

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ქეთევან ბაკაშვილი-კიკნაძე

სამრეწველო ნარჩენების გამოყენებით  
ადვილდნობადი მრავალფუნქციური  
მინამასალების მიღება და თვისებების შესწავლა

სადოქტორო პროგრამა „ქიმიური – და ბიოლოგიური ინჟინერია“  
შიფრი – 0711

დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი  
2022 წ

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის  
ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი თეიმურაზ ჭეიშვილი

რეცენზენტები: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

დაცვა შედგება 2022 წლის "-----" -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და  
მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის  
სხდომაზე,  
კორპუსი -----, აუდიტორია -----  
მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალობა:** ადვილდნობადი, კერძოდ გარბილების ტემპერატურის 600°C-ზე ნაკლები მნიშვნელობის მქონე მინებმა ფართო გამოყენება ჰპოვა ტექნიკური, სამშენებლო-არქიტექტურული და საყოფაცხოვრებო დანიშნულების დარგების არა ერთ სფეროში ასეთ მინებს გამოიყენებენ:

- ლითონების, მინების, კერამიკის, კრისტალების და სხვა მასალათა ურთიერთ შერწყმისას და სპეციალური კომპოზიტების მისაღებად;

- ადვილდნობადი ლითონების (მაგ., ალუმინი და მისი შენადნობები) ზედაპირის პასივაციაში და მხატვრული დამუშავებით ზედაპირის გაკეთილშობილებაში, მათი შემდგომი გამოყენებით ტექნიკის და არქიტექტურულ-სამშენებლოს მიმართულებით.

- მინის ნაწარმის მოხატვა-დეკორირებაში საყოფაცხოვრებო ჭურჭლის მოხატვა, მინის ქიმიური ჭურჭლის, შესაბამისი ფურცლოვანი მინის და მინისტარის ნაწარმის ეტიკეტირებისას, მხატვრულ-დეკორატიული საყოფაცხოვრებო და სამშენებლო-არქიტექტურული დანიშნულების ნაწარმის (მათ შორის ვიტრაჟების) მისაღებად და სხვ.

მიუხედავად გამოყენების მრავალმხრივობისაა, დღეისათვის არსებული ადვილდნობადი მინების არსებული სახეობა სრულყოფილი არ არის, რადგან მათი ტექნოლოგიური თვისებებით (გარბილება 600°C-ზე დაბლა, კარგი განდენადობა მინის, კერამიკის და ლითონის ზედაპირზე) გამორჩეული შედგენილობები, როგორც წესი, შეიცავენ ეკოლოგიურად მიუღებელ მძიმე ლითონებს (ძირითადად ტყვიის და ბარიუმის ოქსიდებს). ამავე დროს, სხვა შედგენილობის არსებული ე.წ. უტყვიო ადვილდნობადი მინამასალების (მინა და მინანქარი) ძირითადი სახეობანი გამოირჩევა შესუსტებული ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით.

მიუხედავად იმისა, რომ დღეისათვის კარგადაა ცნობილი სხვადასხვა

ფუძეზე (ბორატული, სილიკატური, ფოსფატური და სხვა). მიღებული და განსხვავებული ფუნქციური დანიშნულების მინამასალები, ახალი შედგენილობის და ადვილდნობადობით და თვისებების კომპლექსით გამორჩეული მინამასალების შექმნის მიმართულებით კვლევითი სამუშაოები აქტიურად მიმდინარეობს. ბოლო პერიოდში წარმართულ კვლევებში ძირითად მიმართულებად მიჩნეულია, გამოყენების სპეციფიკიდან გამომდინარე, სპეციალური თვისებების მქონე ადვილდნობადი მინების მიღება. ამ სფეროში არსებული მინამასალები მიიღება ტრადიციულ სანედლეულო ბაზაზე – ხშირად ძვირადღირებულ ქიმიურ ნაერთების (რეაქტივების) გამოყენებით. აღნიშნული, განსაკუთრებით ადვილდნობადი ფოსფატური ფუძის ან ფოსფორის ანჰიდრიდის შემცველი მინების შემთხვევაში, განსაკუთრებით აძვირებს კაზმს ( $P_2O_5$ -ის შეყვანა ძირითად ორთოფოსფორმჟავით ხდება) და ართულებს მინების მიღების ტექნოლოგიურ პროცესს ( $P_2O_5$ -ის მაღალი აქროლალობა  $H_3PO_4$ -დან). აქედან, სპეციფიკური თვისებების მატარებელი და ამავე დროს მიზნობრივად რამოდენიმე მიმართულებით გამოყენებადი ადვილდნობადი მინამასალების მიღება ახალ, ორი ტექნოგენური ნედლეულით წარმოდგენილ, სანედლეულო ბაზაზე აქტუალურ საკითხად შეიძლება იქნას მიჩნეული. საკითხის გადაწყვეტა ხელმისაწვდომს გახდის ეკოლოგიურობით და ტექნოლოგიურობით გამორჩეული ტექნოლოგიით ადვილდნობადი მასალების მიღებას.

**კვლევის მიზანი:** კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ტექნიკის, სამშენებლო-არქიტექტურულ და სხვადასხვა დარგებში პრაქტიკულად გამოყენებული ადვილდნობადი მინების მიღება ორი ისეთი ნარჩენის-ტექნოგენური ნედლეულის გამოყენებით, როგორცაა ბუნებით ამორფული მინის ლეწი და კრისტალური აღნაგობის კალციუმის ფოსფატების შემავალი ასევე კომპლექსური ნედლეულის - ძვლის ნაცარი. ასევე ორივე ტექნოგენური ნედლეულის და მალღობლის (შეირჩა ნატრიუმის მეტაბორატი) მონაწილეობით შედგენილ სამკომპონენტო სისტემაში „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატ-

რიუმის მეტაბორატი“ მინების სინთეზის პირობებისაგან განსაზღვრა, მიღებული მინების ადვილდნობადობის და მოთხოვნადი მახასიათებელი თვისებების შესწავლა-შეფასება, სამკომპონენტო სისტემაში საბაზო შედგენილობების შერჩევა და მათი შემდგომი კორექტირებით პრაქტიკულად გამოყენებადი საჭირო შედგენილობის მინების მიღება.

**კვლევის ობიექტი და მეთოდები.** კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა მრავალკომპონენტოანი ქიმიური შედგენილობის მინა, რომელიც ეფუძნება ძირითადად ხუთი, შემდეგი ოქსიდებიან შედგენილ სისტემას:  $Na_2O - CaO - B_2O_3 - SiO_2 - P_2O_5$ . აღნიშნულ ფსევდობუთკომპონენტოანი სისტემაში წარმოდგენილი რიგი ოქსიდები შეიყვანებოდა სრულად ( $CaO$ ,  $SiO_2$  და  $P_2O_5$ ) და ნაწილობრივ ( $Na_2O$ ) მინის ლეწით და ძვლის ნაცრით, ხოლო  $Na_2O$ -ს და  $B_2O_3$ -ის, როგორც დამატებითი ინგრედიენტების შეყვანის უზრუნველსაყოფად მესამე კომპონენტად აღებული იქნა. ხელოვნურად შედგენილი კომპოზიციით მიღებული, ნატრიუმის მეტაბორატი.

საკვლევი შედგენილობის მინები მიღებული იქნა კაზმებიდან, რომელშიც წარმოდგენილია (მას. %): 80-10 მინის ლეწი; 10-30 ძვლის ნაცარი; 10-80 ნატრიუმის მეტაბორიტი. მათი სინთეზის შედეგების საფუძველზე შეირჩა ადვილდნობადი შედგენილობის მინები, რომელთა  $1100 \pm 20^\circ C$ -ზე სინთეზს უზრუნველყოფდა 50 მას. % და მეტი  $NaBO_2$ -ს შემცველი კაზმები. მათი თვისებათა შესწავლით შეირჩა სამი საბაზო მინა, რომელთა მიღება შესაძლებელია 20-30 მას.% მინის ლეწი, 10-20 მას.% ძვლის ნაცარი და 50 მას.% ნატრიუმის მეტაბორატი შემცველი საკაზმე კომპოზიციიდან.

განხორციელდა სამკომპონენტოანი სისტემის საფუძველზე მიღებული საბაზო მინების თვისებათა კორექტირება, მათი შემდგომი მიზნობრივი ამოცანების გადასაწყვეტად: ალუმინის ზედაპირის დეკორირება- პასივაცია და მინის ნაწარმის (მათ შორის სავიტრაჟე ფურცლის) მოხატვა- დეკორირება. ამ მიზნით საბაზო მინების შედგენილობებში წარმოდგენილი ნატრიუმის მეტაბორატის ჩანაცვლება განხორციელდა ჩატარებული შესაბამისი შე-

ფასება-ანალიზის საფუძველზე შერჩეული ორი ნაერთით: თუთიის მეტაბორატი (DZ-სერია) და ნატრიუმის მეტაფოსფატით (EP-სერია). შესაბამისი ჩანაცვლებით მიღებული იქნა ფურცლოვანი მინის (DZ-სერიის საფუძველზე) და ალუმინის (EP-სერიის საფუძველზე), მიმართ გამოყენებული მინა-მასალები, რაც მათი მოთხოვნადი თვისებების მიზნობრივი შესწავლით განისაზღვრება.

სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოს შესასრულებლად გამოყენებული იქნა შემდეგი მეთოდები და ხელსაწყო დანადგარები:

- საკვლევ კაზმებში გამოყენებული ტექნოგენური ნედლეულის დამუშავება განხორციელდა ლაბორატორიულ სამსხვრევ-სანაყი და ფქვაკვი მოწყობილობა-დანადგარების გამოყენებით;

- კაზმის კომპონენტთა აწონვა და მათგან კაზმის მიღება ჩატარდა მექანიკური მხრეული სასწორით (აწონვის სიზუსტე  $\pm 0,1$  გ) გამოყენებით და ფაიფურის ფილაში შერევით;

- სამ- და ორკომპონენტებიან კაზმებიდან საკვლევ მიწების სინთეზი  $1000-1200^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურულ ინტერვალში ჩატარდა ტემპერატურის მზომ მარეგულირებელი სისტემით აღჭურვილ სილიტის გამახურებლიან ღუმელში. კაზმიდან მინის ნადნობის მიღებას უზრუნველყოფდა 25-100 მლ ტევადობის ფაიფურის უჭიქურო ქოთნები;

- მინების თერმული დამუშავება-ჩამოსხმით მიღებული ნიმუშების მოწვა და მინის ფხვნილების შეცხოვა, შელღობა და სხვ.)  $700^{\circ}\text{C}$ -მდე ტემპერატურულ ინტერვალში, ჩატარდა კამერულ ელექტროგამახურებლიან და თერმული რეგულატორით აღჭურვილ მუფელის ღუმელში;

- სხვადასხვა შედგენილობის მინების სიმკვრივე დადგინდა წყალში ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდით;

- საკვლევ მინა-მასალათა რიგი თვისებების (ქიმიური მდგრადობა, ფხვნილების ტემპერატურული ტრანსფორმაცია) დასადგენად საჭირო ფხვნილების მიღება და ფრაქციებად დაყოფა წარიმართა შემდეგი თანმიმდევ-

რობით: ლითონის სანაყში მსხვრევა → ფაიფურის ფილაში დაფქვა → საც-  
რითი ანალიზით ფრაქციებად დაყოფა;

- ქიმიური მდგრადობა განისაზღვრება წყალში ( $98 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ), დამუშა-  
ვებული (დაყოვნება 1 სთ). მინა-მასალის ფხვნილოვანი ულუფის წონით  
დანაკარგით (პროცენტი);

- მინების „დაგრძელება - ტემპერატურა“ დამოკიდებულების გრაფი-  
კი მიღებული იქნა DKB-4A ტიპის კვარცის დილატომეტრით, ხოლო დილა-  
ტომეტრიული მრუდიდან გრაფიკული მეთოდით აღებული იქნა გამინების  
( $T_g$ ), დეფორმაციის საწყისი ( $T_f$ ) ტემპერატურათა მნიშვნელობები და ასევე  
გაფართოების კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) გასათვლელი დაგრძელების ( $\Delta l$ ) მნიშვნე-  
ლობები  $\Delta t=20-400^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურული ინტერვალისათვის.

