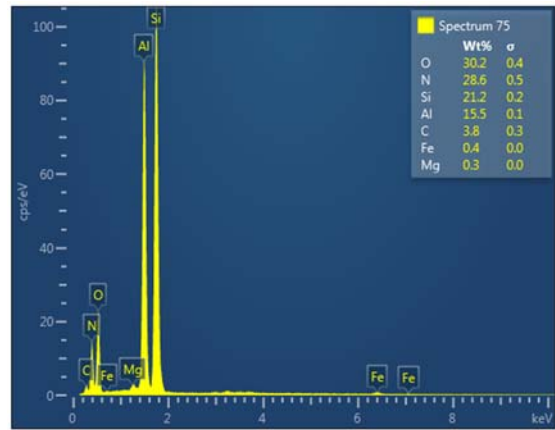
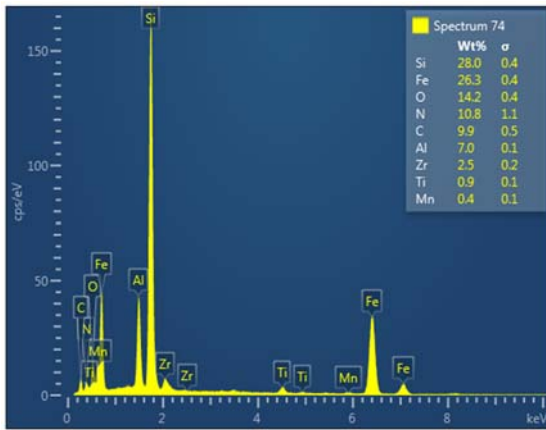
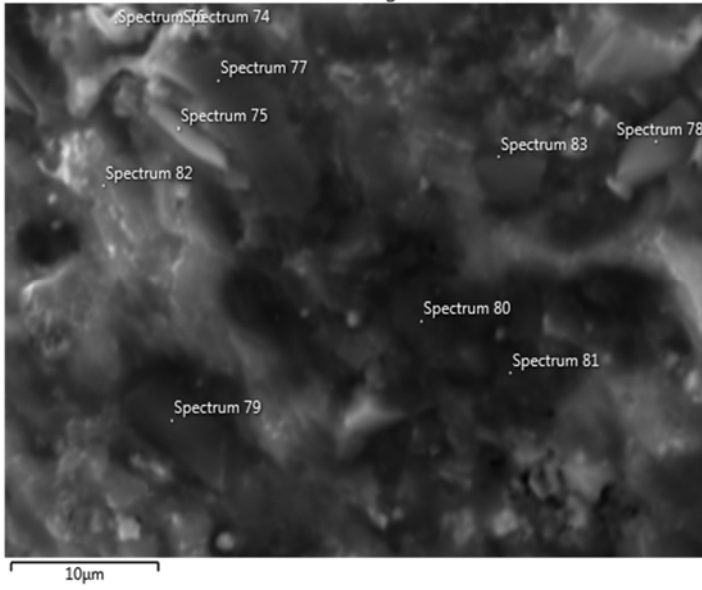
სურ.7. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 9. ანალიზისათვის აღებულია 4 წერტილი

## ელემენტთა შედგენილობა

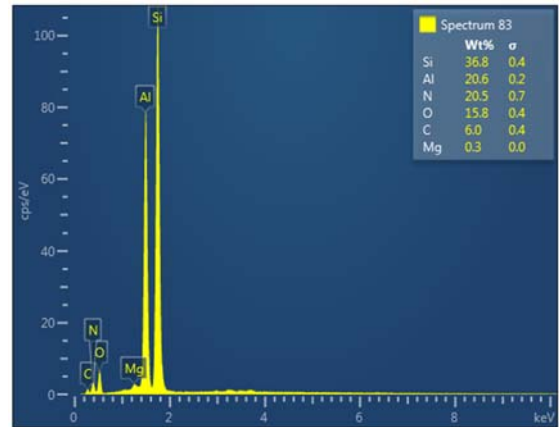
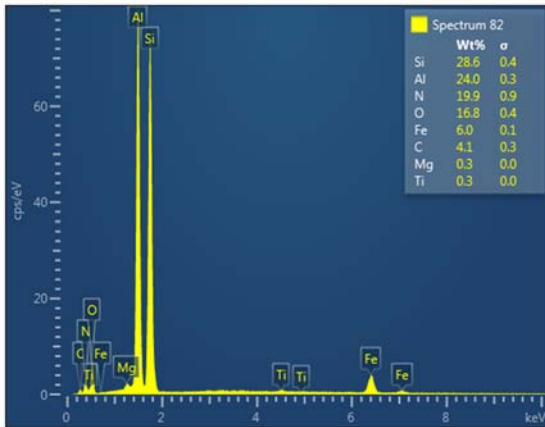
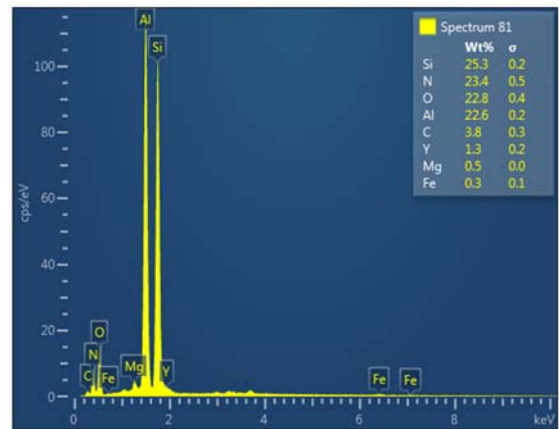
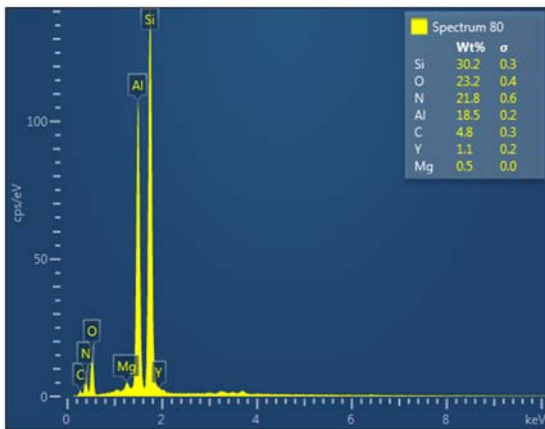
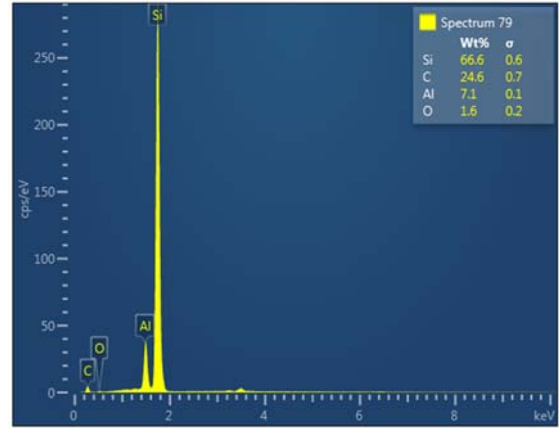
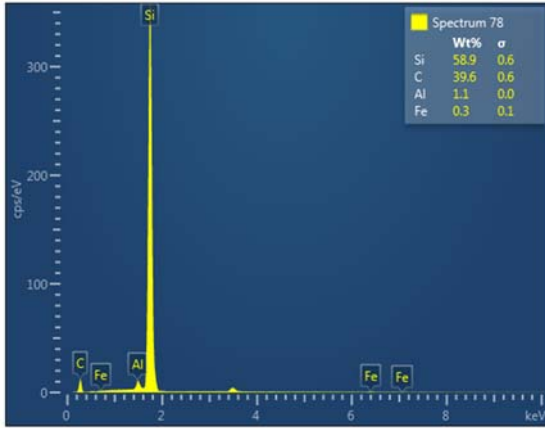
Result Type	Atomic %							
Spectrum Label	Spectrum 48		Spectrum 49		Spectrum 50		Spectrum 51	
C	8.07		8.13		8.30		8.30	
N	27.26		27.02		27.03		27.14	
O	26.69		26.64		26.55		26.63	
Mg	0.34		0.36		0.35		0.34	
Al	15.78		15.96		15.93		15.84	
Si	21.31		21.34		21.28		21.21	
Fe	0.56		0.55		0.55		0.55	
Zr	0.00		0.00		0.00		0.00	
Total	100.00		100.00		100.00		100.00	
Statistics	C	N	O	Mg	Al	Si	Fe	Zr
Max	8.30	27.26	26.69	0.36	15.96	21.34	0.56	0.00
Min	8.07	27.02	26.55	0.34	15.78	21.21	0.55	0.00
Average	8.20	27.11	26.63	0.35	15.88	21.28	0.55	0.00
Standard Deviation	0.12	0.11	0.06	0.01	0.08	0.06	0.00	0.00

EDS CH-7 1620°C

Electron Image 13







სურ. 8. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 13. ანალიზისათვის  
აღებულია 10 წერტილი

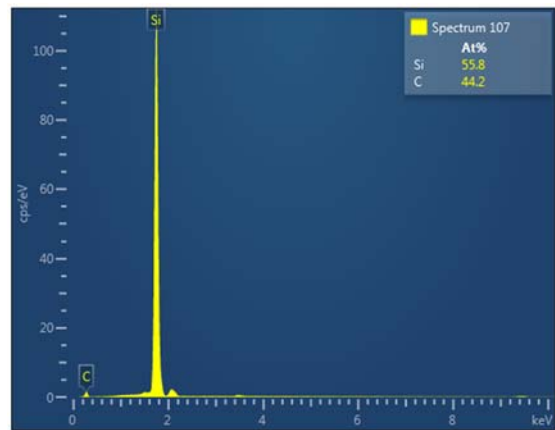
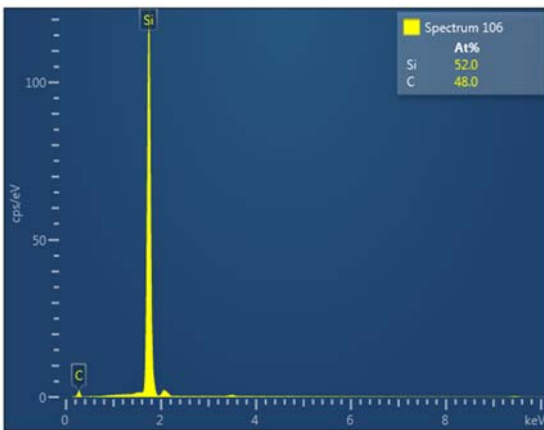
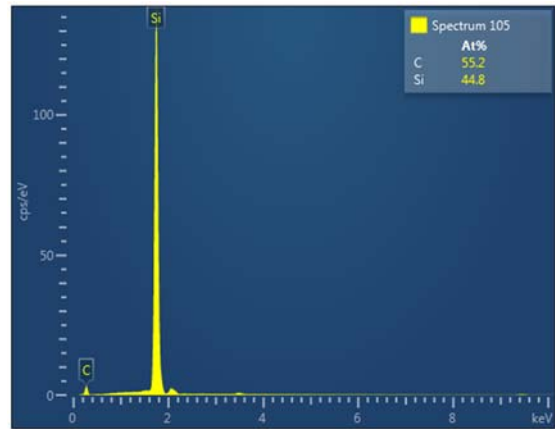
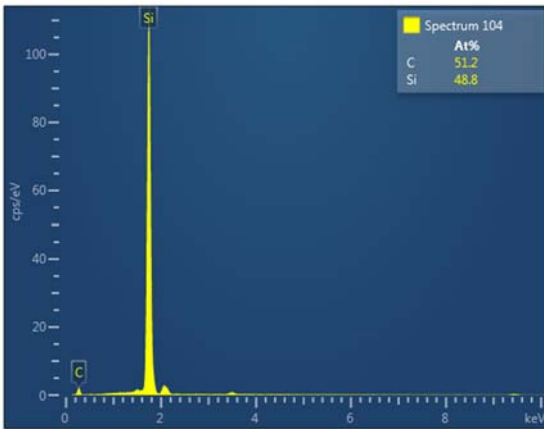
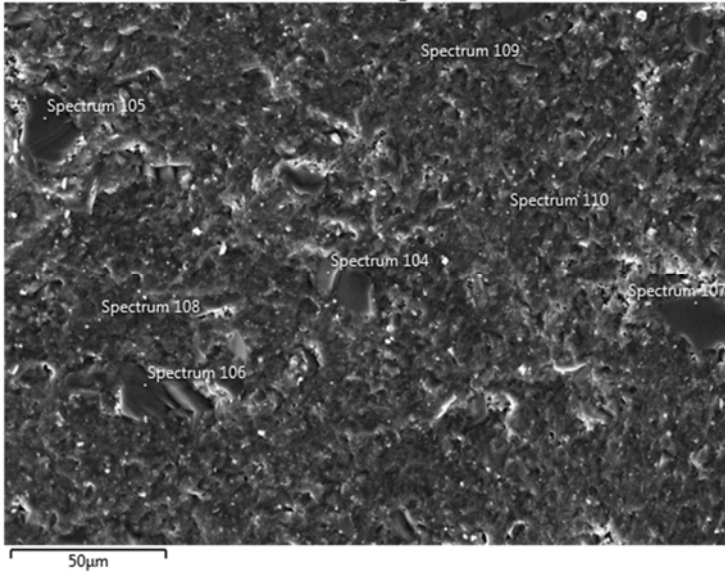
## ელემენტთა შედგენილობა

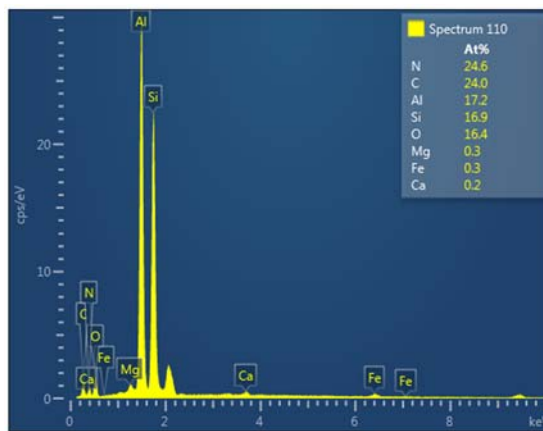
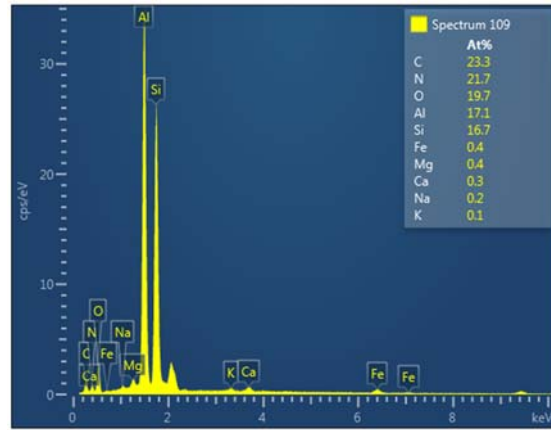
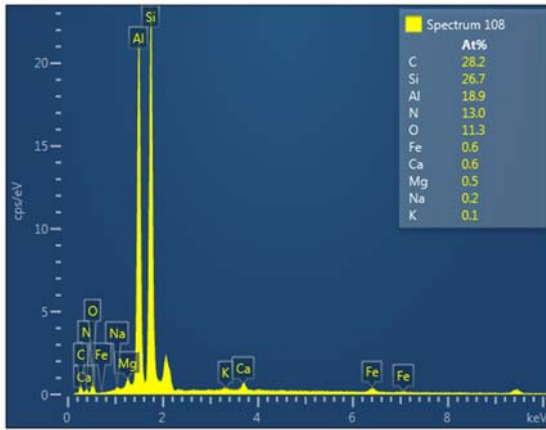
Result Type	Weight %										
Spectrum Label	Spectrum 83	Spectrum 74	Spectrum 75	Spectrum 76	Spectrum 77	Spectrum 78	Spectrum 79	Spectrum 80	Spectrum 81	Spectrum 82	
C	5.98	9.90	3.82		26.19	39.64	24.60	4.76	3.77	4.09	
N	20.48	10.75	28.59					21.79	23.44	19.87	
O	15.80	14.24	30.18	13.70	1.58		1.64	23.18	22.76	16.81	
Mg	0.32		0.28					0.51	0.54	0.34	
Al	20.59	7.01	15.53	7.09	0.86	1.15	7.13	18.53	22.56	24.00	
Si	36.83	28.03	21.17	35.15	71.37	58.92	66.63	30.15	25.31	28.60	
Ti		0.94		1.54						0.28	
Mn		0.35									
Fe		26.32	0.44	38.09		0.29			0.28	6.00	
Y								1.08	1.33		
Zr		2.45		4.43							
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	C	N	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Y	Zr
Max	39.64	28.59	30.18	0.54	24.00	71.37	1.54	0.35	38.09	1.33	4.43
Min	3.77	10.75	1.58	0.28	0.86	21.17	0.28	0.35	0.28	1.08	2.45
Average					12.44	40.21					
Standard Deviation					8.80	18.33					

EDS CH-7 1620°C

Electron Image 17





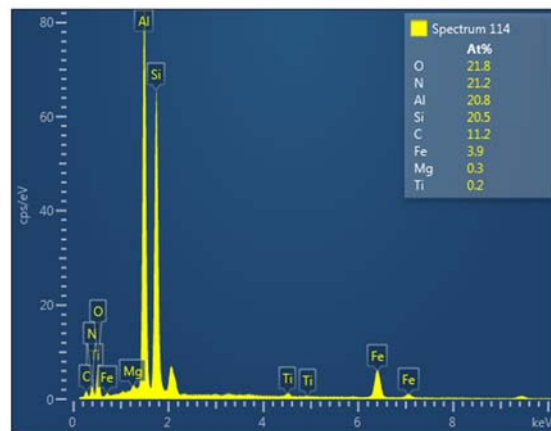
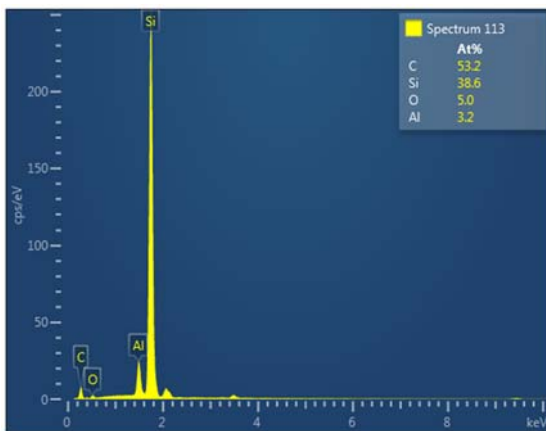
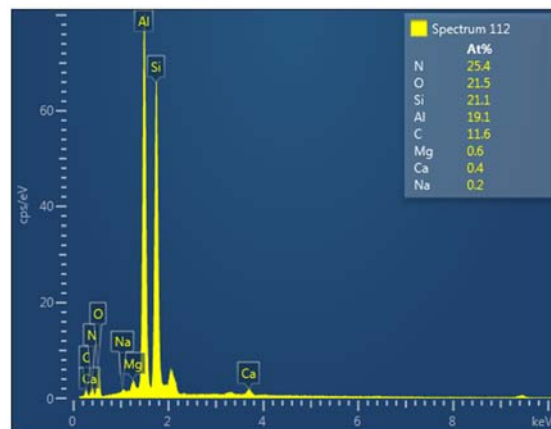
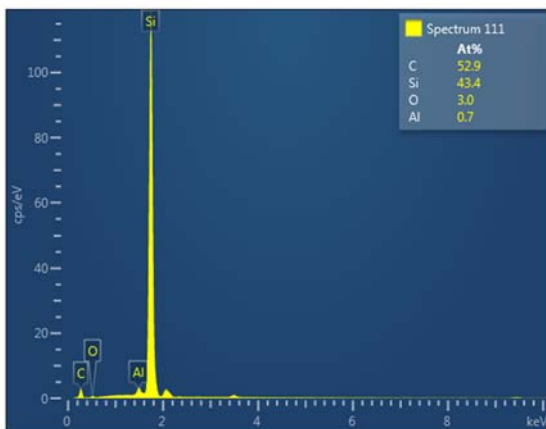
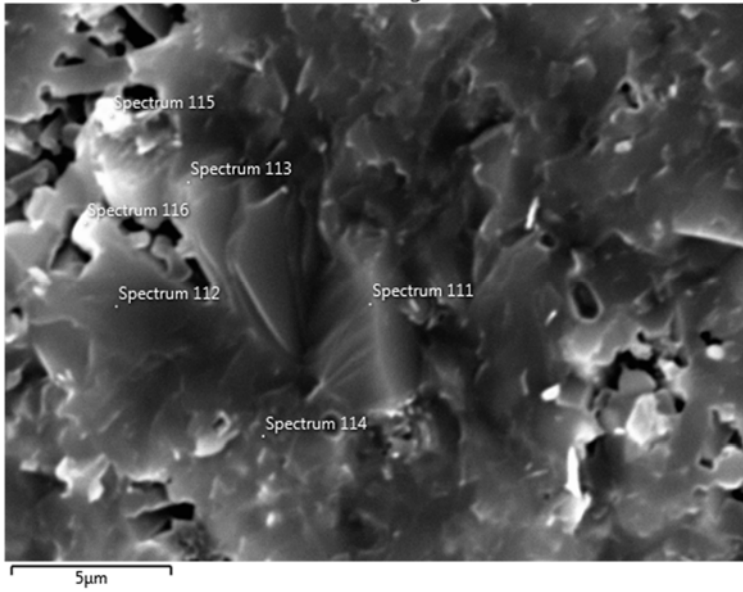
სურ. 9. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
 ელექტრონული იმიჯი 17. ანალიზისათვის  
 აღებულია 7 წერტილი

