

ომარ ნიკოლავა

ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე საშემდუღებლო
ელექტროდების დანაფარების დამუშავება

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად
სადოქტორო პროგრამა – მასალათმცოდნეობა
შიფრი – 0412

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
2019 წ.

საავტორო უფლება © 2019 , ნიკოლავა ომარი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ნიკოლავა ომარის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **“ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე საშემდუღებლო ელექტროდების დანაფარების დამუშავება“** და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2019 წ.

ხელმძღვანელი: პროფესორ-ემერეტუსი ა. სულამანიძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წ.

ავტორი: ნიკოლავა ომარი

დასახელება: “ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე საშემდუღებლო ელექტროდების დანაფარების დამუშავება“

ფაკულტეტი : ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: -----,----- 2019 წ.

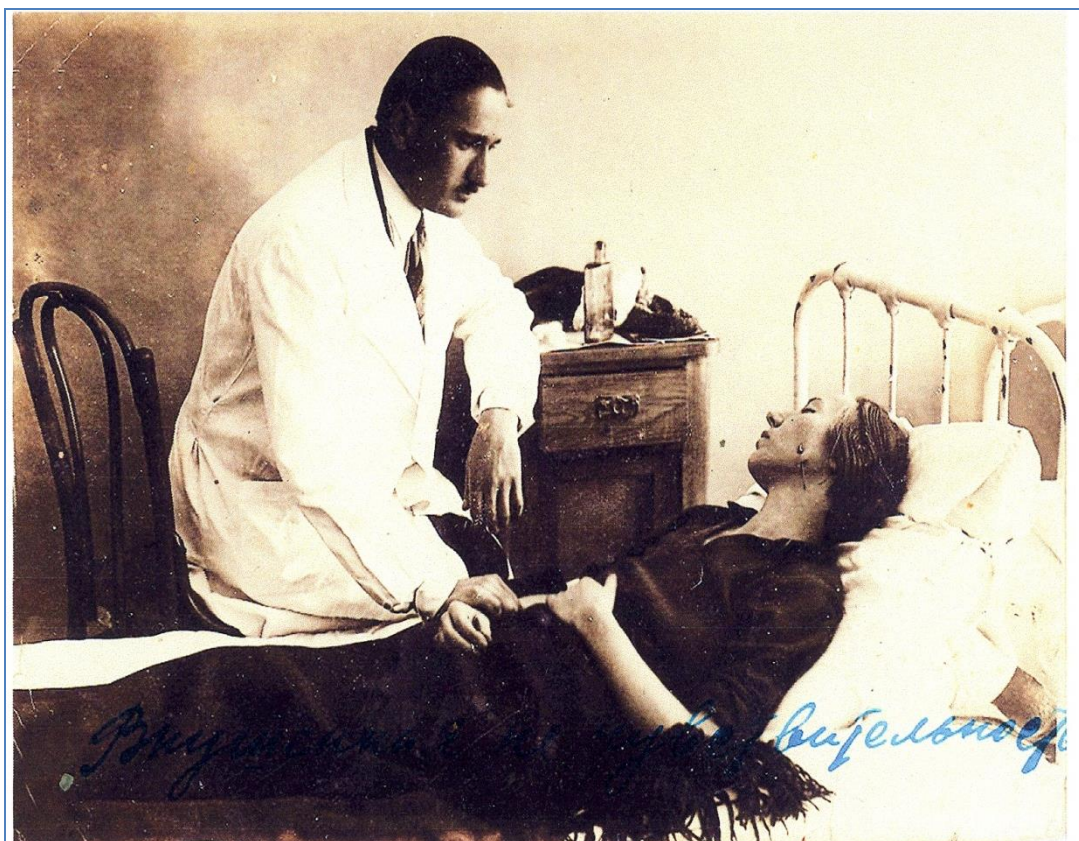
ინდივიდუალური პროცენტების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

დისერტაციას ვუძღვნი მამაჩემის, პროფესორ იგორ ნიკოლაევს ნათელ ხსოვნას, მისი ნაშრომის თამბაქოს წვევის ფსიქოთერაპიის მეთოდით მკურნალობის - შედეგია 89,2 %, 1941 წლისთვის ყველაზე მაღალი პროფ. რაპოპორტის 60 % იყო.



რეზიუმე

საქართველოს მრეწველობის აღმავლობისთვის აუცილებელია განვითარდეს ისეთი დარგები, როგორცაა: მანქანათმშენებლობა, საავიაციო, სამშენებლო და სხვა. განსაკუთრებით აღმავლობას განიცდის მშენებლობა, სადაც ლითონკონსტრუქციების წილი იზრდება. საქართველოს ტერიტორიაზე გადის მსოფლიო მნიშვნელობის ნავთობგაზსადენი, სადაც ხშირად ტარდება სარემონტო-აღდგენითი სამუშაოები. ეს ყველაფერი მოითხოვს საშემდუღებლო წარმოების შემდგომ განვითარებას. დღეს მსოფლიო ბაზარზე საშემდუღებლო მასალები საკმაოდ ძვირადღირებულია. ამისათვის სასურველია საშემდუღებლო მასალების ადგილობრივი წარმოება. საქართველო მდიდარია მადნეული რესურსებით. ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა ადგილობრივი ნედლეულის საშემდუღებლო წარმოებაში გამოყენება. ელექტრორკალური შედუღება მოიცავს სამ ძირითად სახეობას:

- ხელით ელექტრორკალური შედუღება;
- ნახევრადავტომატური შედუღება;
- ავტომატური შედუღება.

ხელით ელ.რკალურ შედუღებაში გამოყენებულია ელექტროდები, რომლებიც შედგება ლითონის ღეროსა და დანაფარისგან. ელექტროდის დანაფარის დანიშნულებაა:

- შედუღების აბაზანის დაცვა ატმოსფეროდან აირების შეღწევისაგან;
- რკალის სტაბილიზაცია;
- შენადური ნაკერის ლეგირება;
- რკალის სწრაფი - იოლი ანთება.

დანაფარის მისაღებად გამოიყენება საქართველოს ერთ-ერთ რეგიონში, კერძოდ, კასპის რაიონში არსებული მადანი, რომელიც თავისი ქიმიური შემადგენლობით წარმოადგენს ნედლეულს საშემდუღებლო მასალების დასამზადებლად, კონკრეტულად კი ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების ახალი დანაფარების შესაქმნელად.