#### სამუშაოს სიახლე და ძირითადი შედეგები:

„მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ შედგენი-  
ლობის კომპოზიციაში მიღებულია ეკოლოგიურად უსაფრთხო შედგენი-  
ლობის და 11-12 წონ.%  $P_2O_5$ -ის შემცველი  $R_2O - RO - B_2O_3 - SiO_2 - P_2O_5$   
ფსევდოხუთკომპონენტის მინები. მათი ძირითადი ნაწილის სინთეზი ჩა-  
ტარდა  $1100 \pm 20^{\circ}\text{C}$  და მიღებული მინები ხასიათდება გარბილების საწყისი  
ტემპერატურის დაბალი ( $T_f < 600^{\circ}\text{C}$ ) მნიშვნელობებით, რაც ახასიათებს  
ადვილდნობად მინებს. აღნიშნული სისტემის საბაზო მინების მოთხოვნადი  
თვისებების (თბური გაფართოება და ქიმიური მდგრადობა) სასურველი მი-  
მართულებით კორექტირების მიზნით, განხორციელდა ორი ოთხკომპონე-  
ნტიანი შედგენილობის კომპოზიციათა მიღება: მოხდა ნატრიუმის მეტაბო-  
რატის ჩანაცვლება თუთიის მეტაბორატით ან ნატრიუმის მეტაფოსფატ-  
ით. შედგენილობათა ასეთი ტრანსფორმაციით მიღებულია ახალი შედგენი-  
ლობისა და სხვადასხვა ფუნქციური დანიშნულების ადვილდნობადი მი-  
ნამასალები.

სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს ორი სახეობის  
ტექნოგენური ნედლეულის (მინის ლეწის და ძვლის ნაცრის ჯამში 50%-ია-

ნი შემცველობით). საფუძველზე ტექნოლოგიურობით, ეკონომიკურობით და ეკოლოგიური თვალსაზრისით გამორჩეული ადვილდნობადი მინამასალების მიღებაში. დადგინდა, რომ ტექნოგენური ნედლეულის და ფუნქციონალურად მაღლობელი ნაერთების (ნატრიუმის მეტაბორატის შერწყმა თუთიის მეტაბორატთან ან ნატრიუმის მეტაფოსფატთან) საფუძველზე მიიღება მინები, რომელთა თვისებები (დნობის შესატყვისი ტემპერატურა, თბური გაფართოების კოეფიციენტი, ქიმიური მდგრადობა) შესაძლებელს გახდის მათ საფუძველზე მინის ნაწარმის დაფარვა-დეკორირებას და ალუმინის ნაწარმის ზედაპირის დეკორირება პასიფიკაციას.

**სამუშაოს აპრობაცია:** სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული იყო ორ საერთაშორისო კონფერენციაზე:

- K. Baakashvili-Kiknadze, T. Cheishvili. Receipt of vitreous materials of technical and decorative purposes based on manmade raw materials. International conference on global practice of multidisciplinary scientific global practice of multidisciplinary scientific studies. Dedicated to the 100<sup>th</sup> Anniversary of „GTu”. June 24-26.2022. Tbilisi, Georgia.

- ე. ბაკაშვილი-კიკნაძე, თ. ჭეიშვილი, გ. ლოლაძე. ახალი შედგენილობის სამშენებლო-დეკორატიული მასალები ბუნებრივი ქანების ნარჩენების და სხვა ტექნოგენური ნედლეულის საფუძველზე. მე-8 საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „სამთო საქმისა და გეოლოგიის განვითარება ეკონომიკის აღორძინების წინაპირობა“ Book of abstract, 2022P. 21-23.

**პუბლიკაციები:** სამუშაოს ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო ნაშრომში.

**სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა:** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შემდეგი ნაწილებისაგან: შესავალი, ლიტერატურის მიმოხილვა (3 ქვეთავი), შედეგები და მათი განსჯა (7 თავი) და წარმოდგენილია ნაბეჭდ



140 ფურცელზე. შეიცავს რეზიუმეს, 22 ნახაზს, 56 ცხრილს, დასკვნას, 104 ციტირებულ ლიტერატურას.

## 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

ლიტერატურის მიმოხილვაში წარმოდგენილია მასალა, რომელიც სრულად უკავშირდება ადვილდნობადი მინების დახასიათებას და მათი მიღების თაობაზე არსებულ იმ შეხედულებებს, რომელთა საფუძველს ნაერთთა (ძირითადად ოქსიდური) შედგენილობაში წარმოდგენილი კატიონების კრისტალოქიმიურ მახასიათებლებს უკავშირდება. მოყვანილია ადვილდნობადი მინების მიღების ზოგადი პირობები, დახასიათებულია ადვილდნობადი მინის შედგენილობაში წარმოდგენილი ძირითადი ოქსიდების (კატიონების) კლასიფიკაცია, რომელიც ეფუძვნება მათ როლზე და შესაძლებლობაზე წარმოქმნას თუ არ წარმოქმნას მინის ერთიანი სტრუქტურული ბადე. მოყვანილია ადვილდნობადი მინების სახეობათა კლასიფიკაცია მათი შედგენილობიდან გამომდინარე.

დახასიათებულია ადვილდნობადი სილიკატური ფუძის მინების ნაირსახეობა, მოყვანილია სამრეწველო დანიშნულების ზოგიერთი ფუძე და დამფარავი მინანქრების ქიმიური შედგენილობა, მათი დანიშნულება და გამოყენების სფეროები. ამ უკანასკნელთა მიმართებაში აღინიშნა ტყვიაშემცველი სილიკატური ფუძის მინანქრების ფართო გამოყენება საიუველირო ნაწარმის მინანქრების საქმეში.

განხილულია  $B_2O_3$ -ის გარდაქმნის და ბორატული მინების სტრუქტურული მოწყობის საკითხები, ბორის ანჰიდრიდის კოორდინაციული მდგომარეობა და მასზე ტუტე ლითონთა კატიონების გავლენა. წარმოდგენილია პრაქტიკაში გამოყენებული  $Na_2O - B_2O_3 - SiO_2$  სისტემაში მიღებული მინები (ვიკორი და პირექსი). მოყვანილია მასალა, რომლის თანახმად ტექნოლოგიურად გამოყენებადი ადვილდნობადი მინების მიღება შესაძლებე-

ლია  $Li_2O - PbO - B_2O_3$  და  $MgO(BaO) - PbO - B_2O_3$  სისტემებში. ნაჩვენებია, რომ მიზნობრივად გამოსაყენებელი ადვილდნობადი მინების მიღება შესაძლებელია ორკომპონენტთან  $PbO - B_2O_3$  სისტემაში მეასმე კომპონენტად  $SiO_2$ -ის შეტანისას და საბაზო მინების  $PbO - B_2O_3 - SiO_2$  სისტემაში მიღება იმ პირობიდან გამომდინარე, რომ ტყვიის ოქსიდის შემცველობა 30 წონ. %-ზე მეტია.

აღწერილია კიდევ ერთი კლასის, ასევე ადვილდნობადი მინების მისაღებად გამოსადეგი, ფოსფატური მინების მიღების ტექნოლოგიური სირთულეები, რაც უკავშირდება მინებში  $[PO_4]^{3-}$  სტრუქტურული დაჯგუფების არსებობას, რომელიც ძნელად შეერწყმის სხვა მინის წარმომქმნელ  $[SiO_4]^{4-}$  და  $[B_2O_3]^{3-}$  დაჯგუფებებს. ნაჩვენებია, რომ ადვილდნობადი მინების მიღება შესაძლებელია შემდეგი სახის ფსევდოსამკომპონენტთან სისტემებში:  $Me_2O(MeO) - Al_2O_3 - P_2O_5$ ,  $Me_2O(MeO) - SiO_2 - P_2O_5$  და  $Me_2O(MeO) - B_2O_3 - P_2O_5$ . რეკომენდირებულია მათში  $R_2O$  ოქსიდური ნაერთებიდან მხოლოდ  $Li_2O$ ,  $Na_2O$  და  $Tl_2O$  გამოყენება, ხოლო RO შეიძლება წარმოდგენილი იყოს  $BeO$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ,  $BaO$ ,  $PbO$ ,  $CdO$  და სხვა მსგავსი ოქსიდის სახით.

ნაჩვენებია, რომ ადვილდნობადი მინების გამოყენების სფეროების განმსაზღვრელი ფაქტორებია - მათი მინისებრი ბუნება და თვისებები. ასეთი მინების გამოყენება უნდა უზრუნველყოფდეს ადვილდნობადი (მაგ., ლითონები) და დეფორმაციის დაბალი ტემპერატურის (მაგ., მინის ნაწარმი) მქონე მასალების შერჩილვა ან ფუნქციურ დაფარვას. ამ მიმართულებით მოყვანილია დღეისათვის ფართოდ გამოყენებული შესარჩილი უტყვიო და ტყვიანაშემცველი მინების და მინაცემენტების შედგენილობა და გამოყენების სფეროები. ასევე მოყვანილია სილიკატური საღებავების გამოყენების სფეროები, რომლებიც ძალზე მრავალფეროვანია: მინის ზედაპირის დეკორირება, ზედაპირის მოვარაყება, ეტიკეტირება ათამდე ხერხით. ნაჩვენებია, რომ ე.წ. „ცხელი მომინაჩქრება-დეკორირებაში“ გამოიყენება მრავალკომპონენტური,

ძირითადად დიდი ოდენობით (50-60 %)  $PbO$ -ს შემცველი ბორსილიკატური მინები, რომლებშიც თვისებათა მაკორექტირებულ ოქსიდებად გამოყენებულია  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $ZnO$ . ასეთი საფარების თბური გაფართოების ხაზობრივი კოეფიციენტი ( $\alpha$ ) მნიშვნელობა  $(80 \div 110) \times 10^{-7}, ^\circ C^{-1}$  შეადგენს.

წარმოდგენილია ის პირობები, რომლებსაც უნდა აკმაყოფილებდეს ალუმინისაგან დამზადებული საგნების ზედაპირის დამფარავი ადვილდნობადი მინანქრები (დნობის ტემპერატურა - ნაკლებია  $650^\circ C$ ,  $\alpha \geq 230 \times 10^{-7}, ^\circ C^{-1}$ ). წარმოდგენილია ალუმინის მოსამინანქრებელი 3 განსხვავებული ფუძის (უტყვიო და ტყვიაშემცველი სილიკატური ფუძის, ასევე ფოსფატური) ფუძის მინანქრების ქიმიური შედგენილობა, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეების ჩვენებით.

სამეცნიერო წყაროებში და სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში არსებული მონაცემების შეფასებით და ანალიზის საფუძველზე გაკეთდა დასკვნა, რომ ადვილდნობადი მინამასალები (შესარჩილი, ტექნიკური და მხატვრულ-დეკორატიული საფარების, ასევე სხვა ფუნქციურ დანიშნულებით გამოყენებული) დღეისათვის ფართოდ გამოიყენება ტექნიკის, არქიტექტურულ-სამშენებლო და ხელოვნების დარგების მიმართულებით. არსებული მინანქრები გამოირჩევა შედგენილობის სირთულით და უკეთეს შემთხვევაში მათი მიღება ექვსი სხვადასხვა შედგენილობის სანედლეულო მასალის გამოყენებას მოითხოვს. ამავე დროს, შედგენილობით ხელსაყრელი უტყვიო მინანქრების შედგენილობაში, როგორც წესი, წარმოდგენილია დეფიციტური  $TiO_2$  ან არასასურველი  $BaO$ . აქვე, უნდა დინიშნოს, რომ ასეთი მინანქრები მცირე რაოდენობით შეიცავენ  $CaO$  და  $MgO$ -ს. როდესაც მათი მონაწილეობას შეეძლო რიგი საექსპლუატაციო თვისების (მაგ., ქიმიური მდგრადობა, ხეზამედევობა და სხვ.) გაუმჯობესება.

რაც შეეხება ცნობილი შედგენილობის ფოსფატურ მინანქრებს, მათი ძირითადი შემადგენელია ორი ოქსიდი:  $P_2O_5$  (40 – 60 მას. %) და  $Al_2O_3$  (5 – 21 მას.%), ხოლო ემატება მაკორექტირებელი ნაერთები ( $Li_2O$ ,  $BaO$ ,  $ZnO$  და

სხვ.), მათი დადებით მხარეს წარმოადგენს სინთეზის დაბალი ტემპერატურა და მაღალი საექსპლუატაციო თვისებები. ნაკლად შეიძლება მიჩნეული იქნას დეფიციტური  $P_2O_5$ -ის დიდი რაოდენობით შემცველობა და არანაკლებად დეფიციტური და ღირებულებით გამორჩეული  $Li_2O$ -ს ( $\approx 4\%$ ) შედგენილობაში აუცილებელი შეყვანა.

აქედან, მიზანშეწონილად იქნა მიჩნეული სხვადასხვა ფუნქციური დანიშნულების ადვილდნობადი მინამასალების, მიღება ხელმისაწვდომი სანედლეულო ბაზის საფუძველზე. ასეთ ნედლეულებად შერჩეული იქნა ორი ტექნოგენური მასალა: მინის ლეწი და ძვლის ნაცარი.

## 2. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა

მოყვანილია ადვილდნობადი მინების მიღების საქმეში გასათვალისწინებელი ხუთი პირობა და ასევე მათი შედგენილობათა პროექტირების ჩასატარებლად აუცილებელი ემპირული მონაცემები და მოსალოდნელ თვისებათა მნიშვნელობების გათვლის ცნობილი მიდგომები და მეთოდები..