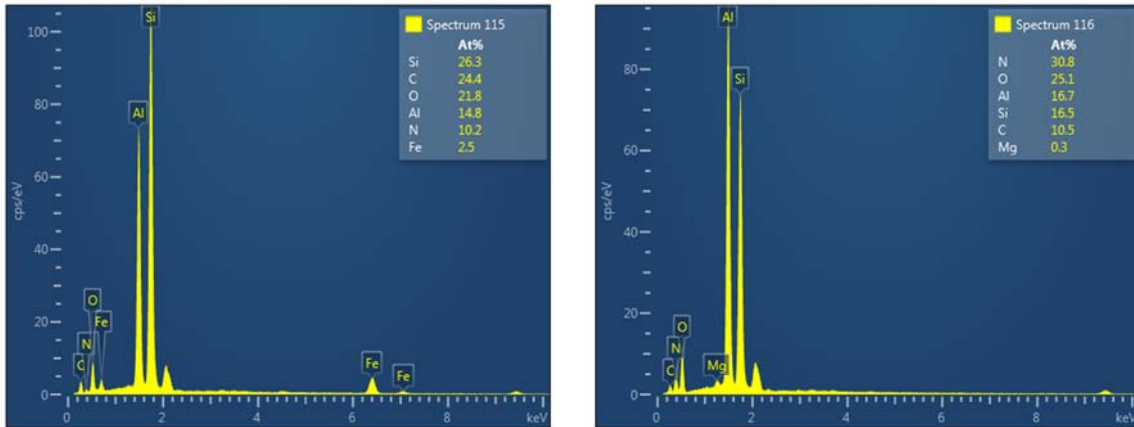
## ელემენტთა შედგენილობა

Result Type	Atomic %						
Spectrum Label	Spectrum 110	Spectrum 104	Spectrum 105	Spectrum 106	Spectrum 107	Spectrum 108	Spectrum 109
C	23.99	51.17	55.21	48.04	44.16	28.17	23.34
N	24.58					12.97	21.72
O	16.44					11.28	19.72
Na						0.21	0.22
Mg	0.35					0.51	0.39
Al	17.17					18.86	17.09
Si	16.90	48.83	44.79	51.96	55.84	26.66	16.71
K						0.14	0.13
Ca	0.23					0.59	0.25
Fe	0.33					0.60	0.43
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Max	55.21	24.58	19.72	0.22	0.51	18.86	55.84	0.14	0.59	0.60
Min	23.34	12.97	11.28	0.21	0.35	17.09	16.71	0.13	0.23	0.33
Average	39.15						37.38			
Standard Deviation	13.58						16.84			

Electron Image 18





სურ.10. CH-7 ნიმუშის რენტგენოსპექტრული სურათები.  
ელექტრონული იმიჯი 18. ანალიზისათვის  
აღებულია 6 წერტილი

ცხრილი 9

ელემენტთა შედგენილობა

Result Type	Atomic %					
Spectrum Label	Spectrum 116	Spectrum 111	Spectrum 112	Spectrum 113	Spectrum 114	Spectrum 115
C	10.55	52.90	11.58	53.22	11.22	24.45
N	30.82		25.41		21.21	10.17
O	25.10	2.98	21.54	4.97	21.81	21.76
Na			0.24			
Mg	0.32		0.57		0.30	
Al	16.68	0.71	19.15	3.22	20.80	14.82
Si	16.53	43.41	21.07	38.59	20.52	26.34
Ca			0.43			
Ti					0.24	
Fe					3.90	2.47
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Statistics	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe
Max	53.22	30.82	25.10	0.24	0.57	20.80	43.41	0.43	0.24	3.90
Min	10.55	10.17	2.98	0.24	0.30	0.71	16.53	0.43	0.24	2.47
Average	27.32		16.36			12.56	27.74			
Standard Deviation	20.60		9.70			8.50	10.84			

**დაშლის დაძაბულობის  
ენერგიის ფორმულა**

კერამიკული მასალებისა და კომპოზიტების თვისებებზე მსჯელობისას, დაშლის დაძაბულობის საკითხების ინტეგრირება მეტად რთული ამოცანაა მასალაში მიმდინარე რთული პროცესების დამთხვევისა და თანხედრის გამო. ამიტომ, საჭიროდ ჩავთვალეთ წარმოგვედგინა დაშლის დაძაბულობის ისეთი მახასიათებელი, რომელიც თავის თავში მოიცავდა ყველა იმ პირობას და თვისებას, რომელიც შეიძლება წარმოიშვას ნაკეთობის კრიტიკული დატვირთვის პროცესში, როდესაც დაშლა გარდაუვალია. ეს შეიძლება მოხდეს ნაკეთობის შიგნით ენერგიის დაგროვების შემთხვევაში, როგორც თერმოსტრუქტურული ცვლილებების, ისე გარე მექანიკური ძაბვების განვითარების გამო. ჩვენ მიერ წარმოდგენილი ზ. კოვზირიძის [11-13] დაშლის დაძაბულობის ენერგიის ფორმულა შემდეგია:

$$E_{td} = m \cdot a_{c.p.} \quad 1$$

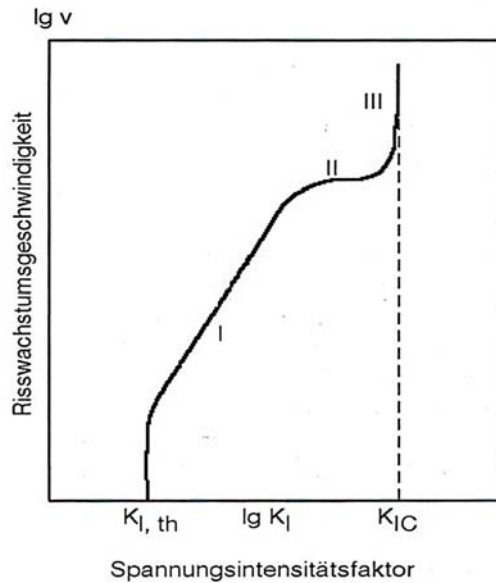
სადაც  $E_{td}$ -energy of tension of decomposition – დაშლის დაძაბულობის ენერგია, კჯ;  $m$ -mass - მასა, გ.;  $a_{c.p.}$ -speed of crack propagation – ბზარის გავრცელების სიჩქარე- 2000 მ/წმ.

SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> მასალისაგან დამზადებულ იქნა ღეროს ფორმის საცდელი ნიმუში, ზომებით:  $l=110$  მმ; სიგანე –  $b=20$  მმ; სიმაღლე –  $a=10$  მმ. 1620°C-ზე გამომწვარი ასეთი ღეროს მასა 49.3 გ შეადგენდა. ნაკეთობა სრულად კონსოლიდირებულია თითქმის ნულოვანი ღია ფორიანობით. თუ მივიღებთ, რომ დაშლის პროცესში ბზარის განვითარების სიჩქარე დაძაბულობის ინტენსიურობის ფაქტორზე (კრიტიკული მდგომარეობა) დამოკიდებულებით  $v-k$  მრუდზე იმყოფება მესამე უბანზე (სურ. 11 ), სადაც იზრდება წვეროდან მოწყვეტის გზით და სიჩქარე დაახლოებით 2000 მ/წმ-ს შეადგენს [7], დაშლის დაძაბულობის ენერგიის ხარჯი ჩვენი ფორმულის მიხედვით იქნება:

$$E_{td} = 49.3 \times 2000 = 98.6 \text{ კჯ.}$$

ამდენად, თუ დავადგენთ უნივერსალურ კავშირს ნაკეთობის მთლიან ენერგიასა და მის მასას

შორის, მივიღებთ ჩვენ მიერ შემოთავაზებულ დაშლის დაძაბულობის ენერგიის ფორმულას.



**სურ.11. ბზარის გავრცელების სიჩქარის ტიპური გრაფიკი, დამოკიდებული დაძაბულობის ინტენსიურობის ფაქტორზე, როდესაც ვითარდება ბზარის ზრდის წინაკრიტიკული მდგომარეობა (v-K-მრუდი). ჰორიზონტალზე – დაძაბულობის ინტენსიურობის ფაქტორი. ვერტიკალზე – ბზარის ზრდის სიჩქარე**

**მასალის წარმოქმნის პროცესი და მისი მათემატიკური გამოთვლა**

მასალების სინთეზის პროცესების შესწავლისას შევეცადეთ თეორიულად განგვეზოგადებინა ის შესაძლებელი პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობს მნიშვნელოვანი ოდენობის მინისებრი ფაზის შემცველობის მქონე პერლიტში [14-18], რასაც მასალათა კონსოლიდაციის პროცესებზე დიდი გავლენა აქვს ნარევიში მისი გამოყენების დროს. ამისათვის ჩავატარეთ კონსოლიდაციის პროცესის მათემატიკური გამოთვლა და შევეცადეთ წარმოგვედგინა ადრეულ ტემპერატურულ სტადიაზე სიალონის წარმოქმნის ფიზიკური არსი და მინისებრი პერლიტის როლი ამ რთულ ფიზიკურ-ქიმიურ პროცესებში. როგორც ცნობილია, პერლიტი ვულკანური წარმოშობის მთის ქანია 96მას.%



მინისებრი მასით, მასში არის კრისტალიტები 2–4 მას.% და აირები: CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, Ar, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, წყალი – 2–5%. წყლის წილად მოდის აქროლადების 80–85%, რომელიც მთავარი ამაფუებელი აგენტია [19]. როგორც ცნობილია, ვულკანურ მინებში წყალი არა მარტო აირადი ფაზის წყაროა, არამედ მინერალიზატორიც. იგი ხელს უწყობს თერმული დამუშავების პროცესში წარმოქმნილი ნალღობის ძრაობის ზრდას [20]. თვალსაჩინოებისათვის მე-3 სურათზე წარმოდგენილია გეოპოლიმერისა და პერლიტის ვარიაციული შემცველობა: მას.% გეოპოლიმერი – 50; პერლიტი – 50; პერლიტის ლღობის ტემპერატურა – 1240°C, გეოპოლიმერის – 1740°C. ორივე მდგენელი CH-7 ძირითად შედგენილობაშია: პერლიტი – 3, ხოლო გეოპოლიმერი – 18.5 მას.% შემცველობით. პერლიტის ქიმიური შედგენილობა: მას.% SiO<sub>2</sub> – 73.70; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14.06; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.84; CaO – 0.70; MgO – 0.45; R<sub>2</sub>O – 6.55; SO<sub>3</sub> – 0.20; ხ.დ. – 3.60. თუ შევაჯერებთ ჩაჯდომის კინეტიკის აღწერას მოცემულ ექსპერიმენტულ მონაცემებთან, შეგვიძლია განვიხილოთ შემთხვევა, როცა თხიადი ფაზა ვლინდება ადვილად ლღობადი კომპონენტის გაღობით იმ ვარაუდით, რომ ძნელღობადი კომპონენტი ნაწილობრივ ხსნადია ნალღობში. თხიადი ფაზის წარმოქმნისათვის ენერგეტიკულად მიზანშეწონილია ორი ნაწილაკის განცალკევება თხიადი ფაზით, როცა ეს ნაწილაკები იმყოფება უშუალო კონტაქტში. პროცესი ითხოვს პირობას:

$$2\alpha_{\text{მყ.თხ.}} \cdot x \cos f < \alpha_2 \quad 2$$

პირობა სრულდება კუთხის ნებისმიერი მნიშვნელობისას:  $f = f_0 + 2\theta$ , თუ  $\alpha_{\text{მყ.თხ.}} < \alpha_2 / 2$ , სადაც  $\alpha_{\text{მყ.თხ.}}$  ზედაპირული ენერგიაა მყარი და თხევადი ფაზების საზღვარზე,  $\alpha_2$  – ზედაპირული ენერგია ორი მარცვლის საზღვარზე,  $f_0$  – კუთხე მხებებს შორის ორი მარცვლის ზედაპირების შეხების ადგილას,  $\theta$  – დასველების კუთხე [21].

თერმული დამუშავების პროცესში პერლიტის ლღობის შედეგად მიღებული თხიადი ფაზა შეავსებს სიცარიელეს კომპოზიციის ნარევიში SiC-სა და Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის მყარ მარცვლებს შორის. მათ შორის თხიადი მანქეტის არსებობა გარკვეულ პირობებში განაპი-

რობებს ძალების წარმოქმნას, რის შედეგადაც მარცვლები მიიზიდება ერთმანეთისკენ, რაც განაპირობებს მასალის გამკვრივებას და ამდენად გავლენას ახდენს შეცხოების კინეტიკაზე. გადაადგილებას თან სდევს თხიადი ფაზის თავისუფალი ზედაპირის შემცირება, რაც წნევის ზეგავლენით მიმდინარეობს, რომელიც განპირობებულია ზედაპირის სიმრუდით. როგორც ჩანს, საქმე გვაქვს მოცულობითი დიფუზიის მექანიზმთან, როცა ჭარბი ვაკანსიების ჩასადინარი, რომლებიც წარმოიქმნება ჩაზნექილი ყელის ზედაპირის მახლობლად, არის მარცვლების ამოზნექილი ზედაპირი. ამ შემთხვევაში კონტაქტის ფართობის ზრდას თან უნდა სდევდეს მარცვლების ცენტრების დაახლოება. როგორც ცნობილია, მოცულობითი დიფუზიები ხასიათდება დიდი აქტივაციის ენერგიით, რომლებიც განაპირობებს მოცულობით დიფუზიას, უპირატესად „ტამანის ტემპერატურებთან“ მიახლოებისას (0.52 T<sub>m</sub>, სადაც T<sub>m</sub> ლღობის ტემპერატურაა °C-ში). ტამანის ტემპერატურა შეესაბამება ატომების ან იონების ძრაობის დასაწყისს მესერში და ამიტომ მეტად მნიშვნელოვანი სიდიდეა სხეულების ურთიერთქმედების განხილვისას.

ნარევიში გამოყენებული ტამანის ტემპერატურული უბანი გეოპოლიმერის მთავარი მინერალის – კალინიტისათვის ემთხვევა პირველი ეგზოპიკის ტემპერატურას (925–940°C), როცა მიმდინარეობს მისი სტრუქტურული პაკეტის ძლიერი დესტრუქცია. კალინიტის (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) ქიმიისათვის, როგორც ცნობილია, არსებითი მნიშვნელობა შეიძლება ჰქონდეს კავშირების განაწილებას ტეტრაედრებსა [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> და ოქტაედრებში [AlO<sub>6</sub>]<sup>6-</sup>. კონფიგურაცია sp<sup>3</sup> სტაბილურობას ანიჭებს ელექტრონულ კონფიგურაციას სილიციუმის ატომთან სილიკატებში [22]. ამასთან, ამ კავშირების გამოვლენა ტეტრაედრებსა და ოქტაედრებში არაერთგვაროვანია, კერძოდ, p კავშირები ბევრად ძლიერია, ვიდრე s კავშირები და, შესაბამისად, განაპირობებს შედარებით ხანგრძლივ მორფოლოგიურ შესაბამისობას სილიკატის კრისტალის სტრუქტურასა და თხიად ფაზას შორის. ასეთ დაბალ ტემპერატურებზე ნარევის მაღალტემპერატურული კომპონენტები,

როგორცაა SiC და Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, დიფუზურ პროცესებში ინტენსიურად ვერ მონაწილეობს.

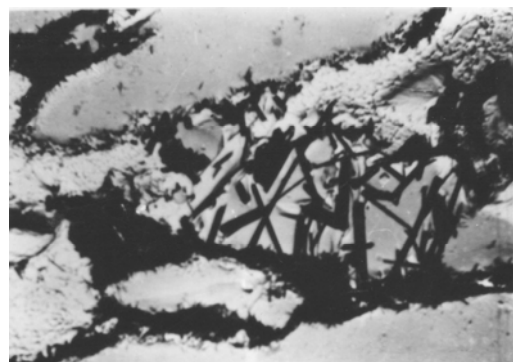
კავშირების გაწყვეტას, მასალის სტრუქტურის გაფაშრებას და დიფუზური პროცესების შედარებით ინტენსიურად მიმდინარეობას ხელს უწყობს ამ ტემპერატურულ ინტერვალში აირადი ნივთიერებების (2-4 მას.%) გამოყოფა პერლიტიდან [23]. შედეგად p კავშირები ტეტრაედრებსა და ოქტაედრებში ირღვევა, სტრუქტურული თანამიმდევრობა Si-O-Al იშლება, მიმდინარეობს Al და Si იონების გამოთავისუფლება და წინაპირობის შექმნა მათი დიფუზიისათვის ხსნარში. სიბლანტე, სტრუქტურის დაშლის გამო, მნიშვნელოვნად მცირდება. მიმდინარეობს ნედლეულის ნარევი მინერალების დაშლის პროცესი, რაც დაკავშირებულია წყლის ორთქლის და სხვა აირადი პროდუქტების გამოყოფასთან. ამავე სტადიაზე მიმდინარეობს გეოპოლიმერის მთავარი მინერალის კაოლინიტის შიგა მოლეკულური გარდაქმნები, წყალბადური კავშირების H<sub>2</sub>O და OH- დაშლა და პერლიტიდან წყლის გამოყოფის პროცესი გარკვეულწილად აფერხებს Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> და SiO<sub>2</sub> ნაწილაკებიდან კრისტალური ჩანასახების წარმოქმნას. პროცესი გადაადგილდება მარჯვნივ. ამ ტემპერატურული ინტერვალის შემდეგ ინტენსიურად მიმდინარეობს ურთიერთქმედება გეოპოლიმერის ნივთიერებასა და პერლიტს შორის, რასაც მნიშვნელოვნად უნდა უწყობდეს ხელს პერლიტის ენდოთერმული პიკის გადაადგილებას მარჯვნივ – 1000-

1050°C-კენ (სურ. 12). არის რა შიხტის ადვილად დნობადი შემადგენელი, ის აჩქარებს თხიადი ფაზის წარმოქმნას და პერლიტთან, ჭარბ ამორფულ სილიციუმის ორჟანგსა და კაოლინიტური გეოპოლიმერის დაშლის პროდუქტებთან წარმოქმნის კაჟმიწა-პერლიტის მინას, რომლის შემცველობა ჩვენი გათვლებით მზა პროდუქტში 7.4 მას.%-ია [23]. პერლიტსა და მინის თხიად ფაზაში მიმდინარეობს ორი ძირითადი ძნელად ლღობადი SiO<sub>2</sub>-სა და Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის ოქსიდების ენერგიული ურთიერთქმედება. შედეგად წარმოიქმნება ნაერთი, რომელიც გამოკრისტალდება ხსნარიდან ახალი კრისტალისებრი წარმონაქმნების – მულიტის (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) სახით, რომელმაც თითქოს ამ ნარევი ხელი უნდა შეუწყოს მასალის ჩონჩხის შექმნას, მაგრამ მოვლენები ფიზიკურ-ქიმიური გარდაქმნების შედეგად სხვაგვარად ვითარდება, რასაც ხელს უწყობს სიალონის 1250–1300°C-ზე წარმოქმნა.