მიზნის მისაღწევად საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „შედუღების ტექნოლოგიათა ცენტრში“ მიმდინარეობს სამეცნიერო-კვლევითი მუშაობა. დასაწყისში მოკვლეულ იქნა საქართველოს წიაღისეულთა საბადოთა გეოლოგიური რუქა (ნახ.1), სადაც მითითებულია 12 ძირითადი საბადო. მათი ადგილმდებარეობათა მიხედვით დაწყებულ იქნა საჭირო ნიმუშების შეგროვება, რათა გამოგვეკვლია თითოეულის შემადგენელ ელემენტთა პროცენტული რაოდენობა. პარალელურად, რეფერატული კვლევის საფუძველზე შერჩეულ იქნა იმ მთავარ ელემენტთა და ჟანგეულთა ნუსხა, რომელიც აუცილებელია შედუღების ტექნოლოგიური პროცესის რაციონალურად წარმართვისთვის, ესენია [5]:

1. **ტიტანი - Ti**, ტიტანის ორჟანგი TiO_2 , რომელიც წარმოადგენს კარგ გამჟანგველს, დანაფარის შემადგენლობაში არსებობით უზრუნველყოფს რკალის სტაბილურობას, აუმჯობესებს წიდის წარმოქმნას, უზრუნველყოფს ხარისხიანი ნაკერის ფორმირებას, გამხეფების სიმცირეს და

წილის ადვილად მოცილებას, აწვრილმარცვლოვნებს შედუღების ადგილის სტრუქტურას;

2. **სილიციუმი - Si**, სილიციუმის ორჟანგი SiO_2 - მიეკუთვნება წიდაწარმომქმნელ კომპონენტებს, უზრუნველყოფს შენადული ნაკერის კარგ ფორმირებას, გამდნარი წილის თხელდენადობას და მის ადვილად მოცილებას. აუმჯობესებს ნაკერის მექანიკურ თვისებებს და ხარისხს, ზრდის შენადული ნაკერის მდგრადობას ფორების წარმოქმნის მიმართ და მწარმოებლობას;
3. **კალციუმი - Ca**, კალციუმის ჟანგი CaO აუმჯობესებს რკალის სტაბილიზაციას, იონიზაციის ხარისხს და ელექტრონების ემისიას კათოდის ზედაპირიდან;
4. **მანგანუმი Mn** - მანგანუმის ორჟანგი MnO_2 , გამოიყენება ელექტროდის დანაფარში, როგორც კარგი განმჟანგველი, იწვევს სიმტკიცის ზრდას და ამოიწვევს შედუღებისას. მისი არსებობა ამცირებს გოგირდის მავნე მოქმედებას, ზრდის აუსტენიტური ფოლადების მდგრადობას კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნისადმი;
5. **ალუმინი - Al**, არის გამჟანგველი და ზრდის, ნაკერის ხარისხს;
6. **სპილენძი - Cu**, ზრდის ნაკერის კოროზიამდეგობას და სინლანტეს.

აღსანიშნავია აგრეთვე ისიც, რომ შენადული ნაკერის მაღალი სიმტკიცის, ცვეთა თუ კოროზიამდეგობისა და სხვა სპეციალურ თვისებების გასაძლიერებლად საჭიროა მისი ლეგირება ისეთი ელემენტებით როგორცაა: მანგანუმი- Mn, სილიციუმი- Si, ქრომი- Cr, ნიობიუმი -Nb, ტიტანი - Ti, მაგნიუმი- Mg, კობალტი - Co, ცირკონიუმი - Zr, კადმიუმი - Cd და სხვა. მათგან ვანადიუმი, ცირკონიუმი და ნიობიუმი იწვევს შენადული ნაკერის სტრუქტურის დაწვრილმარცვლოვნებასა და სათანადო მექანიკური თვისებების ზრდას.

საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებული, შედუღების ელექტროდთა დანაფარში აუცილებელ ელემენტთა რაოდენობრივი შეფასებისათვის, ჩატარდა შეგროვილ ნიმუშთა ქიმიური შემცველობის პროცენტული ანალიზი.

გამოკვლევები მიმდინარეობდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიურ ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტზე, ფერადი ლითონების მეტალურგიის ლაბორატორიაში "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლორესცენტული ანალიზატორის გამოყენებით.

მიღებულ პროცენტულ მონაცემთა ოპტიმალურ რაოდენობათა განხილვისას მოგვეცა საშუალება შეგვეჩია უკეთესი. შერჩეული იქნა კასპის მადნის ნედლეული, რომელიც ქიმიური შედგენილობით ახლოსაა რუტილიანი ელექტროდების დანაფარის შემცველობასთან.

კვლევების შემდგომ ეტაპზე, ოპტიმალური დანაფარის შემადგენლობის მისაღებად დამზადდა დანაფარის ხუთი ვარიანტი, დამზადებული ხუთი ვარიანტიდან ქიმიური შედგენილობისა და მექანიკური თვისებების მიხედვით ყველაზე კარგი შედეგი, მაგრამ არასაკმარისი, აჩვენა მე-4 ვარიანტმა, რომელშიც ტიტანის ოქსიდი (რუტილი) 34,88%-ს შეადგენდა. ჩატარებული კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით, გადაწყვეტილი იქნა საელექ-

ტროდო დანაფარის კაზმის გამდიდრება რუტილით 50-55 %-მდე. დანაფარის შემადგენლობაში აგრეთვე შევიყვანეთ მაღალი დნობის ტემპერატურის მქონე ისეთი მალეგირებელი ელემენტები, როგორცაა: ცირკონიუმი, ვანადიუმი, ნიობიუმი. ისინი ქმნიან ახალი კრისტალების ჩასახვის ცენტრებს. რომლებიც ეწინააღმდეგებიან მარცვლის ზრდას და ხელს უწყობენ წვრილ-მარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას, რაც ცალსახად მიუთითებს, ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის უპირატესობაზე.

შესწავლილი იქნა დანაფარის ისეთი ძირითადი თვისებები და მახასიათებლები, როგორცაა დანაფარის სიმტკიცე, სიბლანტე, რკალის სტაბილური ნათების უზრუნველყოფა, დანაფარის დატენიანების ხარისხი, შედეგებისას დანაკარგები გაშხეფებაზე და ამოწვაზე, ნაკერის ზედაპირიდან წიდის მოცილების შესაძლებლობა, შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებები.