### 2.1. საკვლევი კომპოზიციის და სანედლეულო მასალების შერჩევა

ლიტერატურის წყაროებში არსებული მონაცემების ანალიზის და მათი განზოგადოების საფუძველზე, ჩვენს მიერ დაზუსტდა ადვილდნობად მინებში (ეკოლოგიურად უსაფრთხო, არატყვიანშემცველი) წარმოდგენილი ოქსიდურ ნაერთთა სახეობა და ექსპერიმენტის გზით პრაქტიკაში გამოცდილი მინა-მინანქრებში მათი შემცველობა, რაც 1-ლ ცხრილშია მოყვანილი.

**ცხრილი 1. პრაქტიკაში გამოყენებული ადვილდნობად მინებში/მინანქრებში წარმოდგენილი ძირითადი ოქსიდების შემცველობა (მას. %)**

$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$B_2O_3$	$R'O$ (CaO+MgO)	$R''O$ (ZnO+BaO)	$R_2O$	$P_2O_5$	$F'$
23-37	0-25	0-3	4-19	0-10	3-15	8-40	0-5	2-5

ცხრილში წარმოდგენილი RO შედგენილობის ოქსიდები ორად იქნა დაჯგუფებული და წარმოდგენილია RO (CaO და MgO) და RO (ZnO და BaO) ოქსიდთა წყვილებით. რაც შეეხება  $R_2O$ -ს – აქ გაერთიანებულია სამი სახის ოქსიდი ( $Li_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) და ცხრილში მათი ჯამური შემცველობაა წარმოდგენილი.

აღსანიშნავია, რომ მალლობლების ( $B_2O_3$ , ზოგიერთი RO,  $R_2O$  და ფტორ-იონი) რაოდენობა ცნობილ ადვილდნობად მინების/მინანქრების შედგენილობაში ინგრედიენტთა შემცველობის ნახევარზე მეტს შეადგენს.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, შესაძლებლად ჩავთვალოთ და დავისახეთ ამოცანა: ადვილდნობდი ისეთი მინების/მინანქრების მიღება, რომელთა საფუძველზე შესაძლებელი იქნებოდა:

- მინის ნაწარმის ზედაპირის დაფარვა-დეკორირება;
- ალუმინის ნაწარმის ზედაპირის პასივაცია ან/და მხატვრულ-დეკორატიული დამუშავება.

წარმოდგენილი მიზნის განსახორციელებლად, ჩვენ პირველ რიგში მივიღეთ გადაწყვეტილება და უარი ვთქვით ეკოლოგიურად მავნე ტყვიის და ბარიუმის ოქსიდების შემცველ მინა – მინანქრებზე. ასევე მიზანშეწონილად არ მივიჩნიეთ ახალ შედგენილობებში ლლობის მაღალი ტემპერატურის მქონე და დეფიციტური  $TiO_2$ -ის შეყვანა, ხოლო სანაცვლოდ  $SiO_2$ -ის შემცველობის გაზრდით. აქედან, საკვლევად პერსპექტიულ შედგენილობებიდან შერჩეული იქნა სამი ცნობილი ფუძე სისტემა, რომელიც ხშირად ადვილდნობადი მინების საფუძველს წარმოადგენს. ესენია:

- ბოროსილიკატური ფუძის  $SiO_2 - B_2O_3 - RO$  კომპოზიცია, სადაც RO = CaO, (პერსპექტივაში MgO და ZnO);
- ბოროსილიკატური ფუძის  $SiO_2 - B_2O_3 - R_2O$  კომპოზიცია, სადაც  $R_2O = Na_2O$  (პერსპექტივაში  $Li_2O$  და  $K_2O$ );

– ბოროფოსფატური ფუძის  $P_2O_5 - B_2O_3 - R_2O$ , სადაც  $R_2O = Na_2O$ , (პერსპექტივაში  $Li_2O$ ).

სამივე სისტემის შედგენილობათა შეჯერებით საკვლევად შეირჩა და დაიგეგმა რთული შედგენილობის მრავალკომპონენტური  $P_2O_5 - SiO_2 - B_2O_3 - RO - R_2O$  კომპოზიციაში ადვილდნობადი მინების მიღება. კვლევის საწყის ეტაპზე, მიღებული იქნა გადაწყვეტილება, რომ RO-ს სახით საკვლევ კომპოზიციაში წარმოდგენილი იქნება CaO და MgO, ხოლო  $R_2O$  ტიპის ოქსიდები – ძირითადად მხოლოდ  $Na_2O$ -ით. აქედან, საკვლევი კომპოზიციის ფუძეს უნდა წარმოადგენდეს ფსევდო-ოთხკომპონენტური სილიკო-ბორატული ფუძის  $SiO_2 - B_2O_3 - RO - R_2O$  სისტემა, რომელშიც დანამატ-მაღლობლის სახით წარმოდგენილი იქნება  $P_2O_5$ .

მოყვანილი წინაპირობიდან გამომდინარე, ახალი შედგენილობის ადვილდნობადი მინების (მინანქრების) მიღება დაიგეგმა კაზმიდან, რომლის შედგენილობაში ძირითად ინგრედიენტებად წარმოდგენილი იქნება ორი ტექნოგენური და ამავე დროს შედგენილობით კომპლექსური ნედლეული: ფანჯრის უფერო მინის ლეწი და საქონლის ძვლის ნაცარი, რომელთა სრული ქიმიური შედგენილობა მოყვანილია მე-2 ცხრილში.

ცხრილი 2. უფერო მინის ლეწის და ძვლის ნაცრის სრული ქიმიური შედგენილობა

მასალის დასახელება	ოქსიდების შემცველობა								წ.დ.	ჯამი
	$P_2O_5$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$K_2O$	$Na_2O$		
მინის ლეწი	-	72,5	1,5	0,1	8,5	3,5	0,2	13,5	0,2	100,0
ძვლის ნაცარი	40,0	0,4	0,3	0,1	54,2	2,8	-	-	2,2	100,0

ახალი შედგენილობის მინების მისაღებ კაზმში ორივე მასალის არსებობა უზრუნველყოფს მხოლოდ ოთხი ოქსიდური შემადგენლის რაოდენობის ( $B_2O_3$ -ის გარდა) და არასრულად ტუტე ოქსიდთა ( $Na_2O$ ) მოთხოვნადი შემცველობის დაკმაყოფილებას. ორი მნიშვნელოვანი  $B_2O_3$  და  $Na_2O$  ოქსიდების რაოდენობის სასურველ ზღვრების წარმოსადგენად, კაზმის მესამე

კომპონენტად მიზნობრივად შერჩეული იქნა ნატრიუმის ბორატული ნაერთი, კერძოდ  $Na_2O - B_2O_3$  სისტემაში ადვილდნობადი ევტექტიკური  $Na_2O \cdot B_2O_3$  ნაერთი ე.ი. ნატრიუმის მეტაბორატი.

ნატრიუმის მეტაბორატის მისაღებ ყველაზე ხელმისაწვდომ და მარტივ გზას წარმოადგენს კალცინირებული სოდის და ბორის მჟავის ნარჩევის შედგენა და კაზში შეყვანა.

აღნიშნულის გათვალისწინებით შედგენილია ნატრიუმის მეტაბორატის ოქსიდური და მატერიალური შედგენილობები, რომლებიც წარმოდგენილია მე-3 ცხრილში.

**ცხრილი 3. ნატრიუმის მეტაბორატში ოქსიდების შემცველობა და მისი მისაღები ნარჩევის მატერიალური შედგენილობა**

დასახელება	ქიმიური შედგენილობა, მას. %		100 წ.ნ. ნატრიუმის მეტაბორატის მისაღებად საჭირო მასალები, წ .ნ.	
ნატრიუმის მეტაბორატი ( $Na_2O - B_2O_3$ )	$Na_2O$	$B_2O_3$	სოდა კალცინირებული	ბორის მჟავა
	47,0	53,0	82,0	96,0

## 2.2. „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ საკვლევ კომპოზიციის შემადგენელი მასალების ზოგადი დახასიათება

ადვილდნობადი მინების მიღებასთან დაკავშირებით ჩვენს მიერ შეირჩა სამკომპონენტო სისტემა „მინის ლეწი-ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“.

ადვილდნობადი მინების მიღების საქმეში, სამივე კაზმის ინგრედიენტის როლი შემდეგნაირად გადანაწილდება:

– მინის ლეწი: ამორფული და ადვილად დნობადი ტექნოგენური მასალა, რომელიც შეიცავს პერსპექტივაში სილიკატური ფუძის ადვილდნობადი მინის მისაღებად აუცილებელ რიგ ოქსიდს ( $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ );



– ძვლის ნაცარი: მყარი, კრისტალური ბუნების ტექნოგენური ნედლეული, რომელიც შეიცავს  $P_2O_5$ -ს და CaO-ს. თავის მხრივ, მასში  $P_2O_5$  –ის შემცველობის ხარჯზე, ხელს შეუწყობს ადვილადნობადი მინის მიღებას;

– ნატრიუმის მეტაბორატი: წარმოადგენს საკვლევ მინაში ცნობილი მაღლობლის ბორის ანჰიდრიდის შესატან ერთადერთ წყაროს და ამავე დროს უზრუნველყოფს შედგენილობებში  $Na_2O$ -ს (ასევე ეფექტური მაღლობელი) დეფიციტის შევსებას.

სანედლეულო ბაზით სამკომპონენტო საკვლევ სისტემაში წარმოდგენილ მასალათა შორის მხოლოდ ერთია მინისებურ მდგომარეობაში (მინის ლეწი), ხოლო ძვლის ნაცარი და  $NaBO_2$  – თავისი ბუნებით კრისტალური ნაერთებია, რომელთა შორის განსხვავება მდგომარეობს იმაში, რომ  $NaBO_2$  – ადვილადნობადი ნაერთია (დნება დაახლოებით  $1000^{\circ}C$ -ზე), ხოლო ძვლის ნაცარი – კალციუმის ფოსფატური ნაერთების - ძირითადად ჰიდროქსოაპატიტის შემცველი ძნელადნობადი მასალა (ლღვება  $1400^{\circ}C$ -ზე ზემოთ).

**ცხრილი 4. საკვლევ კომპოზიციის კაზმის მასალათა შემავალი ნაერთების კლასებად დაყოფა- სისტემატიზაცია**

N	ოქსიდები	კაზმის შემადგენლის ქიმიური შედგენილობა, მას. %		
		ფურცლოვანი მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	ნატრიუმის მეტაბორატი
1	$SiO_2$	72,5	0,4	–
2	$R_2O_3(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	1,6	0,4	–
3	RO (CaO + MgO)	12,0	57,0	–
4	$R_2O (Na_2O + K_2O)$	13,7	-	47,0
5	$P_2O_5$	–	40,0	–
6	$B_2O_3$	–	-	53,0
7	ხ.დ.	0,2	2,2	–
	ჯამი	100,0	100,0	100,0

დამატებით განხორციელდა საკვლევ კომპოზიციაში წარმოდგენილი საკაზმე მასალათა შედგენილობაში შემავალი ოქსიდების კლასების მიხედვით სისტემატიზაცია, მათი შემცველობათა შეჯამებით. მიღებული შედეგები წარმოდგენილია მე-4 ცხრილში. კერძოდ,  $R_2O_3$ -ის ტიპის ოქსიდებში

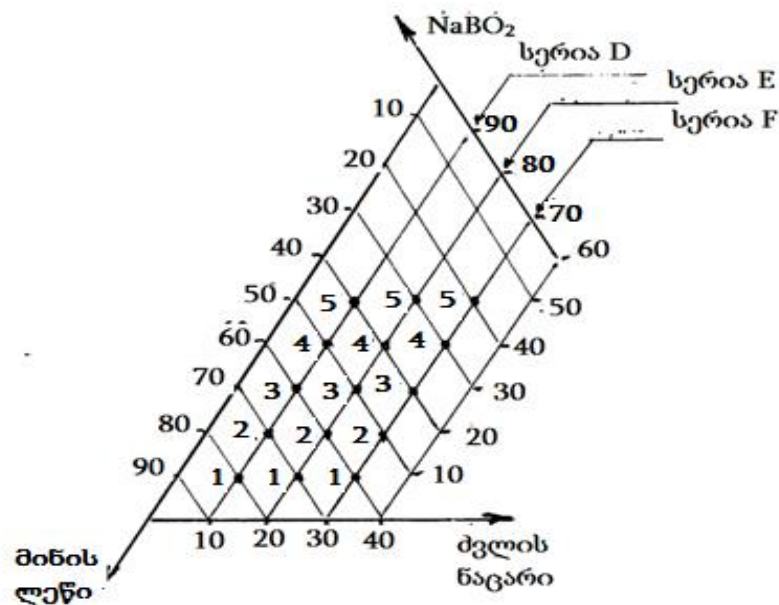


გაერთიანდა  $Al_2O_3$  და  $Fe_2O_3$ , RO-ში – CaO და MgO, ხოლო  $R_2O$  წარმოდგენილია  $Na_2O$  და  $K_2O$ -ით. ამავე დროს,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , MgO და  $K_2O$  წარმოადგენენ მინის ლეწში და ძვლის ნაცარიში შემავალ თანმხლებ ოქსიდებს, რომელთა ჯამური წილი შესაბამისი მასალის შედგენილობაში უმნიშვნელოა. აქედან, მათი არსებობა ვერ მოახდენს მნიშვნელოვან გავლენას საკვლევ „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ კომპოზიციაში არსებულ შედგენილობათა თვისებებზე.