შოლოდ ამ ტემპერატურების შემდეგ, როდესაც SiO<sub>2</sub>-სა და Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის თავისუფალი ნაწილაკები, მათ შორის ქიმიური ბმის არ არსებობის გამო, უშუალოდ კაოლინიტის დაშლის შემდეგ, იმყოფება შედარებით მაღალ, ქიმიურად აქტიურ მდგომარეობაში და მულიტის წარმოქმნის ქიმიური რეაქცია მიმდინარეობს მეტი სიჩქარით, ხელს უწყობს კრისტალების ჩასახვას (სურ. 12).



ა

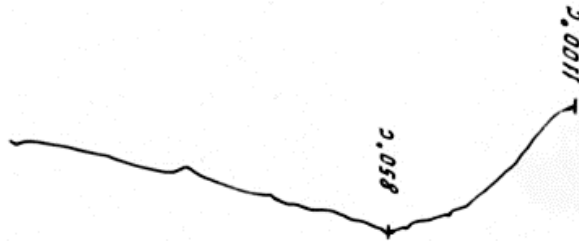


ბ

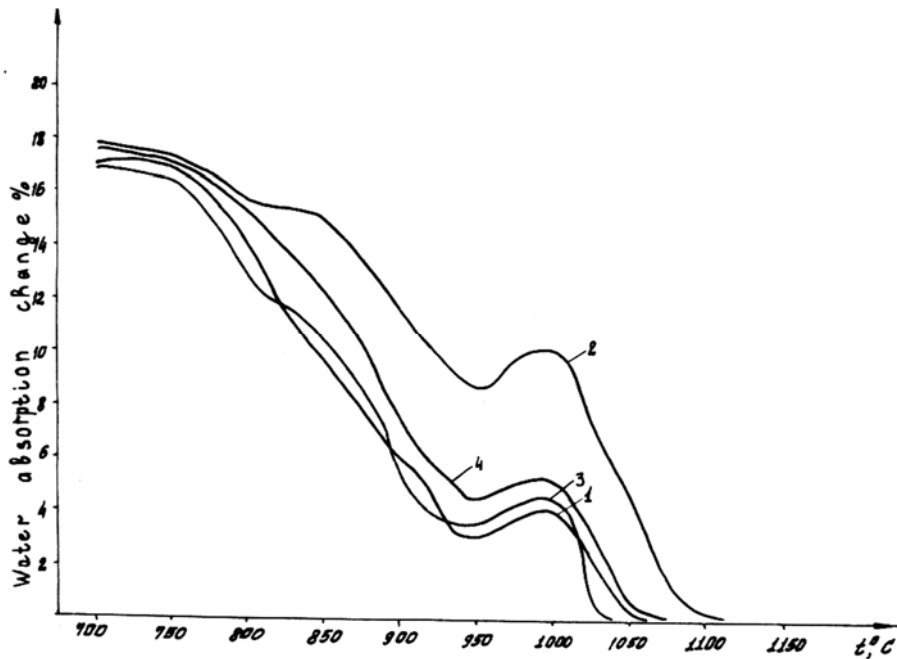
სურ. 12. ფრაგმენტი კერამიკული მასალის – თიხა-პერლიტი მას.% 50:50, ელექტრონულ-მიკროსკოპული სურათები, გამომწვარი 1050°C. ა – მულიტის მსხვილი ნემსისებრი კრისტალების ზადე; ბ – მინისებრი ფაზა დაარმატურებულია მულიტის წვრილი ნემსისებრი კრისტალებით, X 5400

წარმოქმნილი თხიადი ფაზა ამუხრუჭებს აქროლადი კომპონენტების გამოყოფას პერლიტიდან, ნაწილაკებს შორის თხიადი ფენის მიერ მათი მიტაცების გამო. ტემპერატურის მატებით დახურულ ფორებში წნევა იზრდება. ისინი იწყებენ გაფართოებას და მასალიდან გამოყოფას. პერლიტის დეგაზაციის პროცესი იწვევს 860°C-დან მარჯვნივ, ემთხვევა კაოლინიტის პირველ ეგზოპიკს და, პროცესების დამთხვევის გამო, ვითარდება კიდევ უფრო მაღალ, 1000-1050°C ტემპერატურებზე. პროცესი იცვლება ჩაჯდომიდან „ზრდამდე“, რაც ჩანს ნიმუშებზე (სურ 13-14). მოვლენა მნიშ-

ვნელოვნად ეწინააღმდეგება ჩაჯდომის კანონზომიერებას, მაგრამ ვთვლით, რომ პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობს მოცემულ ტემპერატურულ ინტერვალში, განმსაზღვრელად ზემოქმედებს კერამიკული მასალის შეცხოებაზე, რამეთუ წყალი, როგორც აირწარმოქმნილი და მალღობელი, გამოიყოფა რა თერმული დამუშავების პროცესში, ავლენს მინერალიზატორულ ზემოქმედებას. ის აფაშრებს კერამიკული მასალის სტრუქტურას, მთლიანობაში ასუსტებს კრისტალური კარკასის სიმტკიცეს, რის შედეგადაც მცირდება სილიკატური ნაღობის სიბლანტე, რაც ხელს უწყობს დიფუზური პროცესების სრულ და ინტენსიურ მიმდინარეობას [21, 23].



სურ. 13. პერლიტის თერმოგრამა



სურ. 14. კერამიკული მასალების წყალშთანთქმის ცვლილებები ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით. 1-4 შედგენილობის ვარიაციული ცვლილება მას.% : ცეცხლგამძლე თიხა – 50-35, პერლიტი – 50-65

მე-12 სურ-დან ჩანს, რომ უკვე 1050–1100°C ტემპერატურაზე შესაძლებელია მულიტის კრისტალების ჩამოყალიბება, მაგრამ CN 7კომპოზიციაში რთული ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების მიმდინარეობისა და რიგი პროცესების დამთხვევის გამო, მულიტის კრისტალები ჯერ კიდევ არ შეიძლება იყოს სრულყოფილად ფორმირებული, ვინაიდან Si-O-Al კავშირები ჯერ ვერ იქნება ძლიერი. ამ ტემპერატურულ უბანში პერლიტიდან წყლისა და აირების ამოსვლა (სურ. 14), რაც სტრუქტურას აფაშრებს, ხელს უშლის მულიტის კრისტალების სტრუქტურულ ფორმირებას. იწყება სილიციუმის ნიტრიდის წარმოქმნა უკვე 1250°C ტემპერატურაზე და იგი მოიხმარს მულიტის ოქსიდებს. ნალღობის სიბლანტე მცირდება დაახლოებით 10<sup>7</sup>–10<sup>9</sup> პუაზამდე [24–34], ძლიერდება ზედაპირული ძალების მოქმედება ფაზების საზღვრებზე. კრისტალური მარცვლები უახლოვდება ერთმანეთს, მასა მკვრივდება და წყალშთანთქმა, ფორიანობის მიხედვით, მცირდება. მასალა იძენს მაღალ საექსპლუატაციო თვისებებს, რაც დასტურდება კვლევით [23].

შეცხოვის კინეტიკის განხილვისას მნიშვნელოვანია, როცა მარცვლებს შორის თხიად ფენაში ნაწილობრივ ან მთლიანად ხსნადია მყარი ნაწილაკები. ეს მოვლენა დასტურდება სტრუქტურული კვლევებით, სადაც დაიშორება კვარცისა და პერლიტის შელღობილი მარცვლები. ამ უკანასკნელის მცირე ნაწილაკები მთლიანად გალღობილია და შელღობილია ძირითად მასასთან. საქმე გვაქვს მყარი თხიად ფაზური შეცხოვის რამდენიმე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესის ერთდროულად მიმდინარეობასთან. ამ შემთხვევაში მარცვლებს შორის ურთიერთქმედების ძალა განპირობებულია:

1. სითხის ზედაპირის სიმრუდის არსებობით
 
$$F_1 = a_e(1/r_1 - 1/r)S; \quad 9$$

2. თხიადი მდგენელის თავისუფალი ზედაპირის მისწრაფებით შემცირებისაკენ და არ არის დამოკიდებული მის სიმრუდეზე:

$$F_2 = La_e \Psi(V, \theta), \quad 10$$

სადაც L დასველების პერიმეტრის სიგრძეა,  $\Psi(V, \theta)$  – ფუნქცია, რომელიც დამოკიდებულია დასველების

სასაზღვრო კუთხეზე  $\theta$ , მარცვლებით შემოზღუდული სითხის მოცულობაზე, V – დამარცვლების გეომეტრიაზე. სფერული მარცვლებისათვის რადიუსი R იქნება:

$$S = \pi R^2 \sin 2f; \quad 3$$

$$\Psi(V, \theta) = \sin x \sin(f + \theta); \quad 4$$

$$F = F_1 + F_2 = a_e [\pi R^2 \sin^2 f (\frac{1}{r_1} + 1/r) + 2\pi r \sin f x \sin(f + \theta)], \quad 5$$

სადაც

$$r_1 = R \sin f - [R(1 - \cos f)\lambda/2] [1 - \sin(\theta + f)]; \quad 6$$

$$R = 2R(1 - \cos f) + \lambda/2 \cos(f + \theta), \quad 7$$

სადაც  $\lambda$  ღრეზა მარცვლებს შორის.

ფორმულა მართებულია იმ შემთხვევაში, როცა სითხის მენისკის ფორმაზე სიმძიმის ძალის მიერ დამახინჯება შეიძლება უგულვებელყოთ.

ოპტიმალური ტემპერატურების ზევით დასველების კუთხე აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას:

$$\theta = \pi - f/2. \quad 8$$

ძალა, რომელიც მიიზიდავს მარცვლებს, განუღებება და, დიდი რაოდენობით თხიადი ფაზის არსებობის შემთხვევაში, გამოვლინდება ძალა, რომელიც განიზიდავს მარცვლებს. ამასთან დაკავშირებით, წარმოიქმნება მასალის დეფორმაციის და მისი ტექნიკური თვისებების გაუარესების წინაპირობა, რაც დაიშორებოდა ლაბორატორიულ, ცხელი წნეხის პირობებში ნაკეთობების გამოწვისას 1620°C ტემპერატურაზე მაღლა, როდესაც ხდებოდა ალუმინის ჟანგის ნაკეთობიდან გამოყოფა.

ზემოთ მოყვანილი მოსაზრებებიდან გამომდინარე, წარმოვადგინეთ მასალათა კონსოლიდაციის პროცესის მათემატიკური გამოთვლა იმ შემთხვევისათვის, როდესაც მინდინარეობს მყარი თხიად ფაზური შეცხოვა თხიადი ფაზის 7.4მას.% თანაობისას. ზემოთქმულიდან გამომდინარე და იმის გათვალისწინებით, რომ 1050°C-ის ზემოთ ასეთი შედგენილობის მასალებში იწყება შეცხოვის პროცესები, გარკვეული რაოდენობით თხიადი ფაზის წარმოქმნის გამო, რეკომენდაციას ვიძლევიტ ცხელი წნეხის დროს მასალათა გამოწვა შევწყვიტოთ შეცხოვის ადრეულ ეტაპზე ანუ 1620°C-ზე და არ დაველოდოთ ღია ფორიანობის ნულამდე დაყვანას,

მით უმეტეს 0.18% მასალა ფლობს მაღალ საექსპლუატაციო თვისებებს. ამას ემატება ისიც, რომ უჟანგბადო და ჟანგბადიანი ნაერთები კომპოზიციაში რთულად თავსებადია. პერლიტის ღლიობის დიდი ინტერვალის, ასევე მისი ნაღლიობის მაღალი სიბლანტის გამო, კერამიკული ნაკეთობა გამოწვის სტადიაზე არ დეფორმირდება. შედეგად, უკვე 1250–1300°C ტემპერატურებზე, სიალონის წარმოქმნა უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს გეოპოლიმერ-პერლიტის კომპოზიციაში 1000–1050°C-ზე განვითარებული პროცესების ხელშეწყობით. სიალონის წარმოქმნა იმდენად ძლიერი ფიზიკურ-ქიმიური პროცესია, რასაც ხელს უწყობს ამ ტემპერატურულ ინტერვალში აზოტირების შედარებით მაღალი წნევა და მეტალოთერმია, რომ წარმოქმნილი სიალონი მოიხმარს გეოპოლიმერის შიგა მოლეკულური გარდაქმნების შედეგად წარმოქმნილ მულიტის ოქსიდებს და მაღალ ტემპერატურებზე სინთეზისას –1620°C-ზე ფაზურ შედგენილობაში მულიტი აღარ გვხვდება. სიალონი ხდება დომინანტი ფაზა სტრუქტურაში 57 მას.%-ით. SiC – 27 მას.%, ხოლო Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5.7 მას.%.

### 3. დასკვნა

ამდენად, მასალაში გარკვეული რაოდენობის ალუმინის ოქსიდის ნაწილზე ნაწილზე წვრილდისპერსიულ მდგომარეობაში არსებობა, რომელიც დაარმატურებს მასალას, პერლიტის მიერ გეოპოლიმერთან კომპოზიციაში შექმნილი მინისებრი მასის 7.4 მას.%-ით, რომელიც მარცვლების მიზიდვას, შეკავშირებას და მათზე მინისებრი ნაწილების წარმოქმნის წინაპირობას უწყობს ხელს; სილიციუმის კარბიდის, რომელიც ხასიათდება კოვალენტური ძლიერი ბმებით, ფურცლოვანი სიალონის 57მას.% შემცველობა, რაც ნათლად ჩანს ელექტრონული მიკროსკოპიის სურათებზე, რის განვითარებასაც კომპოზიციაში ხელს უწყობს გეოპოლიმერი-პერლიტის მიერ წარმოქმნილი მინისებრი ფაზა, განაპირობებს ნაკეთობის მექანიკური მახასიათებლების ზრდას. კვარცის მარცვლების ოპტიმალური ზომები, მათზე დაბალი ნაწილზე მონაღლიობა ქობის სახით, რომელიც ხელს უწყობს ტანგენციური დამაბულობების განვითარებას, პერლიტში სილიციუმის მაღალი შემცველობა

(–74 მას. %) და მჟავა მინისებრ ფაზაში ალუმინის ოქსიდის თანაობა, ხელს უწყობს Si-O-Al კავშირების განვითარებას, რაც, ჩვენის აზრით, განაპირობებს მასალის მაღალ საექსპლუატაციო თვისებებს. ქიმიური მედეგობა წყლის მიმართ 99.9% შეადგენს, ხოლო 35 %-იანი NaOH მიმართ – 98.7, მექანიკა ღუნვაზე – 470 MPa, კუმშვაზე – 1910 MPa, გამოწვის ტემპერატურა – 0.18 წყალშთანთქმა – 1620°C.

### ლიტერატურა

1. ზ. კოვზირიძე, ჯ. ანელი, ა. სარუხანიშვილი. მასალათა მედეგობა აგრესიული მედიების მიმართ. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2008. გვ.51-99.
2. Zviad Kovziridze, Jimsheer Aneli, Natela Nijaradze, Gulnaz Tabatadze-Ceramic and Polymer Composites. Lambert Academic Publishing. Germany. 2017. Pp.119-209.
3. Kilian M. Friedrich-Produktionsverfahren Anwendungseigenschaften und Einsatzmoeglichkeiten von Nitridkeramik Insbesondere von Siliciumnitrid. Vortragsveroff. Haus Techn. Essen, 1987, #519, p. 19-21.
4. Wang L., He C., Wu J.-Oxidation of Sintered Siliconnitrid Materials. Ceram. Mater. And Comp. Engiener. Proc. Jnt. Simp. Las Vegas. #27-30, 1988. Westerville (Ohio), 1989, p. 604-611.
5. Zheng G., Zhao J., Gao Z., Cao Q. Cutting performance and wear mechanisms at SiAlON-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> graded nano-composite ceramic cutting tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012 V. 58, I. 1-4, p.19-38.
6. Riley F.L.-Silicon nitride and related materials, J. Am. Ceram. Soc., 2000, V. 83, #2, p. 10-30.
7. Шведков Е.Л. и др.-Слоарь-Справочник по Новой Керамике. Киев. Наукова думка. 1991. Украина. Стр.183, 269-271.
8. ზ. კოვზირიძე, ნ. ნიჟარაძე, გ. ტაბატაძე, თ. ჭეიშვილი, ზ. მესტვირიშვილი, მ. მშვილდაძე, ნ. დარახველიძე. კომპოზიტის მიღება მეტალოთერმული და აზოტირების პროცესებით Si-SiC-Al გეოპოლიმერის სისტემაში. ჟურნალი კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები. Vol.19. 2(38). 2017. გვ. 33-52.