ახალ დანაფარიანი ელექტროდის გამდნარის წიდის სიბლანტის კვლევამ აჩვენა, რომ ის პრაქტიკულად არ განსხვავდება რუტილის დანაფარიანი ელექტროდების გამდნარი წიდის სიბლანტისაგან, ტემპერატურათა შემცირების მცირე ინტერვალში მყისიერად იზრდება და ამიტომ, ნებისმიერ სივრცით მდგომარეობაში შეიძლება მისი გამოყენება შედეგებისათვის;

მექანიკური სიმტკიცის შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ მისი სიმტკიცე არ განსხვავდება “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის მექანიკური სიმტკიცისაგან. დანაფარის ღუნვაზე შესწავლის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ გამოწვის ტემპერატურის მატება იწვევს სიმტკიცის შემცირებას დაახლოებით 24%-ით. გამოწვის ოპტიმალურ ტემპერატურას შეადგენს 200-250°C.

დანაფარის ჰიგროსკოპულობის შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ ჩვენს შემთხვევაში დატენიანების ხარისხი “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარებთან შედარებით დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით.

ელექტრული რკალის პირველადი და მეორადი ანთებისას ელექტროდის შეხებისას ძირითად ლითონთან ადვილად იკვრება წრედი და აღიზნება რკალი, მეორადი ანთება საიმედოა, დანაფარი თანაბრად დნება, ელექტრული რკალის სტაბილური აღზნება განპირობებულია დანაფარში დაბალი იონიზაციის პოტენციალის ელემენტების: კალიუმისა და კალციუმის შეყვანით.

ელექტროდის ლითონის ამოწვაზე და გაშხეფებაზე დანაკარგები “GK”-ს ტიპის ელექტროდთან შედარებით საშუალოდ 2,75%-ით ნაკლებია.

შენადული ნაკერის მექანიკური გამოცდების შედეგებმა აჩვენა, რომ ჩვენს მიერ კასპის მადანზე ტიტანის ოქსიდის დანამატით შემუშავებული დანაფარიანი ელექტროდით შედეგებული ნაკერის ლითონი ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით და პლასტიკურობით. კერძოდ, სიმტკიცის ზღვარი 11,4%-ით, დენადობის ზღვარი - 7,8%-ით, დარტყმითი სიბლანტე - 10,5%-ით, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება - 55%-ით აღემატება “GK” ელექტროდებით მიღებული ნაკერის შესაბამის მახასიათებლებს.

Abstract

The growth of industry is necessary to develop the various branches of industry such as: mechanical engineering, aviation, construction and more. The field of construction is especially reviving; the share of metal-construction in its revival is growing. Georgia has gained a worldwide importance for its oil and gas pipelines, where the repair-restoration works are often carried out. All these circumstances require further development of welding production. Nowadays, the world market of welding materials is quite expensive. Local production of welding materials is therefore advisable for manufacturers. Georgia is rich in ore resources. Our goal is to use local raw materials for the manufacture of welding.

Arc welding consists of three main types:

- Manual arc welding
- Semiautomatic Welding
- Automatic Welding.

Manual arc welding uses electrodes that are composed of a metal core and its coating. The purpose of the electrode composition is the following:

- Protection of welding bath from the gas intrusion through the atmosphere.
- Arc stabilization.
- Alloying of welded seam.
- Fast and easy ignition of arc.

The ore from the region of Kaspy is used to get coating, which serves as a raw material for its chemical composition for the manufacture of welding, arc welding electrodes, in particular, the creation of new coatings.

Scientific research works are carried out at Technical University "Welding Technology Center" to achieve the goals. Initially, the geological map of ore deposits was obtained, where the twelve major deposits were specified. Collection of necessary samples was started according to their location in order to analyze the percentage of their constituent elements. At the same time, the following list of the main elements and rust, essential for the conduction of the welding technological process, was selected based on research:

1. Titanium - Ti, titanium dioxide - TiO_2 , being constituent of coatings it provides arc stability, improves slag formation, provides high-quality seam formation, reduces splashes and easily removes slag, provides the fine-granule structure of spot welding.

2. Silicium - Si, silicium dioxide SiO_2 - belongs to the slag forming components, provides the well-formation of welded seam and easy removal of slag, improves the mechanical properties and the quality of stitches, and increases the capacity of production.

3. Calcium - Ca, calcium oxide CaO - improves arc stability, the degree of ionization and electron emission from the cathode surface.

4. Manganese Mn - manganese dioxide MnO₂, is used in electricity coatings having a good anticorrosion property, increases solidity and burns out during welding;

5. Aluminum - Al has a good anticorrosion property and increases the quality of the seam;

6. Copper - Cu increases the seam corrosion resistance and tenacity.

It should be also pointed out that in order to enhance high solidity, wearability and other specific properties of the welded seam, it is necessary to alloy them with the elements such as: Manganese Mn, silicon - Si, chromium - Cr, niobium - Nb, titanium - Ti, magnesium - Mg, cobalt - Co, zirconium - Zr, cadmium - Cd and others. Vanadium, zirconium and niobium cause the formation of fine-granule structure of welded seam and relevant mechanical properties.

The next stage implies a quantitative assessment of the essential elements for welded electrode coatings that are constituents of Georgian Ore deposits. In this regard, percentage analyze of the collected samples for their chemical composition.

Studies were conducted in the laboratory, using X-ray fluorescent analyzer of 'INNOV-X-SYSTEMS', at the Technical University Department of Chemical Technology and Metallurgy.

Having discussed the optimal amount of data we were enabled to select the best of them. The raw material of ore from Kaspj was selected, which is close to the chemical composition of the rutile electrode coatings.

At the next stage of the research, five versions of coatings were made to obtain the optimal composition of the coating. Among the five versions, according to the chemical composition and mechanical properties, 4th version showed the best though insufficient result, where the Titanium Oxide (Rutile) was 34.88%. Based on the results of the research, we determined to enrich smelter charge of electrode coating with rutile by 50-55%. The coating composition also includes the elements of high melting temperature, such as zirconium, vanadium, and niobium. They create new crystalline-formation centers, which impede the growth of granules and facilitate the formation of a fine-granule structure. This fact unambiguously indicates the advantage of the new electrode coating developed by us.

The basic properties and characteristics of the coating were studied, such as the solidity, viscosity, stabile lighting of the arc, the degree of moisturizing, the losses, while welding and burning, the possibility of removing the slag from the upper layer, the mechanical properties of the welded seam.

The study of the newly coated electrode and the viscosity of its melted slag showed that it does not actually differ from the viscosity of the melted slag of the rutile electrodes, in a short interval of temperature reduction its viscosity increases, and therefore, it can be used for welding in any spatial condition;

As a result of the study of mechanical strength it was revealed that its hardness does not differ from the mechanical strength of the coatings of "GK" type electrodes. The results showed that the increase in the burning temperature leads

to the decrease in solidity by about 24%. The optimum temperature of burning is 200-250°C;

As a result of the study of the heuristic collapse of the coating, it was established that in our case the quality of hydration in the case of GK-type electrodes is 1.16% on average.