ცხრილში მოყვანილ მასალათა ქიმიური შედგენილობის გამოყენებით განხორციელდა ახალი შედგენილობის მინების შემადგენლობაში შემავალი ოქსიდების რაოდენობის გათვლა.

### 2.3. საკვლევად შერჩეულ სამკომპონენტო „მინის ლეწი-ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემაში ადვილდნობადი მინამასალების მიღების პერსპექტიულობის განსაზღვრა

შერეულ სამკომპონენტო კომპოზიციაში /სისტემაში ადვილდნობადი და ამავედროულად სასურველი მახასიათებელი თვისებების მქონე მი -



ნახაზი 1. „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემის კონცენტრაციათა დიაგრამის ფრაგმენტი. (მონიშნულია სისტემაში შესასწავლი საკვლევ შედგენილობები)

ნების/მინანქრების მიღების შესაძლებლობის დასადგენად ჩვენს მიერ განხილულ იქნა „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ შედგენილობათა გარკვეული უბანი, რომელიც 1-ლ ნახაზზეა წარმოდგენილი სამი სერიის (D, E და F) 5-5 შედგენილობით.

გათვლებით მიღებული D, E და F სამივე სერიის №1 - №5 მინის კაზმების მატერიალური შედგენილობა და მათში წარმოდგენილი ოქსიდების შემცველობა მოყვანილია მე-5 ცხრილში.

**ცხრილი 5. საკვლევად შერჩეული კომპოზიციების ქიმიური შედგენილობა**

ინდე- ქსი	კაზმის კომპონენტი მას.%			ოქსიდების შემცველობა, მას. %					
	მ.ლ.	შვ.	ბრ.	$SiO_2$	$R_2O_3$	RO	$R_2O$	$P_2O_5$	$B_2O_3$
D – 1	80	10	10	58.2	1.3	15.4	15.7	4.0	5.4
D – 2	70	10	20	51.0	1.2	14.2	19.0	4.0	10.6
D – 3	60	10	30	43.6	1.0	13.2	22.4	4.0	16.0
D – 4	50	10	40	36.3	0.9	11.7	25.8	4.0	21.3
D – 5	40	10	50	29.1	0.7	10.5	29.4	4.0	26.6
E-1	70	20	10	51.1	1.2	20.0	14.4	8.0	5.3
E-2	60	20	20	43.8	1.1	18.8	17.7	8.0	10.6
E-3	50	20	30	36.6	0.9	17.5	21.1	8.0	15.9
E-4	40	20	40	29.2	0.8	16.3	24.4	8.0	21.3
E-5	30	20	50	21.9	0.6	15.1	27.8	8.0	26.6
F-1	60	30	10	43.9	1.1	24.5	13.0	12.1	5.4
F-2	50	30	20	36.5	1.0	23.3	16.4	12.1	10.7
F-3	40	30	30	29.4	0.8	22.1	19.6	12.1	16.0
F-4	30	30	40	22.0	0.6	20.8	23.2	12.1	21.3
F-5	20	30	50	14.7	0.5	19.6	26.4	12.1	26.7

ახალ სანედლეულო ბაზაზე მისაღებ ადვილდნობად მინებს ჩაუტარდა სპეციალური შეფასება, რომელიც მოიცავდა სამ ძირითად კითხვაზე პასუხს:

– რამდენად შეესაბამება არატრადიციული სანედლეულო ბაზაზე მისაღები მინების და ცნობილი ადვილდნობადი მინების შედგენილობები;

– როგორი იქნება ახალ კომპოზიციაში შესასწავლად შერჩეული შედგენილობის მინების, წამყვანი თვისება-თბური გაფართოების კოეფიციენტი, გათვლის მეთოდებით დადგენილი;

– რამდენად ადვილდნობადი იქნება ახალი სანედლეულო ბაზაზე მიღებული მინები.

აღნიშნული მიმართულებით ცატარებული მიზნობრივი სამუშაოთი დადგინდა:

- არსებულ ადვილდნობად მინების /მინანქრების და საკვლევად შერჩეულ სამკომპონენტო კომპოზიციის კაზმიდან მირებული მინების შედგენილობათა შედარებამ აჩვენა, რომ მინის მიღების რეალური შესაძლებლობა მოსალოდნელია შედგენილობათა იმ კატეგორიაში, რომელიც მინის ლეწის მაღალ კონცენტრაციებს მოიცავს (შედგენილობები N1 – N2 სერია D და N1 – N3 სერია E;

- სამკომპონენტო საკვლევი სისტემის სამივე სერიის მინების თბური გაფართოების კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) მოსალოდნელ მნიშვნელობათა გათვლა განხორციელდა ადიტიურობის მეთოდით, როდესაც ცალკეული ოქსიდების პარციალური კოეფიციენტი აღებული იქნა ორი წყაროდან (სტ. 24405-80 და დიტცელის მიერ რეკომენდირებული).  $\alpha$ -ს ორი პარალელური კოეფიციენტის გამოყენებით ჩატარებული და გათვლით მიღებული შედეგები დაახლოებით 10%-იან სხვაობას იძლევა. მათი საშუალო არითმეტიკული სიდიდეების გამოყვანით „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ მოსალოდნელია სისტემაში  $\alpha = (110\text{-დან } 170\text{-მდე}) \times 10^{-7}, \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  მქონე მინების მიღება, რაც მათ პერსპექტიულობას განსაზღვრავს. თუმცა სრული თანხვედრა ფანჯრის მინის  $\alpha = 90 \cdot 10^{-7}, \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  და ალუმინის  $\alpha$  -ს მნიშვნელობებთან ( $\alpha \geq 230 \cdot 10^{-7}, \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) არ ფიქსირდება.

- სამკომპონენტო სისტემის საკვლევი-შესაფასებელი D-, E- და F სერიის მინებს ჩაუტარდა ადვილდნობადობის შეფასება რაც განხორციელდა, მინების ქიმიური შედგენილობიდან გამომდინარე, ორი მახასიათებლის-

ჟანგბად-კაჟბადოვანი კარკასის ბმულობის კოეფიციენტის ( $f_{Si}$ ) და ადვილ-დნობადობის კოეფიციენტის (P) გათვლით. დადგინდა, რომ „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემის კონცენტრაციულ სამკუთხედში მინის მიღების რეალური შესაძლებლობა იქმნება მინის ლეწის მაქსიმალურ კონცენტრაციათა უბანში, როდესაც ადგილი აქვს  $f_{Si} = 0,27 - 0,34$  (შეესატყვისება ე.წ. ინვერტული მინების მიღების შესაძლებლობას).

ჩატარებული გათვლების შედეგების შეჯერებით გაკეთდა დასკვნა, რომ ადვილდნობადი მინების მიღების რეალურობა მიიღწევა 30 და მეტი ნატრიუმის მეტაბორატის შემცველი მინების შემთხვევაში. სამივე მიმართულებით ჩატარებული, პროგნოზირების შედეგების სისწორეზე პასუხი უნდა გაეცა ექსპერიმენტულ კვლევას, რაც ჩატარდა „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ კომპოზიის სამი (D, E და F) სერიის შედგენილობებზე.

#### **2.4. საბაზო საკვლევი კომპოზიციების კაზმების შედგენა და მინის ხარშვის რეჟიმის შერჩევა**

წინასწარი შეფასების შედეგებიდან გამომდინარე დაიგეგმა ექსპერიმენტი, რომელიც ითვალისწინებდა D, E და F - სერიებში მინების მიღების შესაძლებლობის და პირობების, ასევე ხარშვის ტექნოლოგიური პარამეტრების დადგენას. საწყის მინებში შემავალი კომპონენტების რაოდენობრივი ცვლის ბიჯი შეადგენდა 10 წონ.%-ს. სამი სერიის (სერიები D, E, F) სულ 21 შედგენილობა/კომპოზიციის, კაზმების შედგენილობები წარმოდგენილია მე-6 ცხრილში.

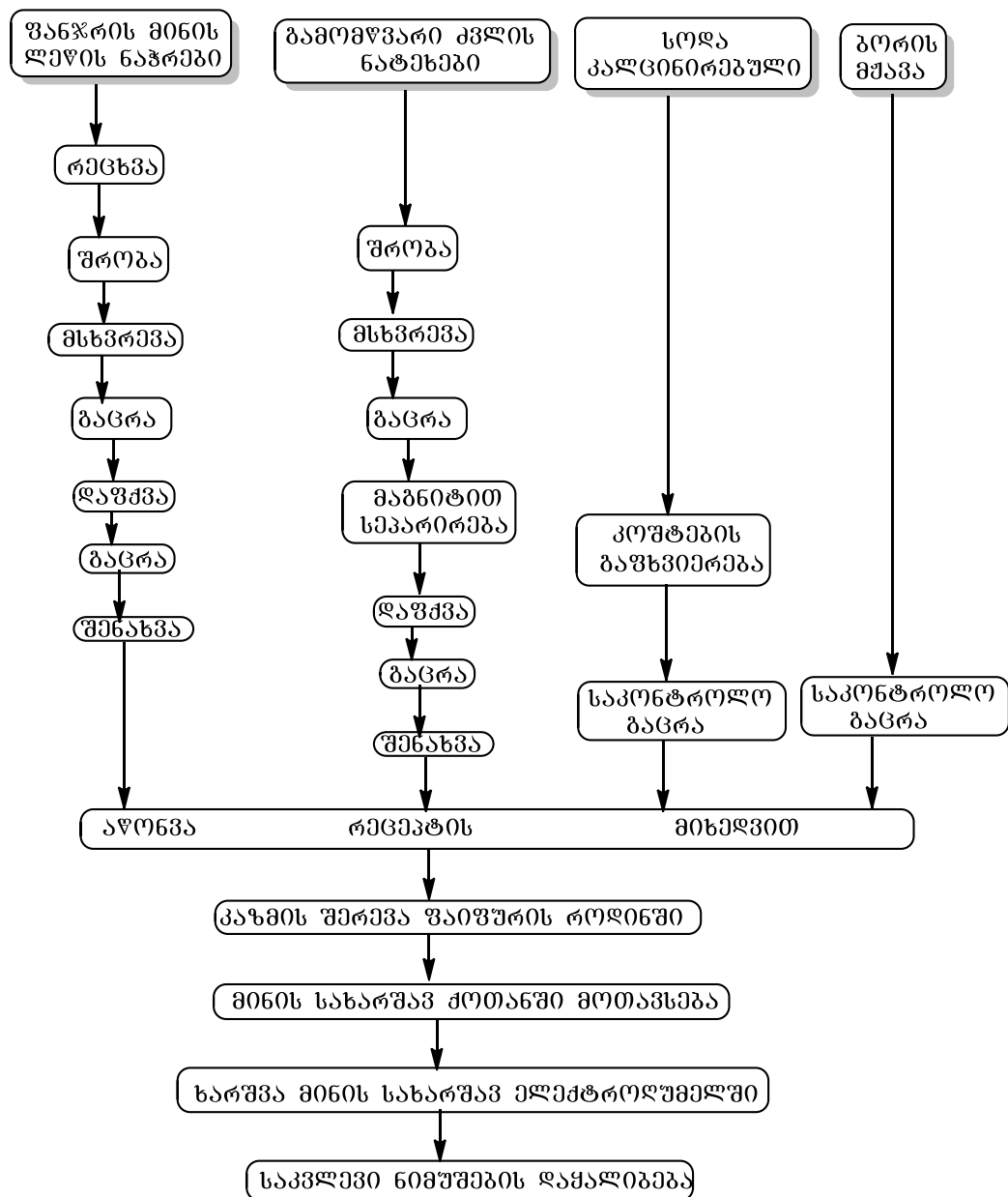
საკვლევ კაზმებში შემავალი ნედლეულის მომზადების, კაზმის მიღების და მისგან მინის ხარშვა-ამომუშავების ტექნოლოგიური სქემა წარმოდგენილია მე-2 ნახაზზე.