9. ზ. კოვზირიძე, ნ. ნიჟარაძე, გ. ტაბატაძე, თ. ჭიჭინაძე, ზ. მესტვირიძე, მ. მშვილდაძე, ე. ნიკოლეიშვილი, ნ. დარახველიძე. ნიტროალუმინთერმული პროცესებით სიალონის მიღება. ჟურნალი კერამიკა. 2(32).2014. გვ. 23-32.
10. Budworth D.W. – Theory of pore closure during sinterring. Trans. Britt. Ceram. Soc. 69. 1970. Pp. 29-31
11. Z. Kovziridze-Failure Stress Energy Formula. XVI ECERS Conference and Exhibition of the European Ceramic Society. Torino. Italy. 16-20 June 2019. P.670. Abstract Book
12. Z. Kovziridze-Failure Stress Energy Formula. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control. Vol.8. No.3. September 2018. Pp. 31-47USA.  
<https://www.scirp.org>  
<https://www.scirp.org> Impact Factor.
13. ზ. კოვზირიძე. დამლის დაძაბულობის ენერჯის ფორმულა. საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“. Vol. 20. 1(39). 2018. გვ.11-23.
14. Zviad Kovziridze, Hans walter Henniscke, Friedrich Kharitonov – Thermomechanicsof Ceramics. Fachhochschule Karlsruhe Hochschule fuer Technik. Germany. 1998. Pp. 30-41.
15. Zviad Kovziridze – Formula of Thermogradient Effect. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control. Vol.8. # 4. Dezember 28. 2018. DOI 10.4236 / JEETC 2018. 84004
16. Ross G.S., Smith R.H. – Water and other volatiles in volcanic glasses. Amer. Mineralogist. V. 40. #11-82. 1955. P. 1071-1083.
17. Zviad Kovziridze – The Formula of Dependence of Mechanical Characteristics of Materials on Cristalline Phase of Materials Composition in the Matrix. Advances in Materials Physics and Chemistry. Vol.10. No. 8. August 21. 2020. DOI 10. 4236/AMPC 2020. 108013.
18. Будников П.П., Геворкян Х.О. – О роли полевого шпата в образовании структуры фарфора. Журнал «Стекло и керамика». 1952. 3. с.19-20
19. Полинковская А.И., Сергеев Н.И., Чернова О.А. Вспученный перлит-заполнитель легких бетонов. Издлит-ры по строительству. Москва. 1971. Стр.22-30.
20. Белянкин Д.С. О воде в магмах и магматических горных породах. Геологич. Вестник. Т. 6ю 1-3. 1928. Стр. 19-27
21. А.И. Августиник – Керамика. Ленинград. Строииздат. 1957. 8. с. 4-24
22. Г.Г. Гаприндашвили, Ф.Я. Харитонов, З.Д. Ковзиридзе – О процессах происходящих при термобработке низкотемпературной керамики. Грузинский Технический Университет. Тбилиси. 1998.
23. М.П. Воларович, А.Л. Леонтиева – Исследование вязкости обсидианов в связи с вопросом генезиса пемзы. ДАН т. XVII/ #8 1937/ с.419-421
24. Ганс Валтер Хенниле, Фридрих Яловлевич Харитонов, Звиад Давидович Ковзиридзе – Барисодержащая Электрокерамика Стойкая к Термударам. Тбилисский Тухнический Университет. Тбилиси 1992.
25. Явиц П.Н. Об исследованиях вязкости и плавкости некоторых вулканических водосодержащих стекол. ТрудыРОСНИИМС 25. 1962. С. 54-63.
26. Ross G.S., Smith R.H. – Water and other volatiles in volcanic glasses. Amer. Mineralogist, Vol. 40. N 11-82. 1955, p. 1071-1083.
27. Полинковская А. И., Сергеев Н.И., Чернова О.А. – Вспученный перлит-заполнитель легких бетонов. Изд-во лит-ры по строительству. Москваю 1971. С.22-30.
28. Белянкин Д.С. – О воде в магмах и магматических горных породах. Геологич. Вестник. Т. 6. 1-3. 1928. С. 19-27.
29. Будников П.П., Геворкян Х.О. – Обжиг фарфора. Строииздат. Москва. 1972. С.12-22.
30. Будников П.П., Геворкян Х.О. – О роли полевого шпата в образовании структуры фарфора. „Стекло и керамика“. 1952. 3. С.19-20.
31. Brindley G.W., KinstzyH.A. – J.Amer. Cer. Soc. Vol. 44. N 10/1924.
32. Калинина А. М., Филипович В.Н. – О природе термических превращении каолинита и алюмо-

- силикатных гелей. АН СССР. Ин химии силикатов ВХО им.Д.И. Менделеева. Силикаты и окислы высоких температур. М., 1963. С.81-95.
- 33.Гегузин И.Е. – Физика спекания. Изд-во „Наука“. Москва. 1967. Стр. 55-58, 130-141.
34. Мануилова Н.С., Столовицкая М.М., Вебер С.Н. – О влиянии структуры и текстуры перлитовых пород на их вспучиваемость. Труды РОСНИИМС. 1962. 25. Госстроиздат. М. С.45-54.

---

UDC 666.762.93

## PREPARATION AND RESEARCH OF A HIGH-TEMPERATURE COMPOSITE IN THE SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SYSTEM

Z. Kovziridze<sup>1</sup>, N. Nizharadze<sup>1</sup>, G. Tabatadze<sup>1</sup>, N. Darakhvelidze<sup>1,2</sup>, Z. Mestvirishvili<sup>1,2</sup>, N. Jalaghonias<sup>2</sup>, N. Jalabadze<sup>1</sup>, M. Balakhashvili<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Republican Center for Structural Research, Institute of Bionanoceramics and Nanocomposite Technologies. Georgian Technical University. Georgia. 0160, Tbilisi, st. Kostava, 69

<sup>2</sup> Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology (SIPT) , Tbilisi, 0186, Mindeli 7

E-mail: kowsiri@gtu.ge

**Resume:** The goal. Obtaining of a high-power heteromodular sialon composite in the SiC-SiAlON-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system: for armored vehicles, aviation and rocketry, for parts of jet engines and high-temperature gas turbines. Method. A composite with an open porosity of 15% was obtained by a metal-thermal process in technical nitrogen media, by reaction clinkering method. The material was processed in a ball mill for 10 hours, then for 10 minutes in the atrium until a dispersion of 1-3 μm, a hot-pressed product with high density and performance properties was synthesized at 1620°C. Result .The formation of β-SiAlON by reactive sintering at such low temperatures (instead of 1800°C) is facilitated by the composition of both the starting material - aluminum, silicon, SiC, geopolymer and perlite, as well as, instead of 860°C for dehydration and deaeration of water and gases from glassy perlite, recorded on the perlite thermogram, the transition to relatively high temperatures -1000-1050°C, which becomes the structure crumbly and activates the diffusion process.As a result, the formation of sialon at 1250-1300°C is already more intense due to the processes developing in the geopolymer-perlite composition at 1000-1050°C.The formation of sialons is such a powerful physical and chemical process, which is promoted by the relatively high pressure of nitriding and metallothermy in this temperature range, that the resulting sialon consumes Multiple oxides formed as a result of internal molecular transformations of the geopolymer and synthesized at high temperatures at 1620°C;mullite is no longer found in the phase composition.Sialon becomes the predominant phase in the structure - 57% by weight. Conclusion. The development of the process is facilitated by the use of glassy perlite Dopant-Aragats, which, together with a geopolymer with eutectic at low temperatures, creates a good prerequisite for intensive processing of diffusion processes with other components. The paper presents the results of electron microscopic, X-ray diffraction and X-ray spectral analyzes, mathematical calculations of physical and chemical processes, which confirmed our theoretical conclusions based on practical experiments.

**Keywords:** composite; hot pressure; Structure; Phase composition.

უაკ 543.3; 553.6.

## სახარე ტბის ფსკერზე დალექილ და ტბის ზედაპირზე ბუნებრივად გამოკრისტალეზულ მარილებში ნატრიუმის სულფატის შემცველობის შესწავლა

თ. ნასუაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველო 0160, თბილისი მ. კოსტავას 69

E-mail: tamara2903@gmail.com

**რეზიუმე:** მიზანი. ქიმიურ ინდუსტრიაში ნატრიუმის სულფატი ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პროდუქტია და მასზე სამრეწველო მოთხოვნილება დღითი დღე იზრდება, თუმცა წარმოების ტემპები მნიშვნელოვნად ჩამორჩება მოთხოვნილებას.

საქართველოში არსებული ნატრიუმის სულფატის შემცველი ტბებიდან, ნატრიუმის სულფატის პროცენტული შემცველობისა და ტბის ფსკერზე დალექილი მარილების მარაგების თვალსაზრისით, მნიშვნელოვანია საგარეჯოს მუნიციპალიტეტში არსებული ტბები, რომელიც ცნობილია აზამბურის ჯგუფის ტბების სახელით და რომლებიც მირაბილიტის საბადოზეა განთავსებული. აზამბურის ჯგუფის ტბები წარმოდგენილია 3 ტბის სახით, ესენია: სახარე ტბა, გარეჯელა და ქაჩალ ტბა. მირაბილიტის მარაგის თვალსაზრისით, მნიშვნელოვანია სახარე ტბა და გარეჯელა, რომლებშიც არსებული მარილების ჯამური მარაგი სავარაუდოდ 1 000 000 ტონას აღწევს [1-4].

კვლევის მიზანია საბადოს ფსკერზე დალექილ და ტბის ზედაპირზე გამოკრისტალეზულ მარილებში ნატრიუმის და სულფატის იონების შემცველობის დადგენა.

**მეთოდები.** 2019, 2020 და 2021 წლების დეკემბრის თვეებში სახარე ტბიდან აღებულ იქნა ტბის ზედაპირზე ბუნებრივად გამოლექილი მარილების სინჯები, ხოლო ტბის ფსკერიდან სხვადასხვა წერტილსა და სხვადასხვა სიღრმეში – სიღრმული ნალექების სინჯები და ჩატარდა მათი წყალხსნარების ქიმიური შედგენილობის კვლევა.

**შედეგი.** მარილების კვლევამ აჩვენა, რომ სახარე ტბიდან აღებული მარილების ყველა ნიმუშში ნატ-

რიუმის და სულფატის იონების რაოდენობა მნიშვნელოვნად აღემატება სხვა იონების რაოდენობას და საბადოს დამუშავება, ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით, გამართლებულია.

**დასკვნა.** იმის გათვალისწინებით, რომ აზამბურის საბადოს დამუშავების საკითხი დღემდე არ არის გადაწყვეტილი, განხორციელებული კვლევა მნიშვნელოვან წვლილს შეიტანს მირაბილიტიდან უწყლო ნატრიუმის სულფატის მიღების ტექნოლოგიური სქემის შექმნა-დამუშავებაში.

**საკვანძო სიტყვები:** უწყლო ნატრიუმის სულფატი; სახარე ტბა; მირაბილიტი; აზამბურის ჯგუფის ტბები; კრისტალები.

### 1. შესავალი

ნატრიუმის სულფატი, როგორც სუფრის მარილის და გოგირდმჟავას ურთიერთქმედების ნაშთი, 1658 წელს პირველად აღწერა გლაუბერმა და მის საპატივცემულოდ „გლაუბერის მარილი“ ეწოდა. მოგვიანებით, ნატრიუმის სულფატი აღმოაჩინეს მარილების ბუნებრივ დანალექებში და ასევე ბუნებრივ მარილ-პეჯოებში [5-8].

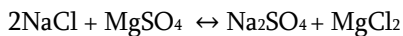
მსოფლიოს ის ქვეყნები, სადაც ნატრიუმის სულფატის ბუნებრივი რესურსებია, მას ბუნებრივი რესურსების მოპოვებით და გადამუშავებით აწარმოებენ, ხოლო ის ქვეყნები, სადაც არ არსებობს ნატრიუმის სულფატის ბუნებრივი წყაროები, მისი წარმოების ქიმიურ საშუალებებს მიმართავენ და პროდუქტად სულფატის შემცველ ნარჩენებს იყენებენ [9-11].

ნატრიუმის სულფატის შემცველი ბუნებრივი რესურსები მრავალკომპონენტია სისტემა და ამ



სისტემის ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები, კლიმატური პირობების გავლენით (ტემპერატურა, ატმოსფერული ნალექები), იცვლება.

ბუნებრივი მარილხსნარების და მარილების საბადოების კვლევამ აჩვენა [5], რომ მათგან მიღებული მშრალი ნალექის დაახლოებით 93%-ს ოთხი ძირითადი მარილი შეადგენს, რომელთა ურთიერთგარდაქმნა გამოისახა შემდეგნაირად:



ნატრიუმის სულფატი ბუნებაში გავრცელებულია სხვადასხვა მინერალის სახით, ესენია: ტენარდიტი, მირაბილიტი, ასტრახანტი, გლაუბერიტი, გლაზერიტი, ბერკეიტი და სხვა. გავრცელების მიხედვით, ცნობილია ტენარდიტულ-მირაბილიტური სასარგებლო წიაღისეული და ტბის ტიპის საბადოები [12].

ზოგადად უნდა აღინიშნოს, რომ ტბის ტიპის საბადოები მირაბილიტის, ტენარდიტის, ასტრახანტის და გლაუბერიტის მუდმივი ფსკერული დანალექებია, რომლებიც წარმოდგენილია როგორც გეოლოგიური ფენების სახით, ისე ტბის ფსკერული დანალექებით. მირაბილიტის საბადოების უმეტესობა წარმოდგენილია სულფატის მარილების ნარევების სახით. სულფატური ტბების მარილპეჯო, რომელიც ასევე გავრცელებულია ნატრიუმის ქლორიდით, შეიცავს სულფატ-იონების მნიშვნელოვან რაოდენობას. ყოველწლიურად, შემოდგომასა და ზამთარში, 0°C დაბალ ტემპერატურაზე, ხდება მირაბილიტის გამოკრისტალება [13-15].

მარილიანი ტბების წყლებს და მათ ფსკერულ ნალექებს, დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება ნატრიუმის სულფატის მოპოვების თვალსაზრისით.

## 2. ძირითადი ნაწილი

### ნიმუშების დამზადება

უწყლო ნატრიუმის სულფატის მიღების მიზნით, 2019 წლის ნოემბრიდან 2021 წლის დეკემბრის ჩათვლით, წარმოებდა სახარე ტბის წყლის, ტბის ფსკერზე არსებული ნალექებისა და ტბის ზედაპირზე სეზონურად გამოკრისტალებული მარილების კვლევა.

ზემოაღნიშნული კვლევა ითვალისწინებს როგორც ტბის წყლის კვლევას, ისე ტბის ფსკერზე დალექილი მარილების, შლამის და ზამთრის პერიოდში ბუნებრივად გამოკრისტალებული მარილების შედგენილობის ქიმიურ ანალიზს.

როგორც ცნობილია, აზამბურის ჯგუფის ტბების გეოლოგიური კვლევა ჯერ კიდევ 1955 წლიდან დაიწყო და შედეგები დაცულია სსიპ წიაღის ეროვნული სააგენტოს ფონდებში [4].

სსიპ წიაღის ეროვნულ სააგენტოში დაცული გეოლოგიური ანგარიშის მიხედვით, კვლევის ფარგლებში, ტბის ფსკერიდან აღებულ იქნა 125 ცალი კერნული სინჯი. ამასთან, ჭაბურღილებს შორის მანძილი 100 მ იყო. სინჯების გეოტექნიკური კვლევის მიხედვით, ტბის ნალექების მაქსიმალური სიმძლავრე (სიღრმე) 16 მეტრამდეა. ტბის ნალექები ძირითადად წარმოდგენილია რუხი და მოლურჯო თიხა-ილისებრი წარმონაქმნებით. რომლებიც მირაბილიტის ლინზისებურ სხეულებს (ჩანართებს) შეიცავს, რომელთა სიმძლავრე 0,1-6,5 მეტრის ფარგლებშია. დანალექებში, ჩანართების სახით, არსებული მირაბილიტის ფენები მიკროსკოპულად ერთგვაროვანი შედგენილობისაა და იშვიათად შეიცავს თიხის შუა შრეებს [2].

ტბის ფსკერზე არსებულ დანალექებში, ასევე ტბის ზედაპირზე ზამთრის პერიოდში ბუნებრივად გამოკრისტალებულ მარილში, ნატრიუმის სულფატის და მინარევების სახით, სხვა მარილების რაოდენობის დადგენის მიზნით, ჩატარდა ლაბორატორიული კვლევა.

საკვლევ მასალად გამოვიყენეთ ტბის ფსკერი, სხვადასხვა წერტილიდან აღებული ნალექების 3 სინჯი, შლამის 1 ნიმუში და 2019, 2020 და 2021 წლების დეკემბერში ტბის ზედაპირზე ბუნებრივად გამოკრისტალებული მარილების თითო სინჯი; ლაბორატორიული კვლევისთვის საკვლევი მარილების ნიმუშები,  $5 \pm 0,0001$  გ ოდენობით, რომელიც გაიხსნა გამოხდილ წყალში. მარილში არსებული უხსნარი მასის გამოყოფის მიზნით, დამზადებული ხსნარი გაიფილტრა წინასწარ მომზადებულ ლენტებიანი თეთრი ფილტრის ქაღალდზე. ფილტრის ქაღალდის წინასწარ მომზადებაში იგულისხმება ფილტრის ქაღალდის დანომვრა, ექსი-

კატორში მუდმივ წონამდე გამრობა და აწონა  $\pm 0,0001$  გ სიზუსტით. საწყისი ხსნარის ჭურჭლიდან წყალში უხსნარი მასის ფილტრის ქაღალდზე სრულად გადმოტანის მიზნით, ჭურჭელი რამდენჯერმე გამოირეცხა ფილტრატით, ხოლო ფილტრის ქაღალდზე დარჩენილი უხსნარი მასა, წყალში ხსნადი ნივთიერებების ხსნარში გადაყვანის მიზნით, რამდენჯერმე გაირეცხა ადუღებული, დისტილირებული წყლით. ფილტრატი გადატანილ იქნა ბრტყელოძირა, 500 მლ მზომ კოლბაში და დისტილირებული წყლით შეივსო ჭდემდე. ანალოგიურად მომზადდა ყველა სინჯი.

**ნიმუშების ქიმიური კვლევა**

დამზადებულ ხსნარებში განისაზღვრა pH, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> და K<sup>+</sup> იონები. ნიმუშების ქიმიური კვლევის შედეგები მოცემულია 1-ელ ცხრილში. თითოეული სინჯიდან გამოყოფილი უხსნარი ნაშთის რაოდენობა (გ) მოცემულია მე-2 ცხრილში, ხოლო საკვლევ ხსნარებში არსებული იონების კონცენტრაციები და უხსნარი ნაშთის რაოდენობის ურთიერთშედეგების ანალიზი წარმოდგენილია 1-3 დიაგრამებზე.