During the primary and secondary ignition of the electric arc, the electrode comes into touch with the metal and the circle is easily joined together, the secondary inflammation is reliable, the coating adequately melts, the stable excitation of the electric arc is caused by the elements with low ionization potential in the coating: calium and calcium injection;

The losses, while welding and burning electrode metal are about 2,75% less than the "GK" type of electrode.

The results of the mechanical examination of welded slag showed that the slag-metal welded with the coated electrode formed from adding Titan oxide to the ore of Kaspy is characterized by high density and plasticity. Specifically, the density limit is 11.4%, the flowability limit is 7,8%, and the shock viscosity - 10.5%, and the relative lengthening - 55% exceeds the features of slag generated by "GK" electrodes.

შინაარსი

შესავალი.....	20
1. ლიტერატურის მიმოხილვა.....	26
1.1. ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების დანაფარ- რისადმი წაყენებული მოთხოვნები და დახასიათება.....	26
1.2. დანაფარის შემადგენლობის გავლენა შენადული ნაკერის თვისებებზე.....	33
1.3. საქართველოში გამოყენებული LG და GK ტიპის ელექტრო- დებით საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შედუღებისას არსებული პრობლემების მიმოხილვა	41
1.4. საქართველოში არსებული საბადოების მიმოხილვა და ნედლეულის გამოყენების პოტენციური შესაძლებლობები ელექტროდის დანაფარის დამზადებისათვის.....	44
2. შედეგები და მათი განსჯა.....	54
2.1. კვლევის ამოცანები და მეთოდიკა	54
2.2. საქართველოში არსებული ნედლეულის მინერალო- გიური და ქიმიური კვლევა.....	57
2.3. ახალი საელექტროდო დანაფარის შემადგენლობის შემუშავება.....	64
2.4. საელექტროდო დანაფარის თვისებების კვლევა	69
2.4.1. ახალი დანაფარის დნობისას წარმოქმნილი თხევადი წიდის სიბლანტის კვლევა.....	69
2.4.2. დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის კვლევა და დანაფარის მიერ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარის (დანაფარის ჰიგროსკოპულობა) შესწავლა.....	73
2.4.3. ახალი დანაფარის ელექტროდით განმეორებითი ანთების შესწავლა.....	78
2.4.4. ახალი დანაფარიანი ელექტროდის ამოწვასა და გაშხეფ-	

ბაზე დანაკარგების კვლევა.....	81
2.5. შენადული ნაკერის მეტალოგრაფიული და მექანიკური თვისებების კვლევა	84
დასკვნა.....	106
გამოყენებული ლიტერატურა.....	109
დანართი.....	118

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. CB-08 მარკის საშემდუღებლო მავთულის ქიმიური შემადგენლობა, %.....	42
ცხრილი 2.“GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის შემადგენლობა, %...	42
ცხრილი 3. “GK”- ტიპის ელექტროდებით მიღებული შენადული ნაკერი მექანიკური მახასიათებლების საპასპორტო მონაცემები.....	43
ცხრილი 4. შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლები.....	44
ცხრილი 5. საქართველოს სახელმწიფოს ბალანსზე აღრიცხული მინერალური ნედლეულის ეკონომიკური პოტენციალი.....	45
ცხრილი 6. თელავის მარმარილოს ქიმიური შედგენილობა.....	49
ცხრილი 7 .მარმარილოს სტანდარტული ქიმიური შედგენილობა.....	49
ცხრილი 8. ქვიშის ქიმიური შემადგენლობა.....	49
ცხრილი 9. საჩხერის ქვიშის ქიმიური შემადგენლობა.....	50
ცხრილი 10. სტანდარტული ტალკის ქიმიური შემადგენლობა.....	50
ცხრილი 11. ზნაურის ტალკის ქიმიური შემცველობა.....	50
ცხრილი 12 . ტყიბულის კაოლინის ქიმიური შემცველობა.....	51
ცხრილი 13. ასკანის მადნის ქიმიური შემადგენლობა, %-ში.....	51
ცხრილი 14. გუმბრინის საბადოს ქიმიური შემადგენლობა, %-ში.....	51
ცხრილი 15. სერპენტინის შემადგებლობა, %-ში.....	52
ცხრილი 16. ჩრდილო კავკასიის საბადოს ქიმიური შემადგებლობა,.....	52
ცხრილი 17. თბილისის შემოგარენის მადნის შემცველობა, %-ში.....	52
ცხრილი 18. დანაფარის მასალები – სალათისფერი ნატეხები.....	52
..	
ცხრილი 19. დანაფარის მასალები – თეთრი ნატეხები.....	53

ცხრილი 20. კასპის მადნის ქიმიური შემადგენლობა , %.....	61
ცხრილი 21. კასპის მადანში ჟანგეულების შემცველობა, %.....	62
ცხრილი 22. თეთრი და სალათისფერი შერევით მიღებულ კაზმში ჟანგეულების შემცველობა, %.....	64
ცხრილი 23. მექანიკური გამოცდის შედეგები.....	66
ცხრილი 24 კასპის მადნისაგან ელექტროდების დანაფარების ვარიანტები.....	68
ცხრილი 25 გაუმჯობესებული დანაფარის ქიმიური შემადგენლობა %-ში.....	68
ცხრილი 26. რუტილის დანაფარის თხევადი წიდის ქიმიური შემადგენლობა,%.....	70
ცხრილი 27. თხევადი წიდის სიბლანტე.....	72
ცხრილი 28. საელექტროდო დანაფარის ღუნვაზე სიმტკიცის დამოკიდებულება გამოწვის ტემპერატურაზე.....	74
ცხრილი 29. დატენიანების ხარისხის შესწავლის შედეგები (პირველი ციკლი).....	76
ცხრილი 30. დატენიანების ხარისხის შესწავლის შედეგები (მეორე ციკლი).....	77
ცხრილი 31. ზოგიერთი ელემენტის იონიზაციის პოტენციალი.....	81
ცხრილი 32. ელექტროდის ამოწვასა და გაშხეფებაზე კვლევისა და ანგარიშების შედეგები.....	83
ცხრილი 33. დაბალნახშირბადიანი ფოლადის - ფლ. 3-ის ქიმიური შედგენილობა,%.....	89
ცხრილი 34. შესადუღებელი ლითონის მექანიკური მახასიათებლები.....	89
ცხრილი 35. შედუღების რეჟიმები.....	90
ცხრილი 36. შენადული ნაკერის მექანიკური თვისები.....	95