ცხრილი 6. საკვლევი D-, E- და F- სერიის საკვლევ კომპოზიციათა კაზმების მატერიალური შედგენილობა

სერია	შედგენილობის ინდექსი	საკაზმე მასალები, წ.ნ./100 წ.ნ. მინაზე				
		მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	ბორის მჟავა	სოდა კალც.	სულ
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	116,0
	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

კაზმების ხარშვის და ამომუშავების სრული ციკლი დაახლოებით ოთხ საათს საჭიროებდა. კაზმების ხარშვის პროცესის მაქსიმალური ტემპერატურა ძირითადად შეადგენდა 1100°C-ს, მაგრამ რიგი ბლანტი ნადნობების მომცემი შედგენილობის სინთეზი 1150-1200°C-ზე ხარშვით განხორციელდა [89, 90].

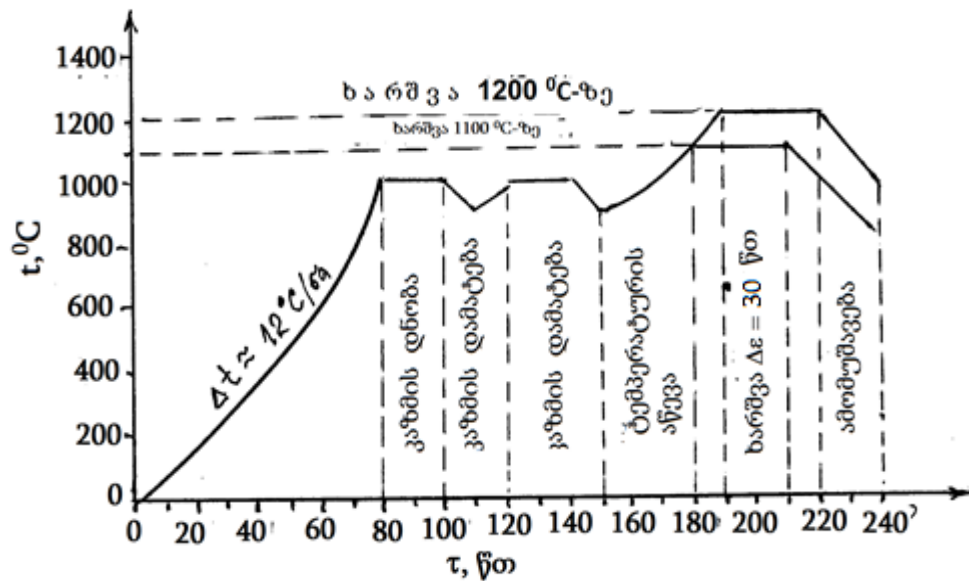
სინთეზით მიღებული გასუფთავებული ნადნობის ამომუშავება ორი ხერხით განხორციელდა: ნადნობის ლითონის ყალიბებში ჩამოსხმით და წყალზე ფრიტირებით. ყალიბებში ჩამოსხმით მიიღებოდა წკირები, რომლებიც სიმკვრივის და გაფართოების კოეფიციენტის, ხოლო ფრიტებიდან ძირითადად ხდებოდა ფხვნილების მიღება და შემდგომ შეცხოვა-განდინების



ნახაზი 2. „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ კომპოზიციაში კაზმის მიღების ლაბორატორიულ - ტექნოლოგიური სქემა

ტემპერატურის და ქიმიური მდგრადობის დასადგენად იქნა გამოყენებული. ახლადშედგენილი კაზმის მორევა ჩატარდება ფაიფურის როდინში, შემდგომი ფაიფურის ქოთანში მოთავსებით და მინის სახარშავ ლუმელში ჩადგმით. ამის შემდეგ ირთვება სილიტიანი ლუმელი და მინის ხარშვა-ამო-

მუშავების პროცესების წარმართვა. ხარშვის პროცესის შესაბამისი ტექნოლოგიური სქემა მოყვანილია მე-3 ნახაზზე.

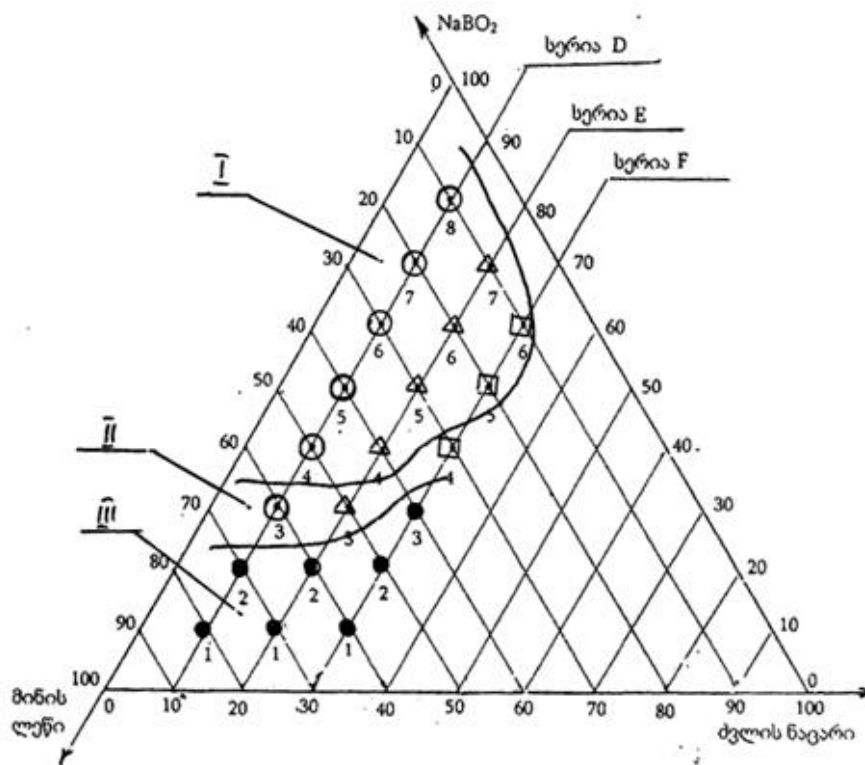


ნახაზი 3. საკვლევი შედგენილობის კაზმებიდან მინის ნადნობის მიღება-ამომუშავების ლაბორატორიულ-ტექნოლოგიური სქემა-გრაფიკი

## 2.5. კაზმების სახეცვლილება მაღალ ტემპერატურებზე, მინის ხარშვა და შედეგების განსჯა

სამი სერიის 21 შედგენილობის მინის სინთეზი განხორციელდა ფაიფურის ქოთნებში, როდესაც მინის მასის რაოდენობა 100 გრამს შეადგენდა. ხარშვის პროცესის შესწავლის ფარგლებში ჩატარდა კაზმის მდგომარეობის შეფასება სხვადასხვა ტემპერატურებზე (900, 1000, 1100 °C), ხოლო სინთეზი 1100 და 1200°C-ზე.

კაზმების თერმული დამუშავების შედეგები შეჯერდა და გაანალიზდა. შედგენილობათა კონცენტრაციულ სამკუთხედზე გამოიკვეთა შედგენილობათა ის უბნები, რომლებიც იძლევიან მინისებრ მოძრავ ნადნობებს გარკვეულ ტემპერატურებზე. შედგენილობათა შესაბამისი უბნები ნაჩვენებია მე-4 ნახაზზე.



ნახაზი 4. კაზმების სუფთა ნადნობში გადასვლის ტემპერატურული უბნები.

I – 1100 °C ; II – 1150 -1200 °C ; III – 1200 °C

კაზმების სხვადასხვა ტემპერატურაზე დნობის შედეგად წარმოქმნილი ნადნობები მათი ქოთნიდან გადმოსხმისას სხვადასხვა სახის მინამასალის მიღებას უზრუნველყოფდა. ნადნობების გადმოსხმა-გაცივების შემდეგ მიიღებოდა მინები, რომლებიც ყალიბებში ჩამოსხმისას ოთხი განსხვავებული გარე სახის მინამასალას წარმოქმნიდა, რაც მე-4 ნახაზზე შესაბამისი პირობითი ნიშნებით აღინიშნა:

- – გაუსუფთავებული (მყარი და აირისებრი ჩანართების შემცველ) მინის (ბლანტი) ნადნობები;
- ⊙ – გასუფთავებული ერთგვაროვანი უფერო (გამჭვირვალე) მინები;
- Δ – სუსტად დახშული (რძისფერ/თეთრ) გასუფთავებული მინები;
- – ძლიერად /მოცულობაში დახშული (თეთრ/რძისფერ) გასუფთავებული მინები;



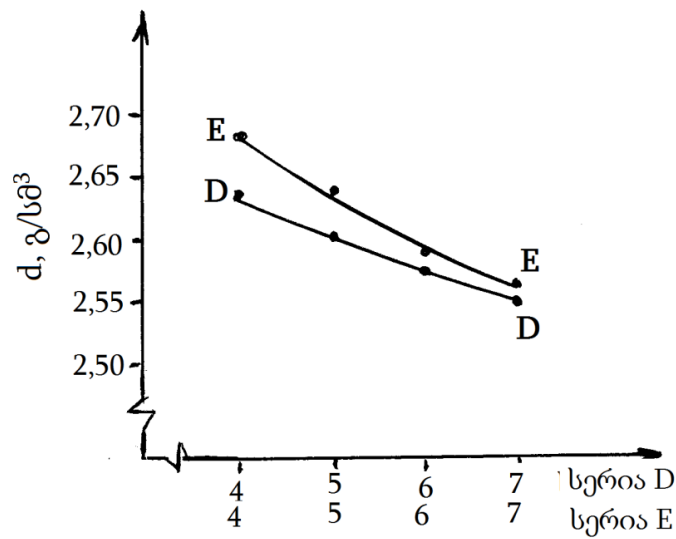
ადვილდნობადობა შეფასდება შესაბამისი შედგენილობის კაზმების დნობის შედეგად ერთგვაროვანი ნადნობების 1100 °C-ზე მიღებით, დადგინდა, რომ – ადვილდნობადია (იძლევა ერთგვაროვან ჰომოგენურ ნადნობებს) შესაბამისი სერიების შემდეგი შედგენილობები:

- სერია D: D – 4; D – 5; D – 6; D – 7; D – 8;
- სერია E: E – 4; E – 5; E – 6; E – 7;
- სერია F: F – 5; F – 6.

## 2.6. სინთეზირებული ადვილდნობადი მინების მახასიათებელი თვისებების შესწავლის შედეგები

მიღებული ადვილდნობადი მინების დაგეგმილ სფეროებში მიზნობრივად გამოყენების შესაძლებლობის დასადგენად დაიგეგმა და განხორციელდა ექსპერიმენტი, რომელიც მოიცავდა სინთეზირებული მინებისათვის შემდეგი თვისებების დადგენას: სიმკვრივეთა მნიშვნელობა, მიღებული მინების გარბილების შესატყვისი ტემპერატურა, თბური გაფართოება, ქიმიური მდგრადობა. შედეგების გათვალისწინებით, ზემომოყვანილი თვისებები დაუდგინდათ D- და E -სერიის რიგი შედგენილობის მინებს.

სიმკვრივის შესწავლის შედეგები, მე-5 ნახაზზეა გრაფიკულად წარმოდგენილი. დადგინდა, რომ D – სერიის მინები (10 % ძვლის ნაცარი) უფრო დაბალი სიმკვრივეებით ხასიათდებიან, ვიდრე იდენტური ნუმერაციის E – სერიის (20% ძვლის ნაცარი) შედგენილობები, რაც მათში ძვლის ნაცრის შემცველობითაა გამოწვეული. ასევე ცალკეულ სერიებში ადგილი აქვს მინის სიმკვრივეთა კლებას ნუმერაციის ზრდის და შესაბამისად ნატრიუმის მეტაბორატის კონცენტრაციათა მატებისას. ეს ფაქტი გამოწვეული უნდა იყოს „მძიმე“ სილიკატური მინის ლეწის უფრო „მსუბუქი“ ნატრიუმბორატული მინით ჩანაცვლებით.



ნახაზი 5. D – და E – სერიის რიგი მინების სიმკვრივეთა მნიშვნელობა.

ცხრილი 7. 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.)	4 (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.)	3 (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.)

\*მნიშვნა: (გამჭ.) გამჭვირვალე უფერო მასა;

(თეთრი) თეთრი რძისფერი მასა;

(დახშ.) ტლანქმარცვლოვანი რძისფეი მასა.