ცხრილი 1

**სახარე ტბის ზედაპირიდან და ფსკერიდან აღებული მარილების ქიმიური კვლევის შედეგები**

განსაზღვრული პარამეტრები, ერთეული	განსაზღვრის მეთოდი	ნიმუში N1*	ნიმუში N2*	ნიმუში N3*	ნიმუში N4* (შლამი)	ნიმუში N5*	ნიმუში N6*	ნიმუში N7*
pH	ისო 10523-2008	7,65	7,55	7,45	7,65	7,55	7,55	7,45
კალციუმი, მგ/ლ	გოსტ 23268.5-1978	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
კალიუმი, მგ/ლ	ისო 9964-3-1993	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
მაგნიუმი, მგ/ლ	გოსტ 23268.5-1978	2,8	3,22	2,304	3,29	2,8	2,18	2,78
ნატრიუმი, მგ/ლ	ისო 9964-3-1993	29,75	26,624	27,743	23,624	18,06	16,38	17,79
ჰიდროკარბონატი, მგ/ლ	გოსტ 23268.3-78	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
კარბონატი, მგ/ლ	გოსტ 23268.3-78	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
სულფატი, მგ/ლ	ისო 9280-1990	54,8	52,479	44,966	45,305	34,48	31,2	34,28
ქლორიდები, მგ/ლ	გოსტ 23268,17-78	1,8	2,31	1,531	1,71	1,72	0,96	1,44

\*ნიმუში N1-N4 - ტბის ფსკერის დანალექი, ნიმუში N5-N7 - ტბის ზედაპირიდან აღებული ნიმუშები

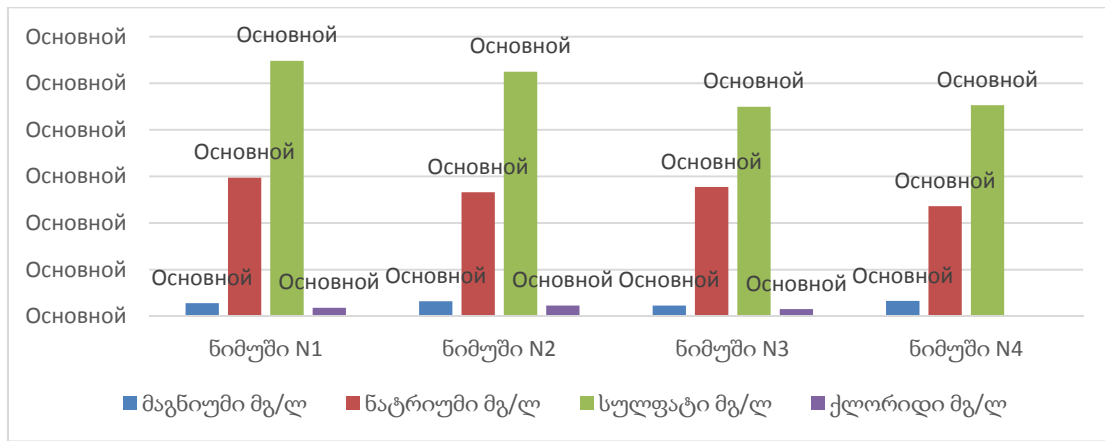
სახარე ტბის ზედაპირსა და ფსკერიდან აღებული მარილებში არსებული უხსნარი ნაშთი

N	ნიმუში N1*	ნიმუში N2*	ნიმუში N3*	ნიმუში N4* (შლამი)	ნიმუში N5*	ნიმუში N6*	ნიმუში N7*
უხსნარი ნაშთი, %	9,83	12,36	15,63	25,46	42,59	51,24	43,27

\*ნიმუში N1–N4 – ტბის ფსკერის დანალექი, ნიმუში N5–N7 – ტბის ზედაპირიდან აღებული ნიმუშები

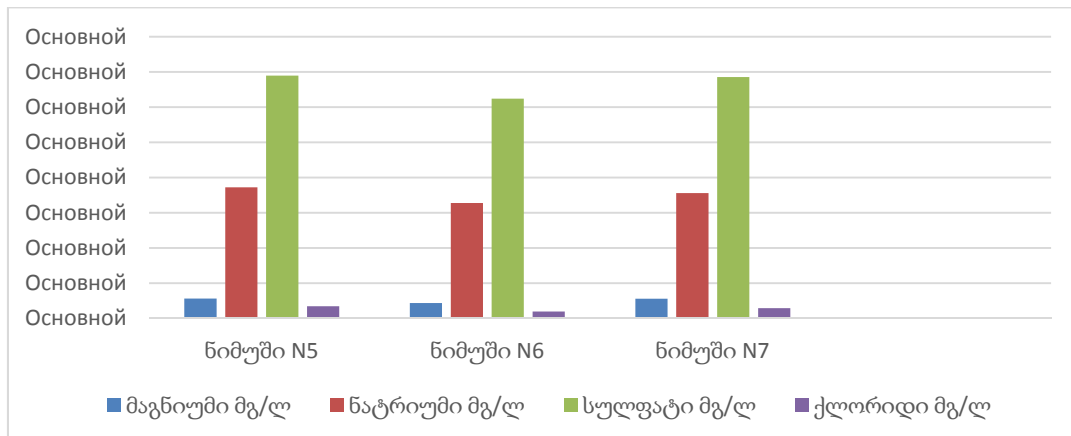
დიაგრამა 1

სახარე ტბის ნალექებში მაგნიუმის, ნატრიუმის, სულფატის და ქლორიდის იონების შემცველობა

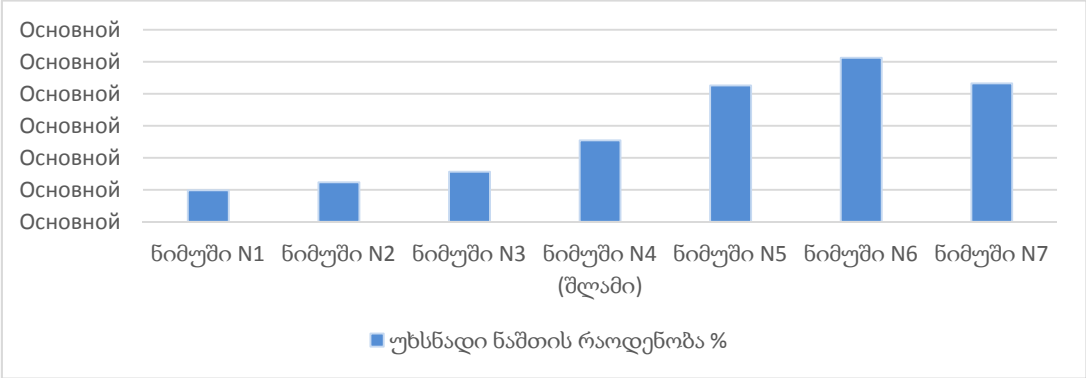


დიაგრამა 2

სახარე ტბის ზედაპირზე სეზონურად გამოკრისტალებულ მარილებში მაგნიუმის, ნატრიუმის, სულფატის და ქლორიდის იონების შემცველობა



სახარე ტბის ზედაპირიდან და ნალექებიდან აღებულ მარილებში უხსნადი ნაშთის პროცენტული შემცველობა



3. დასკვნა

როგორც ანალიზის შედეგებიდან ჩანს, ყველა სინჯი შეიცავს წყალში უხსნარ მინარევებს და აღნიშნული მინარევების რაოდენობა სხვადასხვა სინჯში სხვადასხვაა. უხსნარი მინარევების დიდი რაოდენობა შეინიშნება ტბის ფსკერიდან აღებულ შლამში და ტბის ზედაპირზე ბუნებრივად გამოკრისტალბულ მარილებში.

ტბის ზედაპირიდან აღებულ ნიმუშებში უხსნარი მინარევების რაოდენობა იმით აიხსნება, რომ

სინჯების აღებისას ტბის ზედაპირი გაწყლოვანებული იყო და კრისტალები შეირჩა ტბის ზედაპირზე არსებულ ბუნებრივ გრუნტში (შლამი) და მათი განცალკევება ფაქტობრივად შეუძლებელი გახდა (იხ. სურათი 1-3).

რაც შეეხება ტბის ფსკერიდან აღებულ დანალექებს, მათში წყალში უხსნარი მინარევების შემცველობა გაცილებით დაბალია და დაახლოებით 9-15 %-ის ფარგლებში იცვლება.



სურათი 1. სახარე ტბის ზედაპირი 2019 წლის დეკემბერში



სურათი 2. სახარე ტბის ზედაპირი 2020 წლის დეკემბერში



**სურათი 3. სახარე ტბის ზედაპირი  
2021 წლის დეკემბერში**

ანალიზების შედეგების მიხედვით, ტბის დანალექებში და ზედაპირზე არსებულ მარილებში ნატრიუმის და სულფატის იონების რაოდენობა მნიშვნელოვნად აღემატება ჩვენ მიერ გამოკვლეულ სხვა იონების რაოდენობას და დაახლოებით 85–90%-ის ფარგლებშია. მარილებში ვერ იქნა აღმოჩენილი კალციუმისა და კალიუმის იონები, მათი სიმცირის გამო, ხოლო კარბონატისა და ჰიდროკარბონატის კონცენტრაცია ყველა სინჯში 0,5 მგ/ლ-ზე დაბალია. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მირაბილიტის მოპოვების თვალსაზრისით, მისგან უწყლო ნატრიუმის მიღების მიზნით, მნიშვნელოვანი რესურსია არა მხოლოდ სახარე ტბის წყალი, არამედ მის ფსკერზე არსებული დანალექებიც.

კვლევის შემდეგ ეტაპზე, მირაბილიტიდან უწყლო ნატრიუმის სულფატის მიღების მიზნით, დაგეგმილია, მათემატიკური გზით, ექსპერიმენტული კვლევების ჩატარება, რათა გამოითვალოს პროცესის თეორიული გამოსავალი და ტექნოლოგიური სქემა დამუშავდეს.

### **ლიტერატურა**

1. M. Mchedlishvili, T. Nasuashvili. "Investigation of the Azamburi Mirabilite mine and lake water to obtain anhydrous sodium sulfate", Mineralogical Society of Georgia. G. Tsulukidze Mining Institute Georgian Technical University, book of abstracts, 6th International Scientific-Practical Conference on Up-to-date Problems of Geology, 2020.

2. გ. ვაშაძე, ვ. ასათიანი. „საქეოლოგია“, 1957–1962 წ.
3. თ. ნასუაშვილი, მ. მჭედლიშვილი. აზამბურის მირაბილიტის საბადოსა და ტბის წყლის გამოკვლევა უწყლო ნატრიუმის სულფატის მიღების მიზნით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, N2(520), 2021 წ. გვ. 95.
4. დ. ერისთავი, ნ. პომერანცევა, ტ. ჩილინგარაშვილი. ს. მ. კიროვის სახელმწიფო პოლიტექნიკური ინსტიტუტის შრომები, 1956 წ. N5. სსიპ წიაღის ეროვნულ სააგენტოში დაცული ფონდებიდან.
5. Позин М, Е „Технология минеральных солей (удобрении, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот,, ч, I изд,-е, испр. Л., изд-во „Химия,, 1974.
6. Шихеева Л. В. Зырянов В, В, Сульфат натрия Свойства и производство, Издательство „Химия,, Ленинградское отделение – 1978.
7. Л. Н. Матусевич, „Кристаллизация из Растворов в Химической Промышленности“, издательство „Химия“, Москва 1968 г.
8. Здановский А.Б., Галургия. – Л. : Химия 1972. С.528
9. Kooi C. F. The steady state salt gradient solar pond. 1979. 37-41
10. G. Lesino, L. Saravia, J. Mangussi, and R. Ca.so. Operation of a 400 m<sup>2</sup> sodium sulfate solar pond in Salta. Argentina. International Solar Ponds Letters 1, 12 (1982 ).

11. F. Zangrando, A simple method to establish salt gradient solar ponds, *Solar Energy* 25(5), 467-470 (1980).
12. J. Mangussi and L. Saravia, Disolueirn de sales en el fondo de una poza solar, *Actas del I11 Congreso Ibdrico de Energfa Solar*, Madrid, Espa a, 1, 249 (1987).
13. Фроловского Е.Е. Производство сульфата натрия из рассолов озера Кучук. Издательство Санкт Петерб. 2001. С. 444.
14. Сельвинский С. Н., Новик В. Ф. „Исследование процесса растворения мирабилита в рапе озера Кучук“. Новосибирск: Издательство СО АН СССР, 1968. С. 179.
15. В. В. Зацепинб Е. В. Лобанова. Гидрохимический режим озера Кучук. Издательство ПОЛУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №4. 2004.

UDC 543.3; 553.6.

## STUDY OF SODIUM SULFATE CONTENT IN SALTS DEPOSITED ON THE BOTTOM OF THE GOSPEL LAKE AND NATURALLY CRYSTALLIZED ON THE LAKE SURFACE

T. Nasuashvili

Georgian Technical University, Department of Chemical and Biological Technologies, Str Costava 69. 0175 Tbilisi. Georgia.

E-mail: tamara2903@gmail.com

**Resume: Purpose.** Sodium sulfate is one of the most important products in the chemical industry and the industrial demand for it is growing day by day, however, the production rates are significantly lower than the demand.

In Georgia, among the lakes, in terms of the percentage of sodium sulfate in it and the reserve of salts deposited on the bottom are important lakes of Azamburi group, which are placed in Sagarejo Municipality and they are located at the Mirabilite deposit. Lakes of Azamburi Group are presented of 3 lakes, named: Sakhre-Lake, Garejela and Kachaal-Lake. Only the Sakhre-Lake and Garejela are important in terms of Mirabilite stock. The total reserves of Mirabilite in the Azamburi field exceed 1 000 000 tons [1-2].

The aim of the study was to determine the content of sodium and sulfate ions in the salts deposited on the bottom of the deposit and crystallized on the surface of the lake.

**Method:** From the Sakhare Lake, in December 2019, 2020 and 2021, samples of naturally occurring salts were taken from the surface of the lake, In addition, samples of deep sediments were taken from the bottom of the lake, at different points and at different depths, and a study of the chemical composition of their aqueous solutions was conducted.

**Results:** The study of salts showed that in all samples of salts taken from the lake, the amount of sodium and sulfate ions was significantly higher than the number of other ions and deposit processing, by technically-economically is justified.

**Conclusion:** Considering that the issue of obtaining anhydrous sodium sulphate from a brackish lake in the form of salt-water at the Mirabilite deposit and its surface has not been resolved yet, the conducted research will make a significant contribution to the creation and development of a technological scheme for obtaining anhydrous sodium sulphate from mirabilite.

**Keywords:** Anhydrous sodium sulfate; Sakhare Lake; mirabilite; lakes of Azamburi group; crystals.

უაკ 666.952

## თერმულად მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების პუცოლანური აქტიურობის კვლევა თ. პეტრიაშვილი

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ალექსანდრე თვალჭრელიძის სახელობის მინერალური ნედლეულის კავკასიის ინსტიტუტი. საქართველო, 0186, თბილისი, მინდელის 11

E-mail: tamo.petriashvili.92@mail.ru

**რეზიუმე:** მიზანი. ცემენტის ახალი მაღალ-აქტიური პუცოლანური დანამატის მიღება ადგილობრივი ნედლეულის საფუძველზე.

**მეთოდი.** ნიმუშების თერმული დამუშავება ჩატარდა მუფელის ელექტროლუმელში.

რენტგენოფაზური ანალიზისთვის გამოიყენეს დიფრაქტომეტრი Дрон-4.0, НПП "Буревестник", სპილენძის ანოდით და ნიკელის ფილტრით. U (ძაბვა) – 35kv. I (დენის ძალა) – 20mA. გადაღების სიჩქარე – 2 გრად/წთ.  $\lambda = 1.54778 \text{ \AA}$ .

დიფერენციალურ-თერმული ანალიზებისთვის კი გამოიყენეს გერმანული ფირმის დერივატოგრაფი NETZSCH, STA-2500 REGULUS ანალიზატორით. ნიმუშების გაახურეს 1000°C-მდე კერამიკულ ტიგელში, გახურების სიჩქარე – 10 გრად/წთ. ეტალონური ნივთიერება –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

პუცოლანური აქტიურობა განისაზღვრა სტანდარტული მეთოდით – GOST R 56593-ის მიხედვით.

**შედეგი.** დადგინდა ადგილობრივი თიხოვანი ქანების თერმული მოდიფიცირების ოპტიმალური რეჟიმი, რაც მათი პუცოლანური აქტიურობის გაზრდას განაპირობებს.

**დასკვნა.** ჩატარებული კვლევების საფუძველზე გამოვლინდა პერსპექტიული ადგილობრივი თიხოვანი ქანები, რომლებიც გარკვეული რეჟიმით თერმული დამუშავების – მოდიფიცირების შემდეგ შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ცემენტის მაღალაქტიური პუცოლანური დანამატის სახით, რაც განაპირობებს კლინკერის წილის მნიშვნელოვან შემცირებას ცემენტში, მისი მექანიკური სიმტკიცის გაუარესების გარეშე. ასეთებად მიჩნეულია: მდ. დურუჯის თიხაფიქალი, მოდიფიცირებული 800°C

ტემპერატურაზე, თელეთის არგილიტი, მეტეხის, მირიანისა და გარდაბნის თიხები, მოდიფიცირებული 700°C ტემპერატურაზე.

**საკვანძო სიტყვები:** თიხოვანი ქანები; პუცოლანური აქტიურობა; თერმული მოდიფიცირება.

### 1. შესავალი

ცემენტბეტონის წარმოება სათბობ-ენერგეტიკული რესურსების და ბუნებრივი ნედლეულის ერთ-ერთ უმსხვილეს მომხმარებლად ითვლება მსოფლიოში. ცემენტის კლინკერის მაღალტემპერატურული გამოწვის პროცესში კირქვის დეკარბონიზაციის შედეგად ატმოსფეროში გამოიყოფა სათბურის აირები, ძირითადად CO<sub>2</sub>-ის სახით, რომელიც მსოფლიო გამონახობის 8%-ს შეადგენს და გარემოს გამოუსწორებელ ზიანს აყენებს. შესაბამისად, კლინკერის გამოყენების ნებისმიერი შემცირება სერიოზულ გავლენას მოახდენს გლობალური დათბობის პროცესის შეწყვეტაზე.

ცემენტის პუცოლანური დანამატების გამოყენება ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური მეთოდია ამ პრობლემის გადასაჭრელად. კლინკერის ნაწილის მინერალური დანამატით შეცვლა ხელს შეუწყობს ბუნებრივი რესურსების რაციონალურ გამოყენებას, ასევე შეამცირებს დანახარჯებს პროდუქციის წარმოებაზე იმ პირობით, რომ შენარჩუნებულ იქნეს ცემენტის ჰიდრაული პუცოლანობა.

პუცოლანური დანამატების გამოყენება ცემენტს ისეთ თვისებას ანიჭებს, როგორცაა: სულფატმედეგობა, წყალგაუმტარობა, ხანმედეგობა და სხვა.

პუცოლანური აქტიურობა დანამატის უნარია, რომ ცემენტის ჰიდრატაციის დროს გამოყოფილი კალციუმის ჰიდროქსიდი ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) შებოჭოს, რის შედეგადაც დამატებით წარმოიქმნება კალციუმის ჰიდროსილიკატები და ჰიდროქსიდები, თავდაპირველად გელის სახით, რომლებიც შემდგომ გამოკრისტალდება და ცემენტის ქვას დამატებით სიმტკიცეს მიანიჭებს.

საქართველოში დიდი ხანია ხარისხიანი ბუნებრივი პუცოლანური დანამატების მწვავე დეფიციტი აღინიშნება. ამავე დროს მშენებლობის მაღალი ტემპები განაპირობებს ცემენტზე მოთხოვნის მუდმივ ზრდას, რაც ამ დანამატების სხვა ქვეყნებიდან იმპორტირების მიზეზი ხდება. ეს კი პროდუქციის თვითღირებულების გაზრდას იწვევს და დარგის განვითარებას აფერხებს ან ადგილი აქვს საწინააღმდეგო პროცესს – ცემენტის მწარმოებლები იყენებენ უხარისხო, დაბალი პუცოლანური აქტიურობის მქონე მასალებს, რომლებიც ცემენტებისა და ბეტონების ხარისხს ადაბლებს.

ამ მიმართულებით ა. თვალჭრელიძის სახელობის მინერალური ნედლეულის კავკასიის ინსტიტუტში წლების განმავლობაში ტარდება კვლევები ახალი ბუნებრივი თუ ხელოვნური პუცოლანური დანამატების შესწავლის და გამოყენების მიზნით [1-5].

ხარისხიანი ბუნებრივი პუცოლანური დანამატების დეფიციტის გამო, პრაქტიკულ ინტერესს იძენს არსებული ადგილობრივი ნედლეულის პუცოლანური აქტიურობის გაზრდის მეთოდების შემუშავება.

ბოლო წლებში მსოფლიოში დიდი პოპულარობით სარგებლობს მეტაკაოლინი, როგორც ცემენტის ეფექტური პუცონანური დანამატი [6]. მეტაკაოლინის დამატება უზრუნველყოფს ბეტონის სიმკვრივის, წყალგაუმტარობის და სიმტკიცის გაზრდას, რითაც იზოგება კლინკერი, როგორც ცემენტის ყველაზე ენერგოტევადი და ძვირადღირებული კომპონენტი. მეტაკაოლინი მიიღება კაოლინური თიხების თერმული დამუშავებით,

რომელთა საბადოები მსოფლიოში საკმაოდ შეზღუდულია. ამის გამო, მიმდინარეობს კვლევები ჩვეულებრივი პოლიმინერალური თიხებისა და თიხური ფიქლებისგან მეტაკაოლინის მიღების შესაძლებლობაზე, რაც ამ მასალას იაფს და ხელმისაწვდომს გახდის [7, 8].

ცემენტის პუცოლანური დანამატის მიღების პრაქტიკა ჩვეულებრივი თიხოვანი ქანების გამოწვევით სხვადასხვა ტემპერატურაზე დიდი ხანია ცნობილია [9-14].

ამ მიზნით შევისწავლეთ საქართველოს თიხოვანი ქანები: თიხაფიქლები, არგილიტები და ადვილლობადი თიხები.