ცხრილი 37. მექანიკური გამოცდის შედეგები.....	96
ცხრილი 38. შენადული ნაკერის ქიმიური შემცველობა, %-ში (გაუმჯობესებული).....	96

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1 . საქართველოს გეოლოგიური სქემა.....	46
ნახ.2. საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებული შედუღების ელექტროდის დანაფარში საჭირო ძირითად ელემენტთა რაოდენობრივი მაჩვენებლები.....	53
ნახ. 3. კასპის მადნის ქიმიური შემცველობა, %-ში.....	59
ნახ. 4. კაოლინური თიხა.....	60
ნახ. 5. ნატეხური წარმოშობის თიხოვანი ქანი.....	60
ნახ. 6. ნიმუში N3-კაოლინური თიხა ორგანოგენული მასალით.....	61
ნახ. 7. ელექტროდების პრესის სქემა.....	65
ნახ. 8. მიკროხეხი $\times 200$	67
ნახ. 9. გამდნარი წიდის კვლევის სტოქსის მეთოდი.....	71
ნახ.10. დინამიკური სიბლანტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.....	72
ნახ. 11 სამწერტილოვანი ღუნვის მეთოდის სქემა.....	73
ნახ. 12. დანაფარის ღუნვაზე სიმტკიცის ზღვრის დამოკიდებულება	75
ნახ. 13. დატენიანების ხარისხის დამოკიდებულება დატენიანების დროზე.....	78
ნახ. 14. გაშხეფვისა და ამოწვის დამოკიდებულება შედუღების დენის ძალაზე.....	84
ნახ. 15. ტესტური შეერთების ნიმუში.....	86
ნახ. 16. შენადული ნაკერები.....	87
ნახ. 17. შენადული ნაკერის, მიმდებარე არეებისა და ფუძე ლითონის.....	88
ნახ. 18. ელექტროდების პრესის სქემა.....	91
ნახ. 19. ტიტანის ჟანგით გამდიდრებული (IV ვარიანტი) დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა $\times 360$	91
ნახ. 20. შენადული ნაკერის მიკროხეხი.....	92

ნახ. 21. შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა.....	92
ნახ. 22. შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა.....	93
ნახ. 23. კუთხური ნაკერის წერტილების განლაგება.....	93
ნახ.24. კუთხური ნაკერის მიკროსტრუქტურა წერტილების მიხედვით.....	94
ნახ. 25. ტიტანის ჟანგით გამდიდრებული (IV ვარიანტი) დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა x360	97
ნახ. 26. შენადული ნაკერის მიკროხეხი.....	97
ნახ. 27. შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა.....	98
ნახ. 28. შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა:	100
ნახ. 29. კუთხური ნაკერის წერტილების განლაგება	102
ნახ. 30.კუთხური ნაკერის მიკროსტრუქტურა წერტილების მიხედვით.....	104

.

დანართები

ცხრილი 1. “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის რუხი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა.....	119
ცხრილი 2. “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის სალათისფერი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა.....	121
ცხრილი 3. “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის თეთრი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა.....	122
სურ.1 პატენტი.....	124

მადლიერება

მადლობასა და პატივისცემას იმსახურებენ პროფესორ-ემერეტუსი არტურ სულამანიძე და აკადემიური დოქტორი გურამ დადიანიძე. პირველმა იმიტომ, რომ ასაკის მიუხედავად, ნდობა გამომიცხადა ოცნების ასრულებაში. ორივემ ერთად კი დიდი დახმარება გამიწია სამუშაოს თეორიული და ექსპერიმენტული ნაწილის შესრულებისას.

მადლობელი ვარ ჩემი მეგობრის, ფერადი ლითონების მეტალურგიის მიმართულების ლაბორატორიის უფროსის ნოდარ ვაჩეიშვილისა, რომელიც ყოველთვის გვერდში მედგა და მეხმარებოდა მექანიკური სამუშაოების შესრულებაში.

დიდ პატივისცემას იმსახურებას პროფესორი იზოლდა კახნიაშვილი ეს დაუზარელი ქალბატონი დაულალავად მუშაობდა რენტგენოფლოუორესცენტულ ანალიზატორზე 12 მადნეულის საბადოს კაზმების ქიმიური ანალიზი და მათი შედგენილობის დასკვნები რომ დროულად მოემზადებინა.

შესავალი

თემის აქტუალურობა. გასული საუკუნის 80-იანი წლების ბოლოს, სსრკ-ს დაშლის შემდეგ, პოსტსაბჭოთა სივრცეში არსებული ეკონომიკური კრიზისის პირობებში ელექტროდების ბაზარზე შეიქმნა მწვავე დეფიციტი. გაჩნდა მოთხოვნილება ელექტროდების დამამზადებელი მცირე საწარმოების შექმნისა და მათი წარმატებით ფუნქციონირებისა. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ პერიოდში დაიწყო თურქეთიდან, შემდეგ კი ირანიდან ხელით ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების იმპორტი, რომელთა ხარისხი დაბალია საბჭოთა კავშირში წარმოებულ ელექტროდებთან შედარებით.

საქართველოში მოქმედი მრავალ საწარმოში ფართოდ გამოიყენება ხელით და ნახევარავტომატური ელექტრორკალური შედუღება. ასეთ საწარმოებს მიეკუთვნება: ელმავამშენებელი, ვაგონშემკეთებელი, საავიაციო ქარხნები და სხვა. ასევე ვითარდება სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობა, სადაც სამუშაოების დიდი ნაწილი, სწორედ ხელით ელექტრორკალურ შედუღებას ეკუთვნის. ამასთან, საქართველოს ტერიტორიაზე გამავალი მსოფლიო მნიშვნელობის ნავთობ და გაზსადენზე, ხშირად ტარდება საშემდუღებლო - სარემონტო - აღდგენითი სამუშაოები. ეს მოითხოვს საშემდუღებლო წარმოების შემდგომ განვითარებას. მსოფლიო ბაზარზე საშემდუღებლო მასალები საკმაოდ ძვირადღირებულია და ჩვენი ქვეყნის ეკონომიკური მდგომარეობიდან გამომდინარე, აუცილებელია მათი ადგილობრივი წარმოება. უპირველეს ყოვლისა, ყურადღება უნდა მიექცეს შედუღების ელექტროდების წარმოებას ადგილობრივი ნედლეულის ბაზარზე, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს მათ თვითღირებულებას. შესადუღებელი მასალის ქიმიური შემადგენლობა, მოთხოვნები ნაკერის მექანიკური თვისებების მიმართ და სხვა განსაზღვრავს გამოშვებული ელექტროდების ნომენკლატურას. საქართველოში შენადუღ კონსტრუქციათა დამზადებისას ძირითადად გამოიყენება დაბალი და საშუალონახშირბადიანი ფოლადები, ამიტომ აქტუალურია ამ ფოლადების ხელით შედუღების ელექტროდების შემუშავება და სერიულ წარმოებაში ჩაშვება. აქვე გვინდა აღვნიშნოთ, რომ დღეს გამოი-