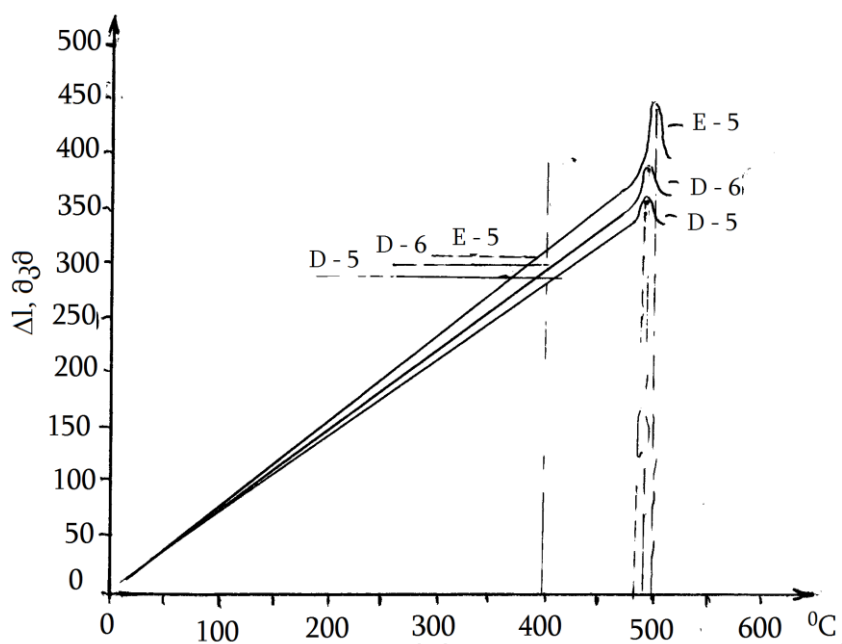
პირობითი ბალები: 0- მარცვლები უცვლეელია; 1- ნაწილობრივი შეცხოვა;

2- შეცხოვა; 3- გაღობა; 4 - დნობა.

მინების გარბილების ტემპერატურის დასადგენად, ნიმუშები თერმულად დამუშავდა 450 – 650°C ტემპერატურულ ინტერვალში. ტემპერატურათა ცვლის ბიჯი შეადგენდა 50°C-ს. სხვადასხვა ტემპერატურაზე დამუშავებული საკვლევი მინების გარდაქმნათა შეფასება განხორციელდა პირობითი „შეფასების ბალებით“. შედეგები მოყვანილია მე-7 ცხრილში.

ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებიდან გამომდინარე, მომდევნო კვლევები წარიმართა სამი გამოკვეთილად პერსპექტიულ მიჩნეულ შედეგნილობებთან მიმართებაში: საბაზოდ მიჩნეული სამი შედეგნილობის (D – 5, D – 6 და E – 5) მინის გარშემო.

საკვლევი სამივე ნიმუშის „ $\Delta l - \Delta t$ “ დამოკიდებულება წარმოდგენილია მე-6 ნახაზზე. დილატომეტრიული მრუდის სრული ანალიზის და გათვლილი თბური გაფართოების ხაზობრივი კოეფიციენტის მნიშვნელობები წარმოდგენილია მე-8 ცხრილში. მიღებული მონაცემებიდან ჩანს, რომ ყველაზე მაღალი გაფართოების კოეფიციენტით ( $\alpha$ ) და დაბალი ტრანსფორმაციის (დეფორმაციის დაწყების)  $T_f$ - ტემპურატურით ხასიათდება D – 6 შედეგნილობის მინა.



ნახაზი 6. სამი (D – 5, D – 6 და E – 5) შედეგნილობის მინის დილატომეტრული მრუდები

**ცხრილი 8. საბაზო რიგი მინის დილატომეტრიული მრუდის მონაცემები  
( $\alpha$ -ს და  $T_g$ ,  $T_f$ -ის მნიშვნელობა)**

მინის ინდექსი	დაგრძელების მნიშვნელობა, მკმ		ნიმუშის სიგრძე $l_0$ (მმ)	$\alpha \cdot 10^7$ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	მახასიათებელი დილატომეტრიული ტემპერატურები	
	20 $^{\circ}\text{C}$ -ზე ( $l_0$ )	400 $^{\circ}\text{C}$ -ზე ( $l_1$ )			გამინების ( $T_g$ ), $^{\circ}\text{C}$	დეფორმაციის საწყისი ( $T_f$ ), $^{\circ}\text{C}$
D – 5	0	282	52,1	141,8	476	500
D – 6	0	304	52,5	152,4	472	495
E – 5	0	291	52,3	146,4	475	490

ადვილდნობადი მინების კიდევ ერთ მახასიათებელ თვისებას წარმოადგენს ქიმიური მდგრადობა, რომელიც ბევრად განსაზღვრავს მისი გამოყენების პრაქტიკულ შესაძლებლობას. სამი საბაზო შედგენილობის საკვლევი მინების ქიმიური მდგრადობის განსაზღვრით მიღებული შედეგები წარმოდგენილია 8 ცხრილში.

**ცხრილი 9. D – 5, D – 6 და E – 5 შედგენილობის მინების ქიმიური მდგრადობა**

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

მაშასადამე საკვლევი საბაზო სამივე მინის ქიმიური მდგრადობა წყალთან (98  $\pm$  2 $^{\circ}\text{C}$ ) მიმართებაში 2,5 %-ზე მეტს შეადგენს, რაც ცოტაოდენ მაღალია მსგავსი სახეობის მინების მიმართ არსებულ მოთხოვნებთან (არ აღემატება 2 %) შედარებით.

პერსპექტიულ საბაზო შედგენილობის მინების პრაქტიკული გამოყენების სფეროს წარმოადგენდა სავიტრაჟე (ფანჯრის მინის საფუძველზე) ადვილდნობადი საფარების/საღებავების მიღება და აგრეთვე ალუმინის პასივაცია/დეკორირებისათვის მინანქრების მიღება. ცნობილია, რომ ფანჯ-

რის მინის გაფართოების კოეფიციენტი დაახლოებით  $95 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , ხოლო ალუმინის დაახლოებით  $235 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}$  შეადგენს. აღნიშნულიდან გამომდინარე მიღებული მინამასალების მიზნობრივად გამოყენება მოითხოვს შედგენილობათა კორექტირებას, რაც განსაზღვრავს სასურველი გაფართოების კოეფიციენტის სიდიდეთა და უფრო მაღალი ქიმიური მდგრადობის მქონე მინების მიღებას. აღნიშნულმა საჭიროდ გახადა მიღებული საბაზო მინების თვისებების და აქედან მათ შედგენილობათა კორექტირება.

## 2.7. პრაქტიკული დანიშნულების ადვილდნობადი მინამასალების მიღება

სასურველ თვისებათა მქონე მინამასალების მისაღებად საჭირო გახდა  $R_2O(RO) - B_2O_3$  და  $R_2O(RO) - P_2O_5$  სისტემების დიაგრამების მათში მინის წარმოქმნის შესაძლებლობის და თვისებათა შეფასება და სხვ.

სავარაუდო მიზნობრივად გამოსადეგი ჩამნაცვლებლების შესახებ მოპოვებული მასალის შეფასებით დადგინდა:

- საბაზო მინების შედგენილობის ტრანსფორმირება, მათი გაფართოების კოეფიციენტის შემცირების მიმართულებით შესაძლებელია მოხდეს საბაზო მინების შედგენილობებში ნატრიუმის მეტაბორატის ჩანაცვლებით თუთიის მეტაბორატით;

- საბაზო მინების შედგენილობათა კორექტირებით დაგეგმილი გაფართოების კოეფიციენტის ზრდისათვის მნიშვნელოვან ზღვრებში (თითქმის  $\Delta\alpha = 60 \cdot 10^{-7} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ერთეულზე მეტი სიდიდით), მიზანშეწონილად იქნა მიჩნეული საბაზო მინების შედგენილობაში  $Na_2O \cdot B_2O_3$ -ის

$Na_2O \cdot P_2O_5$  (ნატრიუმის მეტაბორატით) ჩანაცვლება. ასეთ ჩანაცვლებას უნდა გამოეწვია საბაზო მინების  $\alpha$ -ს მნიშვნელოვანი (60-70 ერთეულით) ზრდა. ამავე დროს მოსალოდნელი ხდება გამინების ტემპერატურის (Tg)

და მასთან შესაბამისობაში მყოფი მინის დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურის ( $T_f$ ) შემცირება.

**2.7.1. მინის და ალუმინის ნაწარმის მოხატვა-დეკორირება-დაფარვა პროცესების განსახორციელებლად ადვილდნობადი მინამასალების შედგენილობათა დამუშავება.**

პრაქტიკული მნიშვნელობის საკითხების გადასაწყვეტად, ორი მიმართულებით ჩატარდა კვლევითი სამუშაო. ერთი მიმართულებით (მინის ნაწარმის მოხატვა-დეკორირება) კვლევები ჩატარდა D – 5 შედგენილობის საფუძველზე შედგენილ DZ-სერიის მინების მიღების მიმართულებით, რომელთა შედგენილობა მოყვანილია მე-10 ცხრილში.

მეორე მიმართულებით არსებულ ამოცანასთან გადასაწყვეტად E-5 შედგენილობის საფუძველზე შედგენილი იქნა EP-სერიის შედგენილობები. მათი კაზმის მატერიალური შედგენილობა წარმოდგენილია მე-11 ცხრილში.

**ცხრილი 10. EZ-სერიის მინების კაზმის შედგენილობა**

N	მინის ინდექსი	საკაზმე მასალები და მათი რაოდენობა, წ.ნ./100 წ.ნ.-ზე						კაზმი 100 წ.ნ. მინაზე	
		მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	სოდა კალციონირებული	თუთის თეთრა	ბორის მჟავა*			
A	B					ჯამი			
1	D - 5	40,0	10,2	41,0	-	48,0	-	48,0	139,2
2	D5Z1	„	„	38,2	5,45	38,4	8,3	46,7	140,1
3	D5Z2	„	„	24,6	10,90	28,2	16,6	44,8	130,5
4	D5Z3	„	„	16,4	16,35	19,2	25,0	44,2	127,2
5	D5Z4	„	„	8,2	21,80	9,6	33,9	43,5	123,7
6	Z - 5	40,0	10,2	-	27,25	-	41,6	41,6	119,3

შენიშვნა: (\*) - ბორის მჟავა შეტანილი  
 • A - ნატრიუმის მეტაბორატით  
 • B - თუთიის მეტაბორატით

**ცხრილი 11. EP-სერიის მინების კაზმის შედგენილობა**

№	მინის ინდექსი	საკაზმე მასალები და კაზმში შემცველობა წ.ნ./100 წ.ნ.					კაზმის მასა 100 მას % მინაზე
		მინის ლეწი	ძვლის ნაცარი	სოდა კალციინირებული	ბორის მჟავა	ნატრიუმის დიჰიდროფოსფატი	
1	E – 5	30,0	20,4	41,0	48,0	-	139,4
2	E5P1	„	„	38,8	38,4	15,5	137,1
3	E5P2	„	„	24,6	29,8	31,0	135,8
4	E5P3	„	„	16,4	19,2	46,5	132,5
5	E5P4	„	„	8,2	9,6	62,0	130,2
6	P5	30,0	20,4	-	-	77,5	127,5

ხარშვის შედეგად მიღებული ნიმუშების ვიზუალური მდგომარეობის შეფასებით დაფიქსირდა რიგი მნიშვნელოვანი თავისებურება, რაც დეტალურადაა აღწერილი სადისერტაციო ნაშრომში.

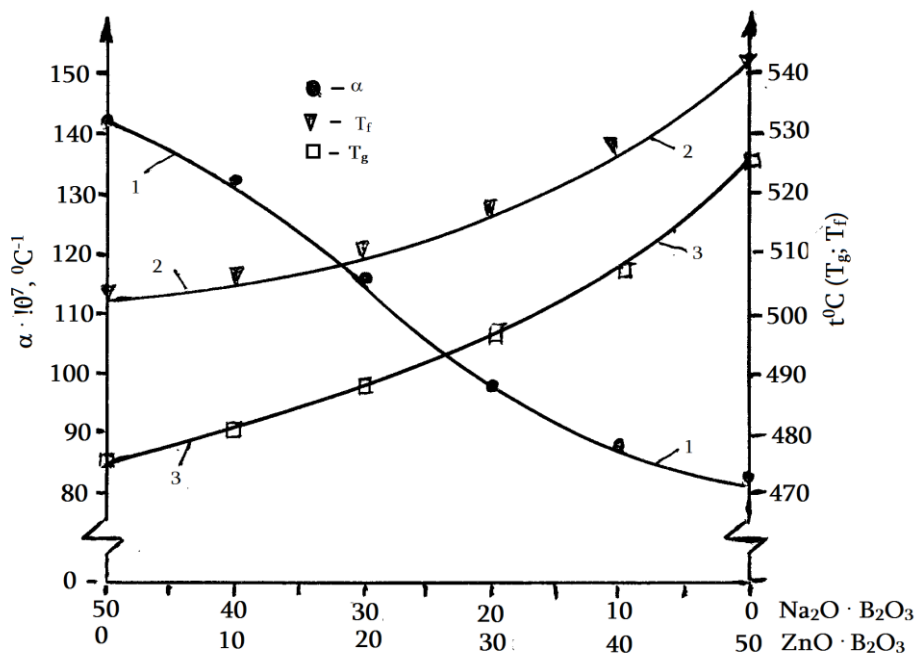
### 2.7.3. DZ- და DP-სერიის მინების ხარშვის შედეგები და მათი მახასიათებელი თვისებების დადგენა

DZ- და EP-სერიების 5-5 მინისათვის ექსპერიმენტალურად მიღებული იქნა თბური გაფართოების დილატომეტრიული მრუდი. „ $\Delta l - \Delta t$ ” დამოკიდებულების გრაფიკიდან მოხდა  $\alpha$ -ს სიდიდის გათვლა და მახასიათებელი ტემპერატურათა ( $T_g$  და  $T_f$ ) მნიშვნელობათა დადგენა. რაც შესაბამისად წარმოდგენილი რაც მე-7 და მე-8 ნახაზზე.

მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების საფუძველზე შეირჩა, ორივე შედგენილობის DZ - სერიის მინას. მათ ახასიათებს სასურველი გაფართოების კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) $\times 10^7$ , $^{\circ}\text{C}$  დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურის ( $T_f$ ) მნიშვნელობები. კერძოდ მინა D5Z3-სათვის –  $\alpha \approx 100$ ,  $T_f=515^{\circ}\text{C}$ , ხოლო D5Z4-სათვის  $\alpha \approx 90$ ,  $T_f=525^{\circ}\text{C}$ , რაც ფურცლოვანი მინის ცნობილი შედგენილობის მინის გამინების ტემპერატურზე ( $T_g = 550 - 560^{\circ}\text{C}$ ) ნაკლებია. ეს ორი პირობა ( $\alpha$ -ს შესატყვისობა და  $T_f$ -ის სიდიდეები) განსაზღვრავს ძირითადში

ორივე შერჩეული მინების ტექნოლოგიურობას და მათგან მინის ნაწარმისათვის ადვილდნობადი მინის/მინანქრის მიღების შესაძლებლობას.

EP - სერიის მინები, რომელთა საბაზო საწყისს E – 5 შედგენილობაში განხორციელებული  $Na_2O \cdot B_2O_3$ -ის სრული ჩანაცვლება  $Na_2O \cdot P_2O_5$ -ით დაახლოებით 135-დან 235-მდე ( $10^{-7} \cdot ^\circ C$ ) ზრდის თბური გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობას. ამავე დროს, რაც ტექნოლოგიურობის თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურის ძლიერ შემცირებას: თუ საბაზო E – 5 შედგენილობის მინის  $T_f=490^\circ C$ , უკვე მხოლოდ  $Na_2O \cdot P_2O_5$ -ის შემცველი P – 5 შედგენილობის მინისათვის  $T_f=410^\circ C$  დაფიქსირდა.

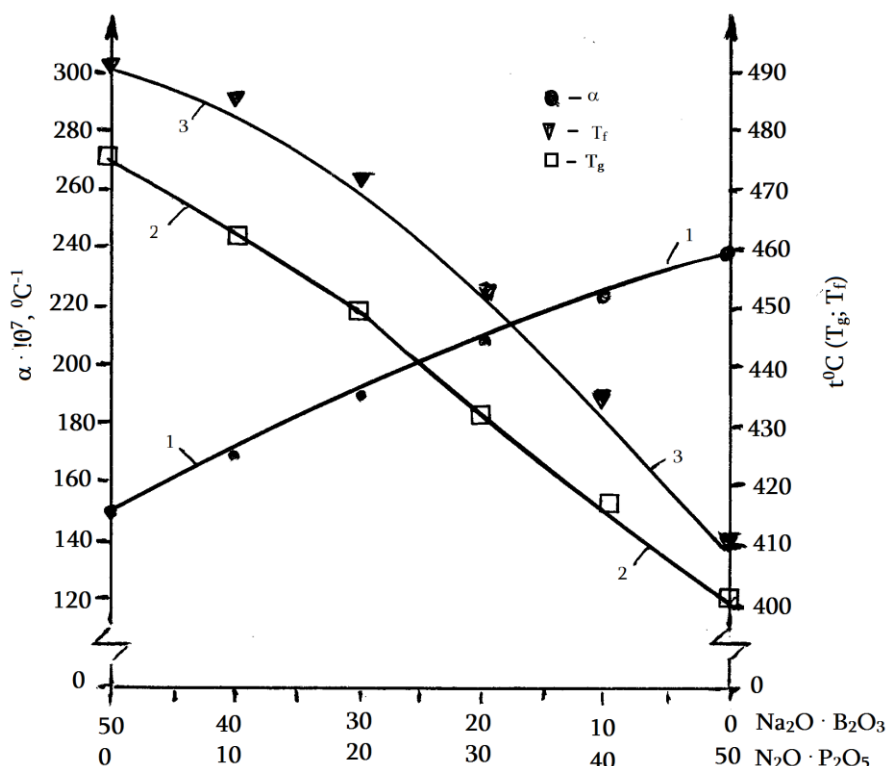


ნახაზი 7. DZ - სერიის მინების შედგენილობის გავლენა თბური გაფართოების კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) მნიშვნელობებს და  $T_g, T_f$  მახასიათებლებზე

ორივე სერიების მინების ფხვნილის შეცხოვა-ლობის ტემპერატურათა ინტერვალის დადგენა განხორციელდა 400 – 550°C ტემპერატურულ ინტერვალში. მიღებული მონაცემების მიხედვით, საკვლევი სერიის მინები იჩენენ მეტნაკლებ მიდრეკილებას შეცხოვა დნობისადმი, რომელთა ინტე-



რგალის ქვედა ტემპერატურა 475°C-დან იწყება. რაც შეეხება DZ და EP- სერიის მინების ქიმიურ მდგრადებას წყალთან (98 ±2°C, 1 სთ) მიმართებაში: უნდა აღინიშნოს, რომ ორივე შემთხვევაში ნატრიუმის მეტაბორატის პირველი ჩანაცვლებით (20%  $ZnO \cdot B_2O_3$  და 30 %  $Na_2O \cdot P_2O_5$ ) მიიღწევა სასურველი ქიმიური მდგრადობა (წონის დანაკარგები ნაკლებია 2 %-ზე), რაც ჩანს მე-12 ცხრილში წარმოდგენილი ექსპერიმენტული მასალიდან.



ნახაზი 8. EP - სერიის მინების შედგენილობის გავლენა გაფართოების კოეფიციენტის ( $\alpha$ ) მნიშვნელობებზე და  $T_g$ ,  $T_f$  მახასიათებლებზე

ცხრილი 12. DZ - და EP-სერიის მინების რეაგენტში წონის დანაკარგები

მინის იდექსი	წონის დანაკარგები წყალში (98±2°C, 1 სთ), %	შეფასება *	მინის იდექსი	წონის დანაკარგები წყალში (98±2°C, 1 სთ), %	შეფასება*
D - 5	2,51	(-)	E - 5	2,60	(-)
D5Z1	2,20	(-)	E5P1	2,45	(-)
D5Z2	1,98	(+)	E5P2	2,23	(-)
D5Z3	1,86	(+)	E5P3	1,98	(+)
D5Z4	1,73	(+)	E5P4	1,87	(+)
D5Z5	1,65	(+) P	P - 5	1,81	(+)

აღნიშვნა: (+) - მისაღები სიდიდე; (-) - მოთხოვნაზე დაბალი მაჩვენებელი

**ცხრილი 13. პრაქტიკული გამოყენებისათვის რეკომენდირებული ადვილდნობა-  
დი მინების ძირითადი ტექნოლოგიურ-თვისებრივი მაჩვენებლები**

კატეგორია	მინის ინდექსი	კაზმის მატერიალური შედგენილობა, წონ.%/100 წონ.5 მინაზე					ხარშვის პროცესის პარამეტრები		დადგენილი საექსპლუატაციო თვისებები				
		ტექნოგენური ნედლეული		სინთეზით მიღებული		რეაქტივი	მაქსიმალური ტემპერატურა, °C	დაყოვნების დრო, წთ	$\alpha \times 10^7$ °C	T <sub>f</sub> , °C	$\Delta T_{ფეც}$ , °C	T <sub>გამ</sub> , °C	$\Delta$ , %
		G	Q	NB	ZB								
A	D5Z3	40	10	20	30	-	1100 ± 20	35	97,7	515	450-500	525	1,83
	D5Z4	40	10	10	40	-	1100 ± 20	40	89,6	525	450-525	550	1,65
B	E5P4	30	20	10	-	40	1000 ± 20	15	217	435	450-475	500	1,87
	P-5	30	20	0	-	50	1000 ± 20	15	235	410	425-450	475	1,81

**აღნიშვნები: ნედლეული**

- G** – მინის ლეწი;
- Q** – ძვლის ნაცარი;
- NB** – ნატრიუმის მეტაბორატი;
- ZB** – თუთიის მეტაბორატი;
- NP** – ნატრიუმის მეტაფოსფატი.

**თვისებები**

- $\alpha$**  – თბური გაფართოების ხაზობრივი კოეფიციენტი;
- T<sub>f</sub>** – მინის დეფორმაციის დაწყების ტემპერატურა;
- $\Delta T_{ფეც}$**  – ფხვნილების შეცხოვის ინტერვალი;
- T<sub>გამ</sub>** – ფხვნილების ნადნობში გადასვლა;
- $\Delta$ , %** – მინის ფხვნილის წყალში (98 ± 2°C, 1 სთ), წონის და-ნაკარგი.

**კატეგორიები**

- A** – მინის ნაწარმის მოხატვა დეკორირება;
- B** – ალუმინის ნაწარმის ზედაპირის პასივაცია - დეკორირება.

DZ და EP - სერიის მინების თვისებრივი მახასიათებლებიდან გამომდინარე შესაძლებელი გახდა რიგი მინებისათვის ფუნქციური დანიშნულების განსაზღვრა, პირობითი კატეგორიების მინიჭება და გამოყენების პერსპექტიულობის პროგნოზირება.

აღსანიშნავია, რომ გამოყენების პერსპექტივის მქონე მინების შედგენილობაში წარმოდგენილია 2 ტექნოგენური ნედლეული (მინის ლეწი და ძვლის ნაცარი) და მათი ჯამური შემცველობა 50%-ს შეადგენს, რაც ადვილდნობადობასთან ერთად (ხარშვის ტემპერატურა არ აღემატება 1100°C, ხოლო

ამ ტემპერატურაზე დაყოვნების დრო – 40 წთ-ს). მათი ეკონომიკურობის და ტექნოლოგიურობის განმსაზღვრელ ფაქტორებად იქნა მიჩნეული.

მიღებული მინების თვისებები მათი გამოყენების პერსპექტულობას განსაზღვრავს, მაგრამ საკითხის საბოლოო გადაწყვეტა მოითხოვს სპეციალური კვლევების და გამოცდის ჩატარებას. აღნიშნულმა უნდა გადაწყვიტოს ძირითადი საკითხი – რამდენად შესაძლებელია მიღებული შედგენილობის მინების მეშვეობით მინის და ზოგიერთი ლითონის (მათ შორის ალუმინის) ნაკეთობის ზედაპირის მოხატვა-დეკორირება ან ტექნიკური მომინანქრება – პასივაცია. დღეისათვის საკითხი ღიად რჩება, მაგრამ აღნიშნულის განხორციელებას პერსპექტივაში დაგეგმილია ადგილობრივ ბაზაზე შესაბამის სპეციალური აღჭურვილობის – შექმნით ან დაინტერესებული პარტნიორების ჩართულობის უზრუნველყოფით.