## 2. ძირითადი ნაწილი

1-ელ ცხრილში წარმოდგენილია საკვლევი მასალების ქიმიური შედგენილობები: №1 – თიხაფიქალი (მდ. დურუჯის ხეობა); №2 – არგილიტი (თელეთი); №3 – თიხა (მეტეხი); №4 – თიხა (მირიანი); №5 – თიხა (გარდაბანი).

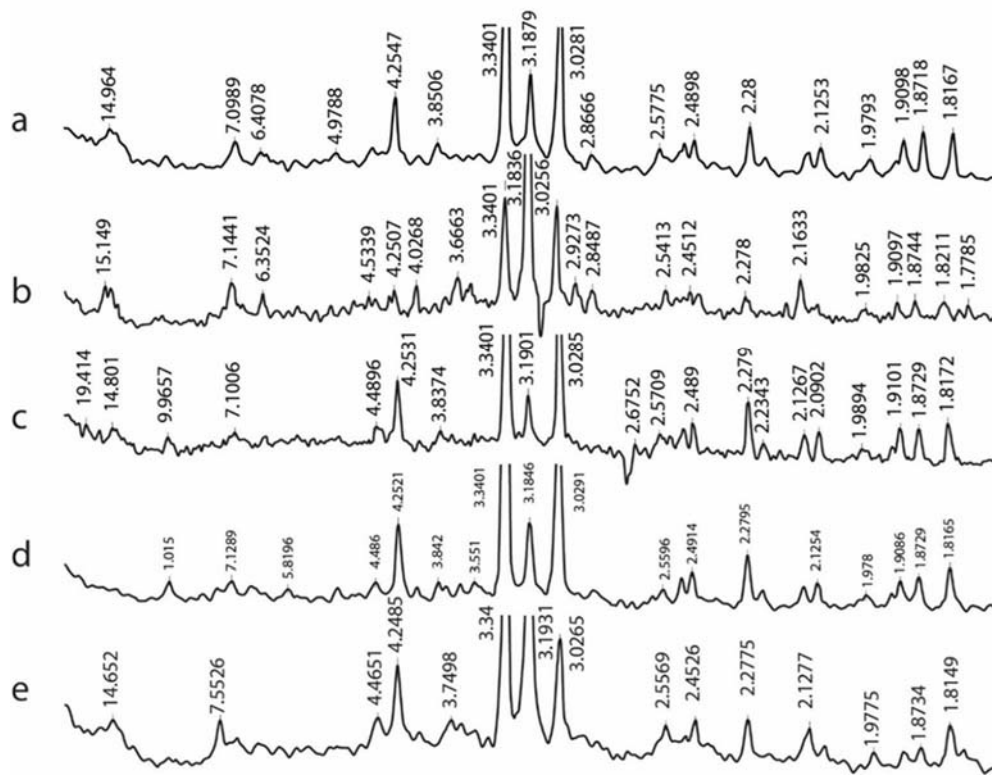
თიხოვანი ქანების რენტგენოგრამებზე (სურ. 1) ფიქსირდება: თიხური მინერალები 14.66 - 14.96, 7.14, 4.25, 3.66, 2.86, 2.327 Å); კვარცი (3.34 Å); მინდვრის შპატები (3.87 Å) და კალციუმის კარბონატი (3.03 Å).

თიხოვანი ქანების ტემპერატურული გარდაქმნის დასადგენად ჩატარდა თერმოგრავიმეტრიული ანალიზები (სურ. 2). ენდოთერმული ფარგლებში ყველა მრუდზე აღინიშნება, რომელიც შეესაბამება მექანიკურად მიერთებულ წყლის მოცილებას. 650–850°C-ის ტემპერატურულ ინტერვალში ვლინდება ძლიერი ენდოთერმული რაც, სავარაუდოდ, თიხური მინერალების კრისტალური მესრის რღვევას მათ აქტიურ ამორფულ ფორმაში – მეტაკაოლინში გარდაქმნას უკავშირდება. ამ ენდოთერმული პიკი შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე აღინიშნება გარდაბნის თიხას (718°C), რაც მეტყველებს ამ თიხის თვისებაზე, კარგად დაექვემდებაროს ტემპერატურულ გააქტიურებას – მოდიფიცირებას.

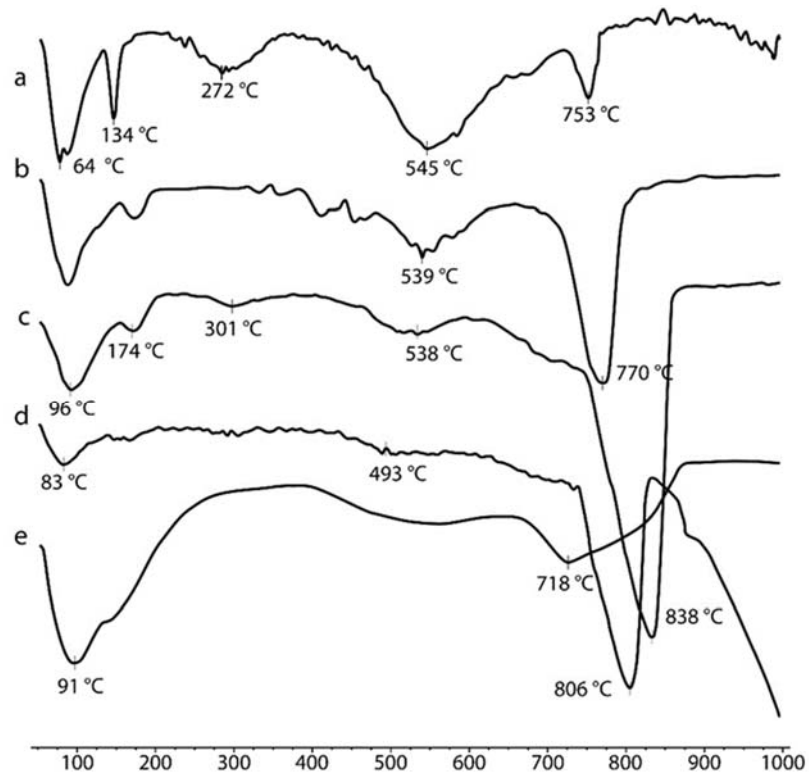


თიხოვანი ქანების  
ქიმიური შედგენილობა, მას. %

№	ბ. დ.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
1	4.50	59.95	0.89	17.30	3.45	3.65	0.59	1.53	2.43	0.30	2.20	2.20
2	7.01	47.19	-	15.90	13.36	-	0.10	6.30	4.10	1.39	2.86	1.30
3	13.70	49.35	0.24	11.20	4.55	-	0.24	13.55	2.28	0.55	1.13	1.73
4	15.16	46.71	0.42	13.20	4.19	-	0.10	15.5	1.40	0.73	1.34	1.05
5	10.60	52.84	-	15.07	6.47	-	-	7.06	2.49	1.36	1.19	2.17



სურ. 1. თიხოვანი ქანების რენტგენოგრამები:  
a – თიხაფიქალი, b – არგილიტი, c - თიხა (მეტეხი),  
d - თიხა (მირიანი), e - თიხა (გარდაბანი)



სურ. 2. თიხოვანი ქანების DTG მრუდები: a – თიხაფიქალი, b – არგილიტი, c - თიხა (მეტეხი), d - თიხა (მირიანი), e - თიხა (გარდაბანი)

როგორც მე-2 სურ-დან ჩანს, თიხოვანი ქანების ტემპერატურული დამუშავების შედეგად, 550°C-დან იწყება თიხის კრისტალური მესრის ნაწილობრივი დაშლა და თიხის შემცველი ოქსიდები SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> და Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> რენტგენამორფულ ფაზაში გადადის ანუ თიხა იძენს პუცოლანურ თვისებებს (გამყარებად ცემენტში კალციუმის ჰიდროოქსიდთან შებმას და კალციუმის უხსნარ ჰიდროსილიკატებში გადაყვანას). ტემპერატურის 800°C-მდე მატებასთან ერთად თიხის კრისტალური მესერი მთლიანად იშლება და ამორფული ფაზის შემცველობა იზრდება, ხოლო თიხის პუცოლანური თვისებები – უმჯობესდება.

ჩატარდა თიხოვანი ქანების თერმული დამუშავება შემდეგი რეჟიმებით:

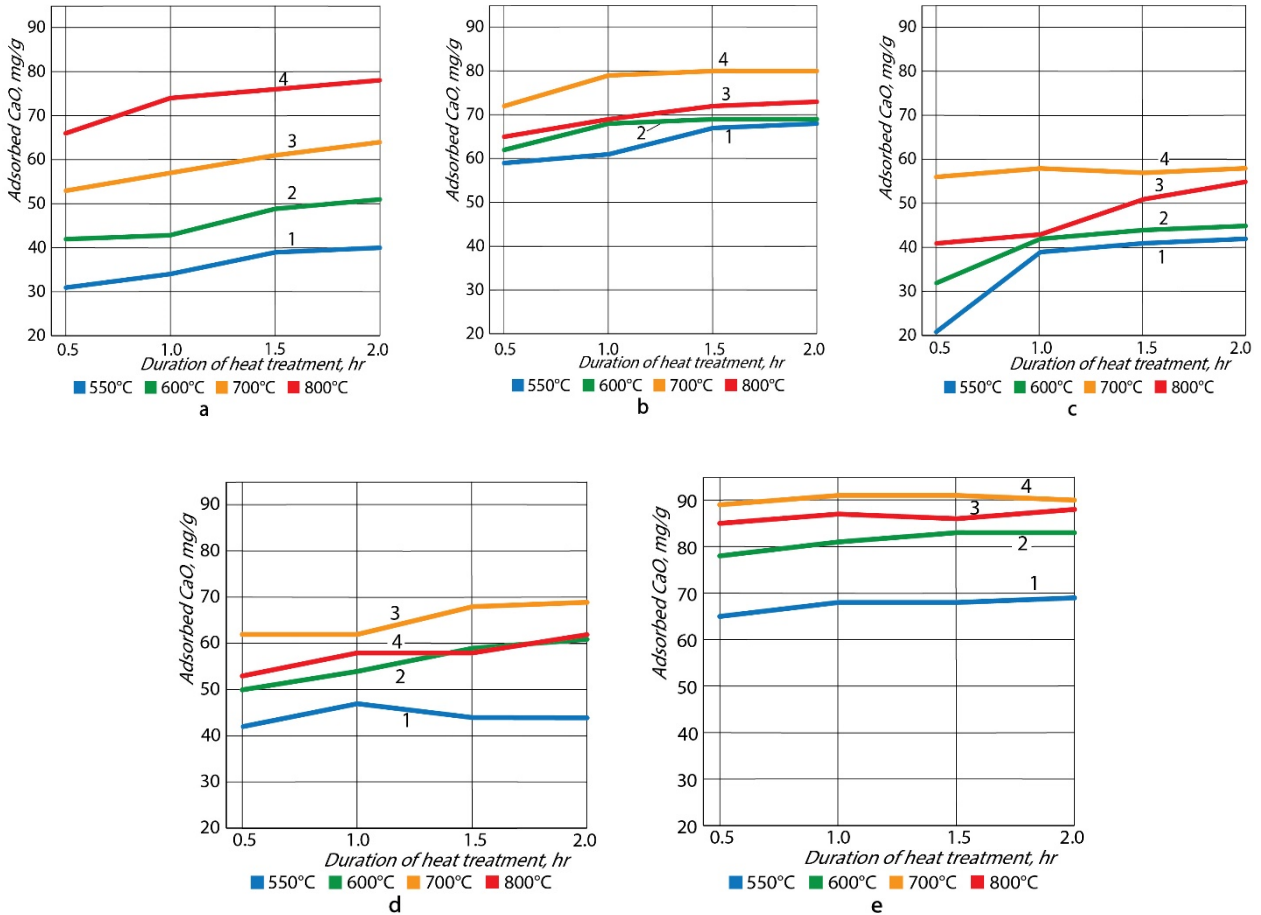
**№1** - ა) გახურება 20-დან 600°C-მდე, 2 სთ; ბ) დაყოვნება 600°C-ზე, 1 სთ; გ) ბუნებრივი გაცივება.

**№2** - ა) გახურება 20-დან 700°C-მდე, 2 სთ; ბ) დაყოვნება 700°C-ზე, 1,1 სთ; გ) ბუნებრივი გაცივება.

**№3** - ა) გახურება 20-დან 700°C-მდე, 2 სთ; ბ) დაყოვნება 800°C-ზე 1,2 სთ; გ) ბუნებრივი გაცივება.

თერმულად დამუშავებული თიხოვანი ქანების პუცოლანური აქტიურობა განისაზღვრა GOST R 56592-2015 (Mineral admixtures for concretes and mortars. General specifications) მიხედვით, რაც ნაჯერი ხსნარიდან შთანთქმული კირის რაოდენობით გამოითვლება. ჩატარებული კვლევების მიხედვით (სურ. 3) დადგინდა, რომ ყველა საკვლევი თიხოვანი ქანი სხვადასხვა პუცოლანური აქტიურობით ხასიათდება, თერმოდამუშავების ტემპერატურის მიხედვით. სტანდარტის მიხედვით, დანამატი ითვლება მაღალი პუცოლანური აქტიურობის მქონედ, თუ მის მიერ ნაჯერი ხსნარიდან შთანთქმული კირის – CaO რაოდენობა მეტია 70 მგ/გ-ზე, საშუალო პუცოლანური აქტიურობის მქონედ – 30 მგ/გ-დან 70 მგ/გ-მდე და დაბალი პუცოლანური აქტიურობის მქონედ – 30 მგ/გ-ზე ნაკლები.

მე-3 სურ-ზე წარმოდგენილია ნაჯერი ხსნარიდან CaO-ს შთანთქმის კინეტიკა მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების მიერ.



**სურ. 3. ნაჯერი ხსნარიდან CaO-ს შთანთქმის კინეტიკა თიხოვანი ქანების მიერ: a – თიხაფიქალი, b – არგილიტი, c – თიხა (მეტეხი), d – თიხა (მირიანი), e – თიხა (გარდაბანი)**

გარდაბნის თიხამ (e) CaO-ის ყველაზე მაღალი შთანთქმის უნარი გამოავლინა ცდების ყველა ეტაპზე. 700°C-ზე დამუშავებული გარდაბნის თიხის მიერ შთანთქმული CaO-ს რაოდენობამ 90 მგ/გ-ზე გადააჭარბა, რაც მის მაღალ პუცოლანურ აქტიურობაზე მიუთითებს (სურ. 3).

თერმულად დამუშავებული თიხოვანი ქანების რეაქციის უნარი კირის მიმართ განპირობებულია იმით, რომ 600–800°C-ზე თიხოვანი ქანების ძირითადი კომპონენტი – კაოლინიტი ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) გაუწყლოებას განიცდის, მისი კრისტალური მესერი იშლება და წარმოიქმნება კაოლინიტის ანჰიდრიდი – მეტაკაოლინი ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), ამორფული მაღალაქტიური ნაერთი.

ცემენტის კომპოზიციებში მეტაკაოლინის დამატება ხელს უწყობს ახალი ჰიდრატული ფაზების წარმოქმნას. აქტიური კაჟმიწა რეაგირებს კირთან და წარმოქმნის კალციუმის ჰიდროსილიკატებს, აქტიური თიხამიწა კი – კალციუმის ჰიდროალუმინატებს და ჰიდრომოწებს.  $Ca^{2+}$  და  $Al^{3+}$  იონების და მეტაკაოლინის ამორფულ კაჟმიწასთან ურთიერთქმედების შედეგად ახალი ნაერთები წარმოიქმნება, მათ შორის მაღალი სიმტკიცის მქონე მინერალი სტრატლინგიტი -  $C_2ASH_8$  [15].

ცემენტების მექანიკური აქტიურობა განისაზღვრა მცირე (20x20x20 მმ) ზომის ნიმუშებზე.

ცემენტები მზადდებოდა სხვადასხვა ტემპერატურაზე თერმულად მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების და სხვადასხვა რაოდენობის დანა-

მატებით. მუდმივი რჩებოდა დანამატის თერმული დამუშავების ხანგრძლივობა მაქსიმალურ ტემპერატურაზე – 1 სთ. სულ დაყალიბდა 15 საცდელი ცემენტი.

დამზადდა შემდეგი შედგენილობის ცემენტები:

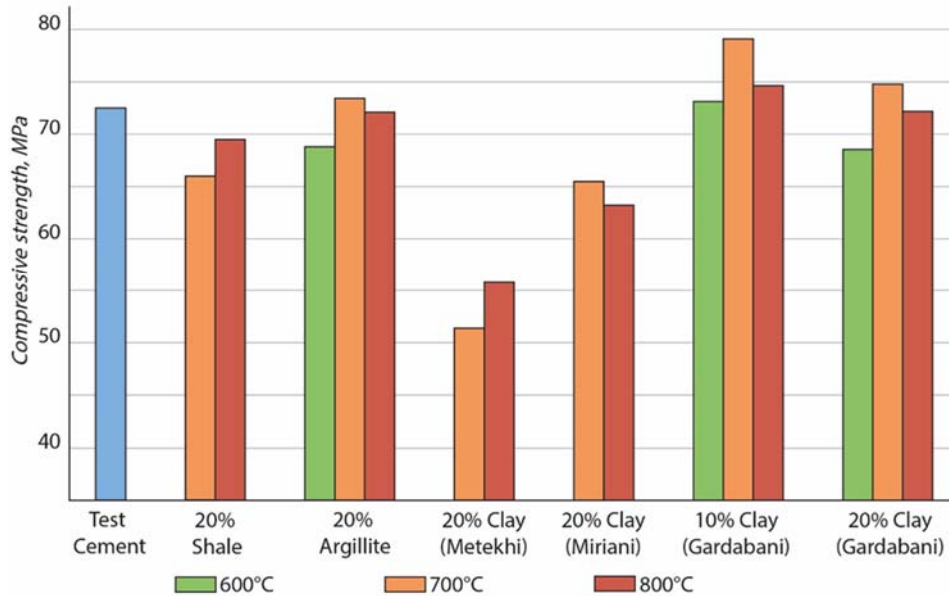
10 ც ცემენტი – 20% თიხაფიქლის, 20% არგილიტის და 20% თიხების დანამატი, 700 და 800°C-ზე მოდიფიცირებული;

2 ც ცემენტი – 20% არგილიტის და 20% გარდაბნის თიხის დანამატი, 600°C-ზე მოდიფიცირებული;

3 ც ცემენტი – 10% გარდაბნის თიხის დანამატი, 600, 700 და 800°C-ზე მოდიფიცირებული;

1 ც ცემენტი – საკონტროლო დამზადდა შესაძარებლად დანამატის გარეშე.

სიმტკიცის ყველაზე მაღალი შედეგი (სურ. 4) აჩვენა 700°C-ზე მოდიფიცირებული გარდაბნის თიხისა (10% და 20%) და არგილიტის (20%) დამატებამ. 800°C-მდე ტემპერატურის მატებასთან ერთად ცემენტების სიმტკიცე კლებულობს. თუმცა, თიხაფიქლის შემთხვევაში ცემენტების სიმტკიცე მატულობს 700°C-დან 800°C-მდე ტემპერატურის მატებასთან ერთად.



სურ. 4. ცემენტის ცომის კუბების (20x20x20 მმ) ჰიდრაულიკური აქტიურობა 28 დღე-ღამის გამყარების შემდეგ, დანამატის სხვადასხვა შემცველობით (%), სხვადასხვა ტემპერატურაზე გამომწვარი (°C) და 1 სთ დაყოვნებით

სავარაუდოდ, ცემენტის ჰიდრაულიკურ აქტიურობაზე მოქმედებს დანამატის მინერალოგიური შედგენილობა, მათი თერმული დამუშავებისას სტრუქტურული გარდაქმნების უნარი, რის შედეგადაც წარმოიქმნება აქტიური ნაერთები, რომლებიც ცემენტის მექანიკური სიმტკიცის მატებას უზრუნველყოფს.