ყენება თურქეთიდან და ირანიდან შემოტანილი ძვირადღირებული და საშუალო ხარისხის ელექტროდები, რომლებიც ვერ უზრუნვეყოფს შენადუ-ლი ნაკერის მაღალ ხარისხს, კერძოდ, ნაკერის სიმტკიცეს. ჩვენს მიერ ჩატა-რებული მექანიკური გამოცდების დროს, გაგლეჯა ხდებოდა შენადულ ნა-კერში. პასუხსაგები კონსტრუქციების შედულებისას ამ ელექტროდების გა-მოყენება არ არის რეკომენდირებული.

შედულების პროცესის ეფექტურობის გასაზრდელად საქართველოში არსებული რესურსების ბაზაზე ელექტროდის ახალი დანაფარის შემადგენ-ლობის შემუშავება, მისი ტექნოლოგიურ შესაძლებლობათა გამოკვლევა, შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლების შესწავლა და ტექნოლო-გიური რეკომენდაციების შემუშავება სადღეისოდ წარმოადგენს მეტად აქ-ტუალურ ამოცანას.

სამუშაოს მიზანი. სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს:

- საქართველოში არსებული მადნეული რესურსების შესწავლა და მა-თი ვარგისიანობის დადგენა ელექტროდის დანაფარისათვის ნედლე-ულად გამოყენების თვალსაზრისით;
- მიღებული შედეგების საფუძველზე ხელით ელექტრორკალური შე-დულების ელექტროდებისათვის ახალი დანაფარის შემადგენლობის შემუშავება, საქართველოში გამოყენებულ ანალოგებთან შედარებით გაუმჯობესებული მახასიათებლებით;
- მაღალი ხარისხის ნაკერის მიღება და შედულების ტექნოლოგიურ შესაძლებლობათა გაფართოება [1].

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ობიექტს წარმოადგენს საქართველოს 12 საბადოში არსებული მადნის ნედ-ლეულის შესწავლა (არსებული და დადასტურებული ინფორმაციის საფუძ-ველზე) და ელექტროდის დანაფარის დასამზადებლად გამოყენების ვარგი-სიანობის დადგენა. შერჩეული მადნეულის ბაზაზე დამზადებული ხელით ელექტრორკალური შედულების ელექტროდის ახალი დანაფარი გაუმჯო-

ბესებულის მახასიათებლებით და ამ ელექტროდით შედუღებული ნაკერის მექანიკური თვისებები და ხარისხი.

მადანთა ნედლეულის ქიმიური შემადგენლობის შესწავლა წარმოებდა “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლოუორესცენტული და სპექტრული ანალიზატორების გამოყენებით.

დანაფარის მახასიათებლების და ნაკერის ხარისხის შესწავლა, ხშირ შემთხვევებში წარმოებდა კომპლექსურად, რაც გულისხმობს იმ ფაქტს, რომ შედუღების პროცესში მიმდინარეობდა დაკვირვება დანაფარის მახასიათებლებზე.

გამდნარი წიდის სიბლანტის გასაზომად გამოვიყენეთ სტოქსის მეთოდი. მეთოდი მდგომარეობს მცირე ზომის სხეულების სითხეში ვარდნის სიჩქარის გაზომვაში. გრაფიტისაგან დამზადებულ ტიგელში თავსდება დანაფარის კაზმი და იდგმევა ინდუქციურ ლუმელში, სადაც ის დნება. შემდეგ მიღებულ თხევად გარემოში ვაგდებით ტიტანისაგან დამზადებულ გარკვეული მოცულობის ცილინდრის ფორმის სხეულებს. წამზომის საშუალებით ვზომავთ ვარდნის დროს და ვიცით, რა სიღრმე, ვანგარიშობთ ვარდნის სიჩქარეს. ვითვალისწინებთ სითხეში სხეულზე მოქმედი სიმძიმის, არქიმედეს და სითხის წინააღმდეგობის ძალების გამოსათვლელ ფორმულებს და ვანგარიშობთ სიბლანტეს

დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის შემოწმებას ვაწარმოებდით ორი გზით:

1. დამზადებული ელექტროდების ფოლადის ფილაზე 0.5 მ, 1 მ და 1,5 მ სიმაღლიდან ბრტყლად ვარდნისას მიღებული შედეგების მიხედვით;
2. დანაფარის კაზმისაგან დამზადებული ცილინდრული ფორმის ნიმუშების მექანიკური სიმტკიცე განისაზღვრებოდა სამწერტილო-ვანი ლუნვის მეთოდის გამოყენებით. ნიმუშები მიიღებოდა ტიგელში გამდნარი მასის კაპილარული ექსტრუზიით ლაბორატორიული ვაკუუმური ტუმბოს საშუალებით. ნიმუში მაგრდებოდა სპეციალურ-

რად დამზადებულ საყრდენებზე, ხოლო მის ცენტრზე კი ვმოქმედებ-
დით გარკვეული მასის საწონებით და ვზომავდით ლუნვის სიდიდეს,
რომლის მიხედვითაც განისაზღვრებოდა მექანიკური სიმტკიცე.

დანაფარის მიერ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარის
(დანაფარის ჰიგროსკოპულობა) შესწავლისას გამოიყენებოდა ელექტროდე-
ბის აწონვის მეთოდი. ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდეები და “GK”-
ტიპის ელექტროდეები ღუმელში 100°C-ზე გამოწვის მერე იწონებოდა, და
გარკვეული დროის განმავლობაში ვათავსებდით ჰიდროსტატში, სადაც მიმ-
დინარეობდა მათი დატენიანება. შემდეგ კვლავ იწონებოდა და ვანგარიშო-
ბდით მასის ფარდობით ცვლილებას, რომლითაც შეიძლებოდა მსჯელობა
დატენიანების ხარისხზე.

ახალი დანაფარის ელექტროდით განმეორებითი ანთების შეფასება ეფუ-
ძნებოდა შემდეგ კრიტერიუმებს:

- დანაფარის მილისებური გამონაშვერის სრული გაცივების შემდეგ,
რღვევის გარეშე, რკალის მყისიერ ანთებას;
- მყისიერ ანთებას რკალის ანთების ხანმოკლე (10-30 წმ) შეწყვეტის შე-
მდეგ დანაფარის რღვევის გარეშე;
- შენელებულ ანთებას რკალის ანთების ხანმოკლე (10-30 წმ) შეწყვეტის
შემდეგ დანაფარის გამონაშვერის სრული რღვევის შემდეგ.