## დასკვნა

1. ადვილდნობადი მინების და მინანქრების შედგენილობათა ანალიზის საფუძველზე შეირჩა უტყვიო შედგენილობის მინანქრები და მათი მიღების ეკოლოგიურობის და ტექნოლოგიურობის უზრუნველსაყოფად აღებული იქნა ორი ტექნოგენური ნედლეული - მინის ლეწი და ძვლის ნაცარი, რომელთა საფუძველზე დაიგეგმა ადვილდნობადი მრავალფუნქციური მინამასალების მიღება;
2. საკვლევ ობიექტად აღებული იქნა სამკომპონენტური „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი სისტემა და შეფასდა მასში ადვილდნობადი მინის წარმოქმნის და სასურველი მახასიათებელი თვისებების მქონე მინების მიღების შესაძლებლობა. დადგინდა, რომ საწყისი მოცემულობის პრაქტიკული რეალიზაცია შესაძლებელია ისეთ შედგენილობებში, რომლებშიც შეზღუდულია ძვლის ნაცრის შემცველობა (მაქსიმალური რაოდენობა 30 წონ.%), მაგრამ ფართო ზღვრებში (10-დან - 80 მას. %-მდე) ხდება მინის ლეწის და ნატრიუმის მეტაბორატის ურთიერთჩაენაცვლება;
3. ახალ სანედლეულო ბაზაზე შედგენილ სამკომპონენტურ საკვლევ კომპოზიციაში განხორციელდა 21 სხვადასხვა შედგენილობის მინის სინთეზი წინასწარ დადგენილი ხარშვის ტექნოლოგიური რეჟიმით. დადგინდა, რომ ადვილდნობადი მინების მიღება შესაძლებელია 40 მას. %-ზე მეტი ნატრიუმის მეტაბორატის შემცველი კაზმებიდან. ასეთი მინების სინთეზი საჭიროებს ხარშვის პროცესის ჩატარებას  $1100 \pm 20^{\circ}\text{C}$ -ზე, როდესაც დაყოვნების დრო 30 წუთს შეადგენს. ხარშვის შედეგების საფუძველზე, სამკომპონენტური სისტემის კონცენტრაციულ დიაგრამაზე გამოიყო შედგენილობათა ის უბნები, რომლებიც წარმოქმნიან მინას  $1100$ ,  $1150$  და  $1200^{\circ}\text{C}$ -ზე. ასევე შეირჩა შემდგომი კვლევის ობიექტი - 10 და 20

- % ძვლის ნაცრის, 10 – 50% მინის ლეწის და 10 – 60 % ნატრიუმის მეტაბორატის შემცველი შედგენილობები;
4. დადგინდა საკვლევად შერჩეული მინების სიმკვრივე, კრისტალიზაციისადმი მიდრეკილება და მათი ფხვნილების შეცხოვა-გამღვალ მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურული უბნები. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგების შეფასების საფუძველზე შეირჩა სამი პერსპექტიული მინა, საწყისი ინგრედიენტების შემდეგი შემცველობით (მას. %): 10 – 20 ძვლის ნაცარი, 30 – 40 მინის ლეწი და 50 – 60 ნატრიუმის მეტაბორატი;
  5. შერჩეული მინების ფიზიკური-ქიმიური კვლევით დადგინდა მათი რიგი თვისება: თბური გაფართოების ხაზობრივი კოეფიციენტი ( $141-146 \times 10^{-7} \text{C}^{-1}$ ), ადვილდნობადობის ირიბად განმსაზღვრელი პარამეტრი – დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურა ( $495 - 500^{\circ}\text{C}$ ), ფხვნილების შეცხოვა-ლლობის ტემპერატურა ( $500 - 650^{\circ}\text{C}$ ), ქიმიური მდგრადობა წყალთან ( $98 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 1 სთ) მიმართებაში ( $2,51 - 2,63 \%$ ), სიმკვრივე ( $2,51 - 2,68 \text{ გ/სმ}^3$ );
  6. სამივე შედგენილობის მინა, მათი თვისებებიდან გამომდინარე, ვერ აკმაყოფილებენ ადვილდნობადი მინებისათვის აუცილებელ პირობებს, როგორც რიგი თვისებათა მაჩვენებლების (ფხვნილების შეცხოვა-ლლობის მაღალი ტემპერატურა, დაბალი ქიმიური მდგრადობა), ასევე დაფიქსირებული მინების მიზნობრივი გამოყენებისათვის (ფურცლოვანი მინის და ალუმინის დაფარვა) გაფართოების კოეფიციენტების სიდიდეთა შეუსაბამება. ამავ დროს, „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი“ სისტემის მინების „შედგენილობა – თვისება დამოკიდებულება“ შესწავლა-ანალიზით შეირჩა ორი შედგენილობა, რომლებიც მომდევნო კვლევის საბაზო მინებად იქნა აღებული;
  7. საბაზო მინების საფუძველზე შედგენილი იქნა მინების ახალი სერია (DZ და DE). ორივე სერიის მინებში, მათი გამოყენების სფეროების გაფართოების და დასახულ ამოცანებთან შესატყვისობაში მოყვანის მიზნით, განხორციელდა ნატრიუმის მეტაბორატის (50 წონ.%) ეტაპობრი-

ვად სრული ჩანაცვლება თუთიის მეტაბორატით (DZ -სერია) და ნატრიუმის მეტაფოსფატით (EP-სერია). დადგინდა ორივე სერიის მინების ხარშვის რეჟიმები: 1000 - 1100°C, დაყოვნების დრო 15-40 წთ), როდესაც DZ-შედგენილობები ხარშვის უფრო მაღალ ტემპერატურებს და ხანგრძლივობას საჭიროებენ;

8. დადგინდა, რომ DZ-სერიაში მიიღება მინები, რომელთა თვისებები შესატყვისება მათ ადვილდნობადობის განმსაზღვრელ და მინის ნაწარმის მომინანქრება-დეკორირებისათვის აუცილებელს. მათი თბური გაფართოება  $\alpha = (89 - 97) \times 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $T_f = 515 - 525$ ; ქიმიური მდგრადობა  $\Delta = 1,7-1,9 \%$  და სხვ. მინის ნაწარმის მომინანქრება-დეკორირებისათვის რეკომენდირებულია DZ -სერიის შედგენილობები, რომლებიც შეიცავენ (მას. %): 40 მინის ლეწი, 10 ძვლის ნაცარი, 10 - 20 ნატრიუმის მეტაბორატი და 30-40 თუთიის მეტაბორატი:

9. დადგინდა, რომ EP-სერიის საბაზო შედგენილობაში შემავალი 50 მას. %  $\text{NaBO}_2$  -ის  $\text{NaPO}_3$  -ით სრული ჩანაცვლება რადიკალურად ცვლის საბაზო მინის მახასიათებლებს და მიიღება შემდეგი თვისებების მატარებელი მინა: თბური გაფართოების კოეფიციენტი  $\alpha = 235 \times 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ; დეფორმაციის საწყისი ტემპერატურა - 410°C, ფხვნილების შეცხოვა - სრული ლლობის (მინის ნადნობში გადასვლის) ტემპერატურული ინტერვალი 450-550°C, ქიმიური მდგრადობა (რეაგენტი-წყალი; 98 ± 2°C; 1 სთ) შეადგენს 1,81 %. მოყვანილი თვისებების გათვალისწინებით, „მინის ლეწი - ძვლის ნაცარი - ნატრიუმის მეტაბორატი - ნატრიუმის მეტაფოსფატი“ კომპოზიციაში მიღებული, 30 მას. % ლეწის და 20 % ძვლის ნაცრის და ასევე 40 და 50 მას % ნატრიუმის ფოსფატის შემცველი მინები - ალუმინის ნაწარმის ზედაპირის დეკორირება-პასივაციის სფეროში გამოსადეგ პერსპექტიულ მასალებად შეიძლება იქნან მიჩნეული.

## Abstract

It is well known that glass and glass materials are an integral part of modern technology and human existence. There are dozens of types of glass and even more segments of industrial technology that use glass and glass materials derived from it, in some cases with unique properties, such as enamels and glass-crystal coatings, optical and quantum electronic materials, as well as materials used in electronics and electrical engineering, and many others. It is particularly important that, with the participation of glass materials, many composites of various types have been created, that provide: corrosion protection to metals, obtaining unique composites by soldering various materials (metal, glass, ceramics), surface passivation of glass and ceramic interlayers in electronic circuits, as well as of aluminum parts, improvement of operational properties of thick film capacitors and resistors (glass materials that protect against electrical insulation, moisture and thermal shock), etc.

Aluminum-containing electronic/electrical, as well as architectural, construction and design elements are actively used in modern technologies. This circumstance caused the need to protect the surface of aluminum products from corrosion and mechanical damage. One of the effective ways for this is to use fusible enamels - with a firing temperature below 600°C and a high coefficient of thermal expansion ( $\alpha > 230 \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Another modern, widely used field of application of fusible glass and enamels is the decorative processing of various types of glass products, mainly surfaces: full or partial surface coating using fusible glass paints, surface ennobling through painting and decorating, stencil marking, creating stained glass windows, etc. Targeted glass surface treatment requires the use of glass materials with a firing temperature of 530-580 °C and  $\alpha = (75-100) \cdot 10^{-70} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (enamels/glass sulfate paints).

General requirements for fusible glass materials include: they must provide close bonds with the product and its comprehensive operational protection by preserving or improving properties so that when applied to the product (metal, glass, ceramics) (the so-called hot enameling) does not cause structural collapse or undesirable deformation.

The main purpose of the research is to obtain fusible glass materials (glass / enamel) for multipurpose use. The combination of environmentally friendly (free of lead and barium oxide) and technologically favorable (using two technogenic materials as raw materials) approaches is a prerequisite for obtaining such a material.

To obtain fusible glass materials using technogenic raw materials, a research work was planned, which was carried out in two directions. The purpose of the first direction was to obtain glass materials suitable for painting and decorating glass products (including sheet glass). The research conducted in the second

direction provided for the creation of glass materials for surface decoration-passivation of aluminum products. The implementation of the tasks in both directions was planned by selecting glass compositions in the composition "crushed glass-bone ash - sodium metaborate" chosen for research; through their synthesis and further study of properties. The three-component research system contains two technogenic raw materials: crushed glass (practically a glass-amorphous material based on silicate) and bone ash (a refractory material of a crystalline nature containing a large amount of CaO and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). The third raw material-sodium metaborate is the main flux, due to the content of Na<sub>2</sub>O and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In the three-component system chosen for research, glass-forming compositions and areas in which the boiling point of the resulting glass did not exceed 1100 ± 20 °C were determined.

10% (Series D) and 20% (series E) containing bone ash were examined (in the series, crushed glass and sodium metaborate are interchanged). The main property of glasses (density, crystallization ability and powder sintering process) and three glass compositions that were considered promising (D-5, D-6 and E-5) were chosen. Their chemical composition (mass. %): crushed glass 30-40; bone ash 10-20; Sodium metaborate 50-60. But these glasses practically cannot provide glass coatings for glass products (glass  $\alpha \approx 95 \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ), as well as aluminum products ( $\alpha > 230 \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ), since their  $\alpha = (141-148) \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ . Both inconsistencies in  $\alpha$ -values and low chemical stability ( $\Delta > 2\%$ ) led to the adjustment of the composition of the glasses of the three-component research system, which was carried out on the glasses of the basic composition D-5 and E-5. In the composition of two glasses, the sodium metaborate is replaced by another compound, but also by a flux; In particular, in D-5 the substitute was zinc metaborate (series DZ), and in E-5 - sodium metaphosphate (series EP). The fluxes were interchanged in the range of 10-50 wt. %:  $2\text{NaBO}_2 \leftrightarrow \text{Zn}(\text{BO}_2)_2$ ;  $\text{NaBO}_2 \leftrightarrow \text{NaPO}_3$ .

It is established that the synthesis of glasses of the DZ and EP series can be carried out. Respectively, 1100±20 and 1000±20°C. In DZ series, glasses are obtained with following the composition (wt. %): 40 crushed glass, 10 bone ash, 10-20 NaBO<sub>2</sub> and 30-40 Zn(BO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. These glasses are recommended for enameling-decorating glass products, since they have the necessary properties:  $\alpha = (89-97) \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ; T<sub>f</sub>=515-525°C, powder sintering interval  $\Delta T = 475-550^\circ\text{C}$ .

As a result of the synthesis of EP-series glasses and the study of their properties, a composition differing in two sets of properties (wt. %) was identified: 30 crushed glass; 20 bone ash; 10 or 0 NaBO<sub>2</sub>; 40-50 NaPO<sub>3</sub>. They have the following operational features:  $\alpha = (217-235) \cdot 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-1}$ ; T<sub>f</sub>≈410-435;  $\Delta T = 425-475^\circ\text{C}$ ;  $\Delta \approx 1.8-1.9\%$ .

Through experimental study, two types of lead-free glasses of different compositions have been obtained, the unity of the properties of which determines the possibility of their intended use. The composition of the new glasses contains two technological raw materials (with a total content of 50%), which, under conditions of effective synthesis (1000 /1100°C, exposure time 10/40 min), represent factors of their efficiency and manufacturability, as well as usability.



სადისერტაციო ნაშრომების ძირითადი შედეგები წარმოდგენილია შემდეგ პუბლიკაციებში:

1. ბაკაშვილი-კვიციანი ქ., ჭეიშვილი თ. სამრეწველო ნარჩენების საფუძველზე ადვილდნობადი მინანქრების მიღების შესაძლებლობის შეფასება. ჟურნალი „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“. ტ. 23, N1(45), 2921. გვ. 3-9
2. ბაკაშვილი-კვიციანი ქ., ჭეიშვილი თ. ტექნოგენური მასალების საფუძველზე მიღებული ადვილდნობადი მინების მახასიათებელი თვისებების დადგენა. ჟურ. „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“. ტ. 24, N1(47). 2022. გვ. 9-14
3. ჭეიშვილი თ., ბაკაშვილი-კვიციანი ქ. ადვილდნობადი მინების სინთეზი ტექნოგენურ. ნედლეულის შემცველ კომპოზიციაში, ჟურნალი, „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“. ტ. 24, N1(47), 2022, გვ. 63-69