ამრიგად, ჩატარებული კვლევების საფუძველზე გამოვლინდა პერსპექტიული ადგილობრივი თი-

ხოვანი ქანები, რომელნიც გარკვეული რეჟიმით თერმული დამუშავების – მოდიფიცირების შემდეგ შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ცემენტის მაღალ-აქტიური პუცოლანური დანამატის სახით, რაც განაპირობებს კლინკერის წილის მნიშვნელოვან შემცირებას ცემენტში, მისი მექანიკური სიმტკიცის გაუარესების გარეშე.

ასეთ ქანებად მიჩნეულია: მდ. დურუჯის თიხაფიქალი მოდიფიცირებული 800°C ტემპერატურ-

რაზე, თელეთის არგილიტი, მეტეხის, მირიანის და გარდაბნის ადგილმდებარეობის თიხები მოდიფიცირებული 700°C ტემპერატურაზე.

### 3. დასკვნა

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე გამოვლინდა პერსპექტიული ადგილობრივი თიხოვანი ქანები, რომლებიც გარკვეული რეჟიმით თერმული დამუშავების – მოდიფიცირების შემდეგ შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ცემენტის მაღალაქტიური პუცოლანური დანამატის სახით, რაც განაპირობებს კლინკერის წილის მნიშვნელოვან შემცირებას ცემენტში, მისი მექანიკური სიმტკიცის გაუარესების გარეშე. ასეთებად მიჩნეულია: მდ. დურუჯის თიხაფიქალი, მოდიფიცირებული 800°C ტემპერატურაზე, თელეთის არგილიტი, მეტეხის, მირიანისა და გარდაბნის თიხები, მოდიფიცირებული 700°C ტემპერატურაზე.

**მადლიერება:** მადლობა მინდა გადავუხადო მინერალური ნედლეულის კავკასიის ინსტიტუტის სილიკატებისა და სამშენებლო მასალების ტექნოლოგიის სამეცნიერო-კვლევითი განყოფილების ყველა თანამშრომელს, რომელთა ხელმძღვანელობით და დახმარებით შესრულდა მოცემული სამუშაო.

### ლიტერატურა

1. E. Shapakidze, R. Skhvitaridze, I. Gejadze, V. Maisuradze, M. Nadirashvili, E. Khuchua. Study of Alluvium Shales (Falling Rocks of Caucasian Ridge, Generated as a Result of Sill-Mudflows), as a Pozzolan Additive for Cement. Journal of Georgian Ceramists Association "Ceramics", №1(35), Tbilisi. 2016.
2. ე. შაფაქიძე, ვ. მაისურაძე, მ. ნადირაშვილი, ი. გეჯაძე, ე. ხუჭუა. ქვემო ქართლის იგნიმბრიტების პუცოლანური თვისებების კვლევა. თბილისი: „სამთო ჟურნალი“, №1(36), 2016, 108-112.
3. ე. შაფაქიძე, ლ. ქართველიშვილი, მ. ნადირაშვილი, ვ. მაისურაძე, ი. გეჯაძე, თ. პეტრიაშვილი. ტრაქიტის ბაქტერიული გამოტუტვის ნარჩენები – პუცოლანური დანამატი ცემენტის-

თვის. საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის მაცნე, ქიმიის სერია. ტ. 43, თბილისი, 2017, 258-262.

4. E. Shapakidze, I. Gejadze, M. Nadirashvili, V. Maisuradze, T. Petriashvili, A. Skhvitaridze. Using Clay Rocks of Georgia to Obtain High-Active Pozzolan Additives to Portland Cement. International Journal of Applied Engineering Research. Vol.14, No. 18, 2019, 3689-3695.
5. E. Shapakidze, R. Skhvitaridze, I. Kamushadze, L. Gabunia, I. Gejadze, T. Petriashvili. Modification of Clay Rocks for Obtaining a Highly Active Pozzolan Admixture. Book of Abstracts. The 6th International Conference “Nanotechnology” (GTU nano 2021). Book of Abstracts. Tbilisi, 2021, 100.
6. Dr. K. Srinivasu, M. L. N. Krishna Sai, Venkata Sairam Kumar N. A. Review on Use of Metakaolin in Cement Mortar and Concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 3, Issue 7, July, 2014.
7. Siddigye R., Klaus I, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete. Applied Clay Science. 2009. Vol. 43. No. 3-4. Pp. 392-400.
8. Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня. Инженерно-строительный журнал. 2015. №7, 66-73. DOI: 10.5862/MCE.59.7
9. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of Cements Materials, Present and Future. Cement and Concrete Research. 2011. №41. P. 651-665.
10. Ramachandran V.S. Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology. 2nd ed. William Andrew Publishing. – New York, 1999. – 964 p.
11. Rakhimov R. Z., Rakhimova N. R. Construction and mineral binders of past, present and future. Building Mater. 2013, 1, 124-128.
12. Коновалов В.М., Гликин Д.М., Соломатова С.С. Использование аргиллитов в производстве смешанных цементов // Современные проблемы науки и образования. № 2 (часть 2), 2015.

13. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R, Gaifullin A.R., Influence of the addition of dispersed fine poly-mineral calcined clays on the properties of Portland cement paste. *Advances in Cement Research*, V. 29 (1), 2017, 21-32.
14. Shapakidze E., Nadirashvili M., Maisuradze V., Gejadze I., Petriashvili T., Avaliani M., Todradze G. Elaboration of Optimal Mode for Heat Treatment of Shales For Obtaining Metakaolin. *Eur. Chem. Bull.* 2019, 8(1), 31-33. DOI: 10.17628/ecb.2019.8.31-33.
15. Краснобаева С.А., Медведева И.Н., Брыков А.С., Стафеева З.В. Свойства материалов на основе порландцемента с добавкой метакатолина МКЖЛ. *Цемент и его применение*. 2015, №1(2), 50-55.

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [გრანტის №AR-18-343].

UDC 666.952

## STUDY OF THE POZZOLANIC ACTIVITY OF THERMALLY MODIFIED CLAY ROCKS

T. Petriashvili

Ivane Javakhishvili Tbilisi State University. Caucasian Alexandre Tvalchrelidze Institute of Mineral Resources. Mindeli 11. 0186 Tbilisi. Georgia

E-mail: tamo.petriashvili.92@mail.ru

**Resume: Goal.** Obtaining a new highly active pozzolanic additive based on local raw materials.

**Method.** Heat treatment of clay rocks was carried out in a laboratory muffle furnace.

The X-ray phase analysis were carried out using a Dron-4.0 diffractometer (“Burevestnik”, St. Petersburg, Russia) with a Cu-anode and a Ni-filter. U=35kv. I=20mA. Intensity - 2 degrees / min.  $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$ .

For thermogravimetric analysis, a NETZSCH derivatograph with STA-2500 REGULUS thermogravimetric and differential thermal analyzer (TG / DTA) was used. Samples were heated to 1000 °C, in a ceramic crucible, heating rate 10 °C / min. Reference substance a-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Pozzolanic activity was determined according to the GOST R 56593 method.

**Results.** The optimal mode of heat treatment of clayrocks was established, which made it possible to increase their pozzolanic activity.

**Conclusion.** Based on the studies, local clay rocks were identified, which, after heat treatment - thermal modification according to a certain regime, can be used as a highly active pozzolanic additive to cement, which will reduce the proportion of clinker in cement without decline the mechanical strength of the latter. As such, we can consider: shale from the Durudzhi River modified at a temperature of 800 °C, mudstone from Teleti, clays from Metekhi, Miriani and Gardabani - modified at a temperature of 700 °C.

**Key words:** clay rock, pozzolanic activity, thermal modification.

This work was supported by the Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG) [grant №AR-18-343].

## უაკ 666.1/2

### ადვილდნობადი მინების სინთეზი ტექნოგენური ნედლეულის შემცველ კომპოზიციაში თ. ჭეიშვილი, ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი,  
საქართველო, 0160, თბილისი, კოსტავას 69

E-mail: t.cheishvili@gtu.ge

**რეზიუმე:** მიზანი. ორი სახის ტექნოგენური ნედლეულის „მინის ლეწი და ძვლის ნაცარი“ და ნატრიუმის მეტაბორატის შემცველ სამკომპონენტთან სისტემაში ადვილდნობადი მინების სინთეზის შესაძლებლობის და პირობების დადგენა.

**მეთოდი.** საკვლევი სისტემის კაზმის შემადგენელი კომპონენტების (მინის ლეწი, ძვლის ნაცარი და ნატრიუმის მეტაბორატის წარმომქმნელი ბორის მჟავა და კალციონირებული სოდა) მომზადება, აწონა, კაზმის შედგენა. მაღალტემპერატურული სინთეზით კაზმებიდან ნალღობების და მათგან ნიმუშების მიღება ყალიბებში ჩამოსხმით ან ფრიტირებით.

**შედეგი.** საკვლევ სამკომპონენტთან სისტემაში სამი სერიის განსხვავებული შედგენილობის კაზმების ხარშვის შედეგების შეფასების საფუძველზე დამუშავდა მინების ხარშვის რეჟიმი. დადგინდა სხვადასხვა შედგენილობის ნაღობის გასუფთავების ხარისხი და სახე, ხოლო საკვლევ სისტემის შესატყვის კონცენტრაციულ სამკუთხედში გამოიყო მახასიათებელი ტემპერატურული უბნები.

**დასკვნა.** დადგინდა, რომ შესწავლილი სამკომპონენტთან სისტემის შედგენილობათა უნარს, ერთგვაროვანი ნალღობი და გასუფთავებული ერთგვაროვანი მინა, განსაზღვრავს კაზმში წარმოდგენილ ინგრედიენტთა შემცველობა და სინთეზის ტემპერატურა. შედგენილობებში მინის ლეწის მაღალი კონცენტრაციები განაპირობებს ბლანტი ნალღობების წარმოქმნას, როდესაც ძვლის ნაცრის შემცველობის ზრდა (20 და 30 მას. %) იწვევს სხვადასხვა ხარისხით დაყუჩებული მინების მიღებას.

**საკვანძო სიტყვები:** მინის ლეწი; ძვლის ნაცარი; ნატრიუმის მეტაბორატი; კაზმი; ხარშვა; მინამასალა.

## 1. შესავალი

ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი თავისებურება, რომელიც ადვილდნობად მინებს ახასიათებს, არის გარბილების ტემპერატურა (600°C-ზე ნაკლები), რაც მათი შედგენილობის შერჩევით მიიღწევა. დღეისათვის ცნობილია მრავალი შედგენილობის მინა, რომელიც ადვილდნობადია, მაგრამ, როგორც წესი, დიდი რაოდენობით შეიცავს ტყვიის ან ბარიუმის ოქსიდებს, სტიბიუმის, ბისმუტის და სხვა არასასურველ ლითონთა ოქსიდურ ნაერთს. ამავე დროს, არსებული მინები ხასიათდება შესუსტებული ფიზიკურ-მექანიკური მაჩვენებლებით [1 – 3].

ადვილდნობადი მინებისა და მინამასალების (მინანქრები, შესარჩილი მასალები და სხვა) არასრულყოფილება და სიძვირე მოთხოვნადს ხდის გაუმჯობესებული შედგენილობის და სტაბილური (სასურველი) თვისებების მატარებელ, ამავე დროს ეკონომიკურად მისაღებ და მიზნობრივად გამოყენებად მინამასალების მიღებას. ლიტერატურაში არსებული მონაცემებისა და წინასწარი შედარებითი ანალიზის საფუძველზე, მიზნად დავისახეთ ადვილდნობადი მინებისა და მინანქრების მიღება, შემდგომ მათი მეშვეობით მინის ზედაპირის დაფარვა და ადვილდნობადი ლითონების (მაგ., ალუმინი და მისი შენადნობები) მხატვრული დეკორირება. წარმოდგენილი მიზნის განსახორციელებლად, ახალი შედგენილობის მინების/საფარების მიღება დაიგეგმა სამკომპონენტთან სისტემაში: მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი – ნატრიუმის

მეტაბორატი. კვლევის ობიექტად შეირჩა შედგენილობები, რომლებიც სამკომპონენტური სისტემის – მინის ლეწის (ერთადერთი საწყისი ამორფული ნედლეული) და ძირითადი მალდობლის ( $NaBO_2$ ) მაღალ კონცენტრაციითა უბანშია განლაგებული.

ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარებამდე მინის ლეწის, ძვლის ნაცრისა და ნატრიუმის მეტაბორატის ურთიერთჩანაცვლებით მიღებულ შედგენილობებში განისაზღვრა ოქსიდების შემცველობა და შესატყვისობა დადგინდა ცნობილ ადვილდნობად მინა/მინანქრებთან. ახალი კომპოზიციის შედგენილობათა პერსპექტიულობის განსაზღვრისათვის განხორციელდა მათი ადვილდნობადობის შეფასება ცნობილი კრიტერიუმის (P) დადგენით და თბური გაფართოების წრფივი კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) ადიტიურობის მეთოდით [4, 5]. ჩატარებული წინასწარი შეფასების საფუძველზე გაკეთდა დასკვნა, რომ საკვლევი შედგენილობები ძირითადად შეესატყვისება ადვილდნობადი მინამასალების შედგენილობას. მათ ასევე უნდა ახასიათებდეს ადვილდნობადობა ( $P < 3$ ) და  $\alpha = 110-150 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  მნიშვნელობები [6]. მაგრამ, ძირითად კითხვაზე, შესაძლებელია თუ არა შერჩეულ სამკომპონენტური სისტემაში მინების სინთეზი და რამდენად ადვილდნობადია ისინი, პასუხი უნდა გაეცა ექსპერიმენტული ხასიათის კვლევას – შესაბამისი შედგენილობის კაზმების ხარშვას და მიღებული ნაღობის (მათგან კი ნიმუშების) მიზნობრივ შეფასებას.

## 2. ძირითადი ნაწილი

საკვლევად აღებულ სამკომპონენტურ „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი –  $NaBO_2$ “ კომპოზიციაში კაზმების მისაღებად გამოყენებულია ორი სახეობის ტექნოგენური ნედლეული: დაფქული მინის ლეწი (ამორფული შემადგენელი) და ძვლის ნაცარი (კრისტალური აღნაგობის მასალა). მესამე კომპონენტის –  $NaBO_2$ -ის მინაში შესაყვანად ორი მასალაა აღებული: კალციირებული სოდა და ბორის მჟავა, რომელთა ურთიერთქმედებით ( $Na_2CO_3 + 2H_3BO_3 \rightarrow 2NaBO_2 + 3H_2O + CO_2$ ) მიიღება ნატრიუმის მეტაბორატი – საკვლევი სისტემის ძირითადი მდნობელი ინგრედიენტი.

საკვლევი კომპოზიციების კონცენტრაციითა სამკუთხედში გამოიყო სამი სერიის (D, E და F) შედგენილობები. ცალკეულ სერიებში უცვლელი რჩებოდა ძვლის ნაცრის შემცველობა, ხოლო ურთიერთჩანაცვლებადი ინგრედიენტები იყო მინის ლეწი და  $NaBO_2$ . სამივე სერიის 21 შედგენილობის კაზმების მატერიალური ბალანსი წარმოდგენილია 1-ელ ცხრილში.

შესაბამისი შედგენილობის კაზმებიდან ნაღობების მიღების სქემა-გრაფიკი მოყვანილია 1-ელ სურათზე. აღსანიშნავია, რომ ხარშვის რეჟიმი ითვალისწინებდა სახარშავ ქოთანში კაზმის 2-ჯერად დამატებას. ლღობის ტემპერატურა უზრუნველყოფდა ერთგვაროვანი/ჰომოგენიზებული (ბუშტების და მყარი ჩანართების გარეშე) ნაღობის მიღებას. კაზმების ძირითადი ნაწილის ლღობა  $1100^\circ\text{C}$ -ს არ აღემატებოდა. მაგრამ, ზოგიერთი შედგენილობის კაზმებიდან (მინის ლეწის და ძვლის ნაცრის ჯამური შემცველობა 70 მას.%-ზე მეტია) აღნიშნულ ტემპერატურებზე სინთეზირებული ნაღობები, როგორც წესი, ჰომოგენურ ნაღობს არ იძლევა და, შესაბამისად, ადვილდნობად შედგენილობად ვერ ჩაითვლება [7].

კაზმების თერმული დამუშავების (ხარშვის) შედეგები შეფასდა და გაანალიზდა. კერძოდ, საკვლევი სისტემის შედგენილობათა საკონცენტრაციო სამკუთხედში გამოიკვეთა შედგენილობათა ის უბნები, გარკვეულ ტემპერატურებზე წარმოიქმნება ერთგვაროვანი ნაღობი. ასეთი მიდგომით სამივე სერიის კაზმებიდან მიღებული ნაღობები სამ ტემპერატურულ უბანში განლაგდა (ნახ. 2). ეს უბნები და შედგენილობებია:

უბანი I –  $1100^\circ\text{C}$ -ზე წარმოიქმნება მოძრავი ერთგვაროვანი ნაღობი (შედგენილობები:

D – 4-დან D – 8 - მდე; E – 4-დან და E – 7-მდე; F – 5 და F – 6);

უბანი II –  $1200^\circ\text{C}$ -ზე წარმოიქმნება სუფთა და მოძრავი ნაღობები (შედგენილობები

D – 3; E – 3; F – 4);

უბანი III –  $1200^\circ\text{C}$ -ზე წარმოიქმნება ბლანტი და არაჰომოგენური ნაღობები (შედგენილობები

D – 1 და D – 2; E – 1 და

E – 2; F – 1-დან F – 3-მდე).



სხვადასხვა ტემპერატურაზე მიღებული ნაღ-  
ნობები, ქოთნიდან გადმოსხმისას (ნიმუშების ან  
ფრიტის სახით) განსხვავებული ფერის მინა-  
მასალის მიღებას უზრუნველყოფდა. კერძოდ, ნაღ-  
ნობებიდან მიიღება ოთხი სახის მასალა, რომლე-  
ბიც მე-2 სურათზე შესაბამისი პირობითი ნიშნები-  
თაა აღნიშნული:

○ – სუფთა ერთგვაროვანი გამჭვირვალე  
(უფერო) მინები;

Δ – ერთგვაროვანი სუსტად დახშული (რძის-  
ფერი) მინები;

□ - ძლიერად დაყუჩებული (თეთრი ფერი)  
მინები;

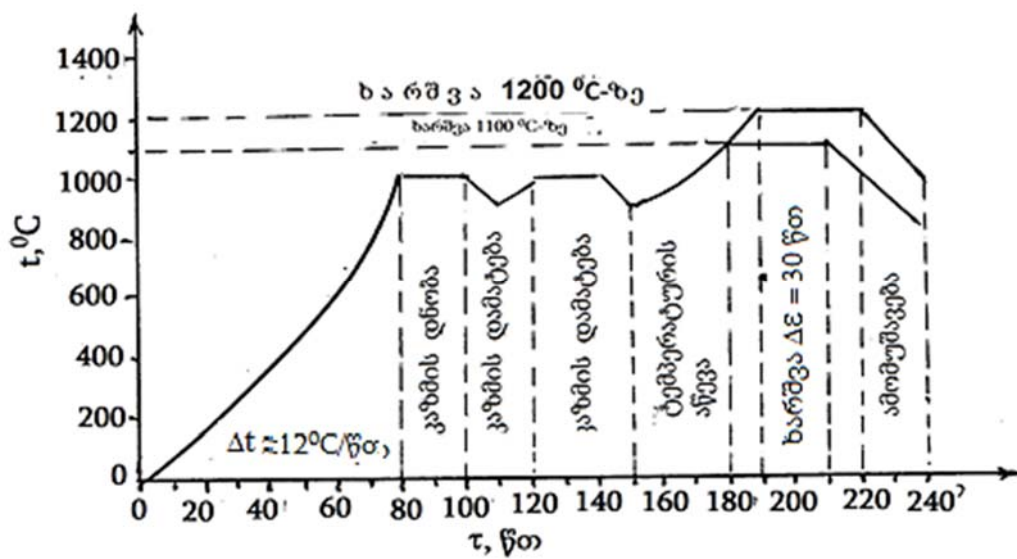
● – მოცულობაში არაერთგვაროვანი/ჩანარ-  
თებიანი მინები.