დანაკარგები ამოწვაზე და გაშხეფებაზე, შედუღებისას აღებული მონა-
ცემების საშუალებით განისაზღვრება.

შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურული კვლევა ჩატარდა მიკრო-
სკოპზე NEOFOT- 32- გადიდებებით X25 , X100 და X360.

შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების შესასწავლად დამზადე-
ბული იქნა სტანდარტული ბრტყელი ნიმუშები. გაჭიმვაზე გამოცდები
ჩატარდა FPZ – 100 ტიპის მანქანაზე. მიღებული შედეგების საფუძველზე
თეორიულად გავიანგარიშეთ შენადული ნაკერის ლითონის სიმტკიცისა და
პლასტიკურობის მაჩვენებლები: სიმტკიცის ზღვარი, დენადობის ზღვარი.
ფარდობითი წაგრძელება.

დარტყმითი სიბლანტე შევისწავლეთ სტანდარტული მეთოდით – დარტყმითი ღუნვით ქანქარა ურნალზე.

სისალის გაზომვები ჩატარდა TK – 2 ტიპის როკველის წნეხზე და PIMT - 3 ტიპის მიკროსისალის მზომ მიკროსკოპზე.

რკალის სტაბილური ნათება, წიდის ქერქის მოცილება მოწმდებოდა უშუალოდ შედუღების პროცესის შესრულებისას.

მეცნიერული სიახლე. შემუშავდა დაბალნახშირბადიანი და მცირედ-ლეგირებული ფოლადების ხელით ელექტრორკალური შედუღების რუტილიანი ელექტროდის ახალი დანაფარი, რომლის შემადგენლობაშიც შეყვანილია მაღალი დნობის ტემპერატურის მქონე ვანადიუმის, ცირკონიუმის და ნიობიუმის ოქსიდები,

დადგენილია მათი ოპტიმალური შემცველობა ელექტროდის დანაფარში და გავლენა როგორც ელექტროდის თვისებებზე, ისე შედუღების ნაკერის ფიზიკურ და მექანიკურ თვისებებზე.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგინდა, რომ შემუშავებული დანაფარიანი ელექტროდით შედუღებისას, მაგალითად, მასში არსებული ნიობიუმის, ვანადიუმის და ცირკონიუმის არსებობამ უზრუნველყო შენადული ნაკერის ლითონის წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღება. საგრძნობლად გაუმჯობესდა ნაკერის მექანიკური თვისებები, კერძოდ, გაიზარდა ნაკერის სიმტკიცე და პლასტიკურობა “GK” ტიპის ელექტროდებით მიღებული შენადული ნაკერის თვისებებთან შედარებით. უფრო გაადვილდა წიდის ქერქის მოცილება, მნიშვნელოვნად შემცირდა ლითონის გამხეფება. კალციუმისა და კალიუმის არსებობამ გამოიწვია იონიზაციის პოტენციალის შემცირება, გაიზარდა ელექტროდის ცივ ლითონთან კონტაქტის დროს რკალის განმეორებითი ანთების ალბათობა.

სადისერტაციო ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა. ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალი დანაფარიანი ელექტროდი, რომელიც განკუთვნილია დაბალნახშირბადიანი და მცირედლეგირებული ფოლადების საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შესადუღებლად და მზადდება ადგილობრივი

ნედლეულის ბაზაზე, გაუწევს მნიშვნელოვან კონკურენციას საქართველოში იმპორტირებულ ელექტროდებს მიღებული პროდუქციის მაღალი ხარისხით და საიმედოობით.

მიზანშეწონილია შემუშავებული ელექტროდებით შედუღდეს მაღალ წნევაზე (100 ატ-ზე მეტი) მომუშავე მაგისტრალური ნავთობის და ბუნებრივი აირის მილსადენები, გამოყენებულ იქნას ბინათმშენებლობაში, მანქანათმშენებლობის საწარმოებში.

სადისერტაციო ნაშრომის აპრობაცია და პუბლიკაციები. დისერტაციის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო სტუდენტთა მე-80 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. მიღებულია ერთი საქართველოს პატენტი და გამოქვეყნდა სამი სამეცნიერო სტატია.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1. ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების დანაფარისადმი წაყენებული მოთხოვნები და დახასიათება

შედუღება წარმოადგენს ერთდროულად მიმდინარე რამდენიმე პროცესის ერთობლიობას. ამ პროცესებს განეკუთვნება: შესადუღებელ ლითონზე და ნაკერმიმდებარე ზონაზე ელექტრული რკალის თბური ზემოქმედება, დნობა, მეტალურგიული პროცესები, შენადული ნაკერისა და მისი შელღობის ზონის კრისტალიზაცია. ლითონების შედუღებას განიხილავენ როგორც ფიზიკურ და ქიმიურ ტექნოლოგიურ პროცესს.

ხელით ელ.რკალურ შედუღებაში გამოიყენება ელექტროდები, რომლებიც შედგება ლითონის გულარისა და დანაფარისაგან. ხელით ელექტრორკალური შედუღებისას ელექტროდის შერჩევის პრინციპი დამოკიდებულია შემდეგი პირობების უზრუნველყოფაზე:

- შენადულ ნაკერში ფორებისა და წიდური ჩანართების არ არსებობა ან მათი მინიმალური ზომებისა და რაოდენობის უზრუნველყოფა ნაკერის სიგრძის ერთეულზე;
- ცივი და ცხელი ბზარების თავიდან აცილება;
- ნაკერის ლითონის განსაზღვრული მექანიკური თვისებების მიღება;
- ნაკერის ლითონის სპეციალური თვისებების მიღება;
- ელექტროდების დამაკმაყოფილებელი სან-ჰიგიენური მახასიათებლები.

აღნიშნული პირობების უზრუნველყოფა მიიღწევა ელექტროდის ღეროსა და ელექტროდის დანაფარის შემადგენლობის სწორი შერჩევით. დანაფარი წარმოადგენს რთულ მრავალკომპონენტულ სისტემას, რომლის შემადგენლობაში შემავალ ელემენტებს ეკისრებათ ტექნოლოგიური და მეტალურგიული ფუნქციები. შედუღების პროცესში თითოეულ კომპონენტს შეუძლია შეასრულოს ერთდროულად რამდენიმე ფუნქცია.