მთლიანობაში: D სერიის მინები გამჭვირვალეა,  
E სერიის მინები თეთრად ოპალესცენციურებს  
(რძისფერი), ხოლო F სერიის მინები მოცულობაში  
დახშულია (თეთრი ფერი), მაგრამ არ შეიცავს  
კრისტალურ ტლანქ ჩანართებს.

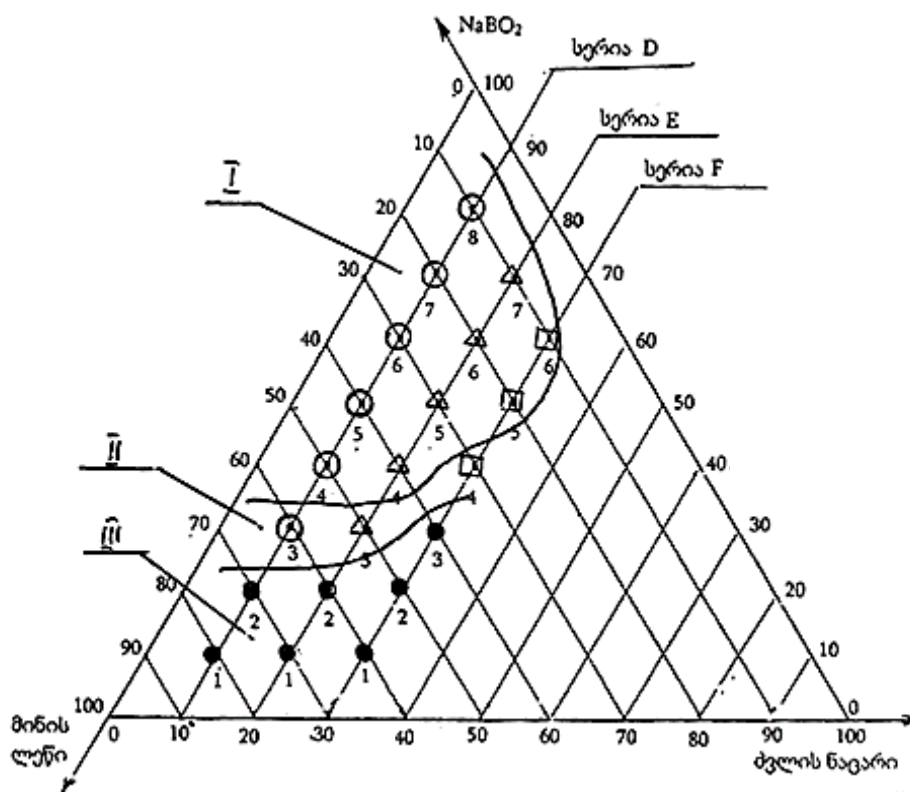
ცხრილი 1

საკვლევი D, E და F სერიის  
კომპოზიციათა კაზმების შედგენილობა

სერია	შედგენილობის ინდექსი	კაზმის მასალები, წ.ნ./100 წ.ნ. მასალაზე				
		მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	ბორის მჟავა	სოდა კალც.	ჯამი
D	D - 1	80,0	10,2	9,6	8,2	108,0
	D - 2	70,0	10,2	19,2	16,4	115,8
	D - 3	60,0	10,2	28,2	24,6	123,0
	D - 4	50,0	10,2	38,4	32,8	131,4
	D - 5	40,0	10,2	48,0	41,0	139,2
	D - 6	30,0	10,2	57,6	49,2	147,0
	D - 7	20,0	10,2	67,2	57,4	154,8
	D - 8	10,0	10,2	76,8	65,6	142,4
E	E - 1	70,0	20,4	9,6	8,2	105,2
	E - 2	60,0	20,4	19,2	16,4	116,2
	E - 3	50,0	20,4	28,2	24,6	123,2
	E - 4	40,0	20,4	38,4	32,8	131,6
	E - 5	30,0	20,4	48,0	41,0	139,4
	E - 6	20,0	20,4	57,6	49,2	147,2
	E - 7	10,0	20,4	67,2	57,4	155,0
F	F - 1	60,0	30,6	9,6	8,2	108,4
	F - 2	50,0	30,6	19,2	16,4	116,2
	F - 3	40,0	30,6	28,2	24,6	123,4
	F - 4	30,0	30,6	38,4	32,8	131,8
	F - 5	20,0	30,6	48,0	41,0	139,6
	F - 6	10,0	30,6	57,6	49,2	147,4



სურ. 1. საკვლევი შედგენილობის კაზმებიდან მინის ნადნობის მიღება-ამომუშავების ლაბორატორიული ტექნოლოგიური სქემა-გრაფიკი



სურ. 2. მინის წარმოქმნა „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი – ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემაში

საკვლევ „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი – ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემაში მინის წარმოქმნაზე საწყისი მასალების შემცველობის გავლენის დასადგენად გამოითვალა სამივე სერიის შედგენილობებში შემავალ ინგრედიენტთა თანაფარდობა: მინის ლეწი/ $NaBO_2$ , ძვლის ნაცარი/ $NaBO_2$ ,

მინის ლეწი/ძვლის ნაცარი და მინის ლეწის და ძვლის ნაცრის ჯამობრივი შემცველობის თანაფარდობა  $NaBO_2$ -თან. აღნიშნული თანაფარდობები და შესაბამისი სამკომპონენტო კაზმებიდან ერთგვაროვანი ნადნობების მიღების ტემპერატურები წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში.

ცხრილი 2

**საკვლევ კომპოზიციათა შედგენილობებში შემავალ კომპონენტებს შორის არსებული თანაფარდობა**

შედგენილობის ინდესი	კაზმის კომპონენტთა თანაფარდობათა მნიშვნელობა*				ჰომოგენური ნადნობის მიღების ტემპერატურა, °C
	მ.ლ./ნ.ბ.	ძვ.ნ./ნ.ბ.	მ.ლ./ძვ.ნ.	(მ.ლ.+ძ.ნ)/ნ.ბ.	
D - 1	8,00	1,00	8,00	9,00	>1200
D - 2	3,50	0,50	7,00	4,00	>1200
D - 3	2,00	0,33	6,00	2,33	1150
D - 4	1,25	0,25	5,00	1,50	1100
D - 5	0,80	0,20	4,00	1,00	1100
D - 6	0,50	0,17	3,00	0,67	1100
D - 7	0,29	0,14	2,00	0,43	1100
D - 8	0,13	0,13	1,00	0,25	2100
E - 1	7,00	2,00	3,50	9,00	>1200
E - 2	3,00	1,00	3,00	4,00	>1200
E - 3	1,67	0,66	2,50	2,33	1150
E - 4	1,50	0,50	2,00	1,50	1100
E - 5	0,60	0,40	1,50	1,00	1100
E - 6	0,33	0,33	1,00	0,67	1100
E - 7	0,14	0,29	0,50	0,43	1100
F - 1	6,00	3,00	2,00	9,00	>1200
F - 2	2,5	1,50	1,67	4,00	>1200
F - 3	1,33	1,00	1,33	2,33	1150
F - 4	0,75	0,75	1,00	1,50	1100
F - 5	0,40	0,60	0,67	1,00	1100
F - 6	0,17	0,50	0,33	0,67	1100

\* შენიშვნა: მ.ლ. - მინის ლეწი, ძვ. ნ - ძვლის ნაცარი, ნ.ბ. - ნატრიუმის მეტაბორატი

საკონცენტრაციო სამკუთხედში წარმოდგენილ შედგენილობებში, საწყის კომპონენტთა ფართო ზღვრებში, ზრდა ფიქსირდება ცალკეული სერიების მიხედვით. როდესაც ძვლის ნაცრის შემცველობა მუდმივია და მინის ლეწის ჩანაცვლება ხდება ნატრიუმის მეტაბორატით, აღნიშნული ცვლილებები მკაფიოდ აისახება „მინის ლეწი / $NaBO_2$ ” თანაფარდობის მნიშვნელობებზე, რომლებიც D სერიის შედგენილობებში – 0,13-დან 8,0-მდე, E სერიის შედგენილობებში – 0,14-დან 7,0-მდე, ხოლო F სერიის შედგენილობებში – 0,17-დან 6-მდე იცვლება. ამ თანაფარდობის მნიშვნელობათა და ნაღობების მიღების ტემპერატურათა შეჯერებით შეიძლება გაკეთდეს ადვილდნობადი ნაღობების ( $t=1100-1150^{\circ}C$ ) მიღების წინაპირობა: სამივე სერიაში ადვილდნობადი მინები მიიღება „მინის ლეწი / $NaBO_2$ ” თანაფარდობის 2-ზე ნაკლები მნიშვნელობისათვის. იგივე ხასიათის ცვლილება ფიქსირდება მინის ლეწის და ძვლის ნაცრის (შესაბამისად, ამორფული ძნელად ჰომოგენიზებადი და კრისტალური მაღალტემპერატურამდეგი მასალა) ჯამობრივი (მ.ლ. + ძვ.ნ.) და ძირითადი მდნობელის ( $NaBO_2$ ) შემცველობის თანაფარდობიდან. ამ შემთხვევაში ადვილდნობადი ნაღობების მიღებას შეესატყვისება თანაფარდობის სიდიდის 1,5-ზე დაბალი მნიშვნელობები. ბოლო თანაფარდობის მნიშვნელობას განსაზღვრავს ის გარემოება, რომ ხარშვის შედეგების ანალიზში ჩართულია საკვლევ შედგენილობებში წარმოდგენილი სამივე კომპონენტი.

### 3. დასკვნა

დადგინდა, რომ „მინის ლეწი – ძვლის ნაცარი – ნატრიუმის მეტაბორატი“ სამკომპონენტიან სისტემაში შესაძლებელია ადვილდნობადი მინების მიღება, რომელთა ხარშვის ტემპერატურა  $1100^{\circ}C$ -ს არ აღემატება. ადვილდნობადია შედგენილობები, რომლებიც 30 მას.% და მეტი რაოდენობით შეიცავს ნატრიუმის მეტაბორატს, ხოლო მინის ლეწის რაოდენობა 10–60 მას.% ზღვრებშია. ძვლის ნაცრის

შემცველობა განაპირობებს ნაღობების გადაცივებით მიღებული მინამასალის გარე სახეს. კერძოდ, 10 მას.% ძვლის ნაცრის შემცველი მინამასალები გამჭვირვალეა, მაგრამ 20 და 30 მას.% ძვლის ნაცრის შედგენილობებში შეყვანა განაპირობებს, შესაბამისად, სუსტად (ოპალესცენციური) და მოცულობაში დახშული (თეთრი) მინამასალის წარმოქმნას. საკვლევად აღებულ სისტემაში ადვილდნობადი მინის წარმოქმნის შესაძლებლობის შესაფასებლად გამოთვლილ იქნა სისტემის საკვლევი უბნის შედგენილობებში წარმოდგენილ ინგრედიენტებს შორის თანაფარდობა და დადგინდა, რომ მინის წარმოქმნის შესაძლებლობის (პერსპექტივაში „შედგენილობა-თვისება“ დამოკიდებულების) ოპტიმალური შეფასება შეიძლება განხორციელდეს „მინის ლეწი/ $NaBO_2$  და (მინის ლეწი + ძვლის ნაცარი)/ $NaBO_2$  თანაფარდობის მნიშვნელობათა გამოყენებით.

### ლიტერატურა

1. Царева Е.В., Пирогова М.Ф., Спиридонов Ю.А. Глушечные и опаловые эмали по благородным металлам. Стекло и керамика. 2001, №11 с. 29-30.
2. Технология эмали и защитных покрытий. Под ред. Брагина Л. Л. Харьков, Изд. ХПИ, 2003.
3. Ящишин И.Н., Бабаджанова О.Ф., Васийчук В.А. Легкоплавкие покрытия для декорирования стекла. Стекло и керамика. 2001, №8. с. 24-26.
4. Матвеев М.А., Матвеев Г.А., Френкель Б.Н. Расчеты по химии и технологии стекла. Справочник-пособие. М., Стройиздат, 1972.
5. Аппен А.А. Химия стекла. Л., Химия, 1974.
6. ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე, თ. ჭეიშვილი. სამრეწველო ნარჩენების საფუძველზე ადვილდნობადი მინანქრების მიღების შესაძლებლობის შეფასება. კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები, ტ. 23, 2021, №1(45), გვ. 3-9.
7. Павлушкин Н.М., Журавлев А.К. Легкоплавкие стекла. М., Энергия, 1970.

UDC 666.1/2

## LOW-FUSIBLE GLASS SYNTHESIS IN THE COMPOSITION, CONTAINING TECHNOGENIC RAW MATERIAL

T. Cheishvili, K. Baakashvili-Kiknadze

Georgian Technical University, Department of Chemical and Biological Technologies. 69, Kostava Str., Tbilisi, 0160, Georgia

E-mail: t.cheishvili@gtu.ge

**Resume:** *Goal.* Establishment of opportunity and conditions of low-fusible glass synthesis in the three-component system containing two kinds of technogenic raw materials: “crushed glass” and “bone ash”, and sodium metaborate.

*Method.* Preparation, weighing of components (crushed glass, bone ash and sodium metaborate which is generated from boric acid and soda ash), batch (furnace charge) preparation. Getting of fluxes from a burden via high-temperature synthesis, and their samples through casting into molds or fritting.

*Result.* Based on appraisal of results of three series different composition furnace charges melting in the three-component system under study the glass melting schedule has been elaborated. Purification degree and external view of fluxes of different composition has been established, while characteristic temperature section has been singled out in concentration triangle appropriate to the system under study.

*Conclusion.* It has been established that the ability of investigated three-component system compositions to form homogenous flux and purified homogenous glass is determined by composition of ingredients presented in the furnace charge and by synthesis temperature. High concentrations of crushed glass in the compositions stipulate formation of viscous fluxes, while increase in bone ash composition (20 and 30 mass %) causes receipt of opacified glasses of different degrees.

**Key words:** crushed glass; bone ash; sodium metaborate; furnace charge; melting; glass materials.

---

# შ ი ნ ა ა რ ს ი

<b>ი. ახვლედიანი, ნ. პაპუნაშვილი, რ. გოლიაძე, მ. ბალახაშვილი.</b> ბორის გავლენა Bi-Sr-Ca-Cu-O სისტემაში ზეგამტარი ფაზების ფორმირებაზე ტყვიით სტაბილიზაციის გარეშე .....	3
<b>ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე.</b> ტექნოგენური მასალების საფუძველზე მიღებული ადვილდნობადი მინების მახასიათებელი თვისებების დადგენა .....	9
<b>ზ. კოვზირიძე, ნ. ნიჟარაძე, გ. ტაბატაძე, ნ. დარახველიძე, ზ. მესტვირიშვილი, ნ. ჯალაღონია, ნ. ჯალაბაძე, მ. ბალახაშვილი.</b> მაღალტემპერატურული კომპოზიტის მიღება და კვლევა SiC-SiAlON-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> სისტემაში .....	15
<b>თ. ნასუაშვილი.</b> სახარე ტბის ფსკერზე დალექილ და ტბის ზედაპირზე ბუნებრივად გამოკრისტალებულ მარილებში ნატრიუმის სულფატის შემცველობის შესწავლა .....	48
<b>თ. პეტრიაშვილი.</b> თერმულად მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების პუცოლანური აქტიურობის კვლევა .....	55
<b>თ. ჭეიშვილი, ქ. ბაკაშვილი-კიკნაძე.</b> ადვილდნობადი მინების სინთეზი ტექნოგენური ნედლეულის შემცველ კომპოზიციაში .....	63

# CONTENTS

<b>I. Akhvlediani, N. Papunashvili, R. Goliadze, M. Balakhashvili.</b> INFLUENCE OF BORON ON FORMATION OF SUPERCONDUCTING PHASES IN Bi-Sr-Ca-Cu-O SYSTEM WITHOUT Pb STABILIZATION .....	3
<b>K. Baakashvili-Kiknadze.</b> DETERMINATION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES OF LOW-MELTING GLASSES OBTAINED ON THE BASIS OF TECHNOGENIC MATERIALS .....	9
<b>Z. Kovziridze, N. Nizharadze, G. Tabatadze, N. Darakhvelidze, Z. Mestvirishvili, N. Jalaghonia, N. Jalabadze, M. Balakhashvili.</b> PREPARATION AND RESEARCH OF A HIGH-TEMPERATURE COMPOSITE IN THE SiC-SiAlON-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SYSTEM .....	15
<b>T. Nasuashvili.</b> STUDY OF SODIUM SULFATE CONTENT IN SALTS DEPOSITED ON THE BOTTOM OF THE GOSPEL LAKE AND NATURALLY CRYSTALLIZED ON THE LAKE SURFACE .....	48
<b>T. Petriashvili.</b> STUDY OF THE POZZOLANIC ACTIVITY OF THERMALLY MODIFIED CLAY ROCKS .....	55
<b>T. Cheishvili, K. Baakashvili-Kiknadze.</b> LOW-FUSIBLE GLASS SYNTHESIS IN THE COMPOSITION, CONTAINING TECHNOGENIC RAW MATERIAL .....	63

kompiuterul i uzrunvel yofa x. ungi aZi s  
redaqtori m. kal andaZe

## saqarTvel os keramikosTa asociacia 2007 wl idan gawevrianda keramikosTa msfli o federaciaSi

## saqarTvel os keramikosTa asociacia 2002 wl idan evropis keramikosTa asociaciis wevria

saqarTvel os keramikosTa asociacia daarsda 1998 wel s  
Jurnal i daarsda 1998 wel s

Jurnal Si statiebi ibeWdeba qarTul , ingl isur, germanul da rusul enebze

*gamoqveynebul i masal is avtorebi pasuxismgebel ni arian moyvanil i faqtebis, ci-  
tatebis da sxva monacemebis SerCevasa da sizusteze, aseve Ria publ ikaciaSi kanoniT  
akrZal ul i monacemis gaxmaurebaze.*

*redaqcias SeuZl ia gamoaqveynos masal ebi ise, rom ar iziarebdes avtoris Sexedu-  
l ebebs.*

*Авторы публикуемых материалов несут ответственность за подбор и точность приведенных  
фактов, цитат и других сведений, а также за неразглашение сведений, запрещенных  
законом к открытой публикации.*

*Редакция может публиковать материалы, не разделяя точку зрения автора.*

*Authors of the published materials are responsible for choice and accuracy of adduced facts,  
quotations and other information, also for not divulging information forbidden open publication.*

*Publishing material the editorial board may not share the views of the author.*

Tbilisi, `keramika~, Vol. 24. 1(47). 2022  
masal is gadabeWvdvisas Jurnal is miTiTeba aucil ebel ia  
ТБИЛИСИ, "КЕРАМИКА", Vol. 24. 1(47). 2022

При перепечатке ссылка на журнал обязательна

TBILISI,"CERAMICS", Vol. 24. 1(47). 2022

Reference of magazine is obligatory on reprinting

pirobiTi nabeWdi Tabaxi 4,5. tiraJi 50 egz., fasi saxel Sekrul ebo.

saqarTvel os keramikosTa asociacia, Tbilisi, kostavas 69, tel : 233-53-48, Sida 62-39,  
E-mail: kowsiri@gtu.ge, z. kovzirize

<http://www.ceramics.gtu.ge>

---

---