ელექტროდის დანაფარებმა უნდა უზრუნველყოს შენადული ნაკერის სრულფასოვანი ფორმირება, რკალის აღზნება და მდგრადი ნათება, ნაკერის წინასწარ განსაზღვრული ქიმიური შემადგენლობისა და თვისებების მიღება, დეფექტების წარმოქმნის თავიდან აცილება, გაშხეფებაზე და ამოწვაზე ელექტროდის მინიმალური დანაკარგები, ელექტროდის ღეროსა და დანაფარის თანაბარი დნობა, ნაკერის ზედაპირიდან წიდის ქერქის ადვილი მოცილება, მავნე აირებისა და მტვრის მინიმალური გამოყოფა გარემოში, ნაკერის ლითონის ლეგირება, რაფინირება და სხვა [2÷10]. აქედან გამომდინარე შეიძლება ჩამოვაცალიბოთ დანაფარის ძირითადი ფუნქციები:

1. შედუღების ზონის იონიზაცია;
2. ნაკერის უზრუნველყოფა აორთქლებულ ელემენტთა შევსებით;
3. რკალის სტაბილიზაციის პირობების შექმნა;
4. შედუღების აბაზანის დაცვა ატმოსფერული გარემოდან მავნე ელემენტების შეჭრისაგან;
5. ნაკერის ლეგირება სხვადასხვა ელემენტებით და შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება.

ზემოთ მოყვანილი პირობებისა და ფუნქციების დასაკმაყოფილებლად ელექტროდების დანაფარებში შეჰყავთ შემდეგი სახის ნივთიერებები: წიდის წარმომქმნელი, აირწარმომქმნელი, მასტაბილიზებელი, მალეგირებელი, განმჟანგავი და შემკვრელი.

წიდის წარმომქმნელ ნივთიერებებს მიეკუთვნება მანგანუმი, ტიტანი, გემატიტი, რუტილის კონცენტრატები, მინდვრის შპატი, კვარციტები, მარმარილო და სხვა. მათი დნობისას წარმოიქმნება წიდა, რომელიც შედუღების აბაზანას იცავს გარემო ატმოსფეროს მავნე ზემოქმედებისაგან. ასევე ამცირებს ნაკერის ლითონის გაცივებისა და გამყარების სიჩქარეს.

წიდის შემადგენლობაში შემავალი კომპონენტები იყოფა შემდეგ ძირითად ჯგუფებად: მჟავა (TiO_2 , SiO_2 , P_2O_5 და სხვ.), ფუძე (CaO , MgO , MnO , K_2O და სხვ.), ამფოტერული (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , და სხვ.), ოქსიდები და ნეიტრა-

ლური მარილები (Na_3AlF_6 , KC , CaF_2 და სხვ.). წიდების ტიპი განისაზღვრება შემდეგი ფარდობით [11, 12]:

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + Li_2O + 0,5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5(Al_2O_3 + TiO + ZrO_2)}$$

თუ $B < 1$, მაშინ წიდა ითვლება მჟავად, ანუ წიდაში მჟავა ოქსიდების, ჭარბი რაოდენობაა, რომლებიც შედიან ქიმიურ რეაქციაში გამდნარ ლითონთან. წიდებს, რომლებისთვისაც $B > 1$ ეწოდება ფუძე წიდები და თხევად ლითონთან ქიმიურ რეაქციაში შევლენ ფუძე ოქსიდები. წიდები, რომლებისთვისაც $B = 1$ ითვლება ნეიტრალურად.

განმჟანგველებად გამოიყენება ტიტანი, ალუმინი, სილიციუმი, მანგანუმი. ალუმინი დანაფარში შეჰყავთ ფხვნილის სახით, დანარჩენები კი ფერო-შენადნობების სახით. შედუღების პროცესში განმჟანგველები გამდნარ მდგომარეობაში ჟანგბადთან შედიან რეაქციაში და წარმოქმნიან ოქსიდებს, რომლებიც თხევად ლითონში არ იხსნება ან ხასიათდებიან მცირე ხსნადობით. წარმოქმნილი ოქსიდები შედუღების აბაზანის ზედაპირზე ამოტივტივების მერე წარმოქმნიან წიდას ან უერთდებიან უკვე წარმოქმნილი გამდნარი წიდის ფენას.

აირწარმოქმნილი ნივთიერებებია ოქსიცელულოზა, სახამებელი, მერქნის ფქვილი, მაგნეტიზი, დოლომიტი, კირქვა, ცარცი და სხვა. შედუღების პროცესში, დნობისას აირწარმოქმნილები იშლება და წარმოქმნიან აირად ატმოსფეროს, რომლის დანიშნულებაა შედუღების ზონიდან ჰაერის გამოძევება, რითაც თავიდან ვიცელებთ თხევად ლითონზე ჟანგბადისა და აზოტის მავნე ზემოქმედებას.

მასტაბილიზებელი ნივთიერებებია ტუტე და ტუტე-მიწა ლითონები: კალიუმი, ნატრიუმი და ბარიუმი. მათი შერჩევა განპირობებულია დაბალი იონიზაციის პოტენციალის გამო, რადგან რკალის ადგზნების სირთულე დამოკიდებულია მის მნიშვნელობაზე.

მნიშვნელოვანია დანაფარებში შეყვანილი მალეგირებელი ელემენტების თვისებები, რადგან მათი დანიშნულებაა შენადული ნაკერის მექანი-

კური თვისებების გაუმჯობესება ან ისეთი თვისებების მიღება, როგორცაა კოროზიამედეგობა, მხურვალმედეგობა და სხვა. განვიხილოთ თითოეული მათგანის ზემოქმედება შენადულ ნაკერზე.

მალეგირებელ ელემენტებად გამოიყენება ქრომი, ნიკელი, მოლიბდენი, ვანადიუმი, ვოლფრამი, ტიტანი, აგრეთვე მანგანუმი და სილიციუმი.

ქრომი დაბალნახშირბადიან ფოლადებში გვხვდება 0,3% რაოდენობით, საკონსტრუქციო ფოლადებში 0,7-3,5% ოდენობით, ქრომიან ფოლადებში – 12-18%, ქრომ-ნიკელიან ფოლადებში 9-35%. შედუღებისას ქრომი წარმოქმნის ქრომის კარბიდებს, აუარესებს კოროზიულ მედეგობას და მკვეთრად ზრდის სისაღეს თერმული გავლენის ზონაში, წარმოქმნის ძნელადდნობად ჟანგულებს და ართულებს შედუღების პროცესებს.

ნიკელი დაბალნახშირბადიან ფოლადებში გვხვდება 0,2-0,3% ოდენობით, საკონსტრუქციო ფოლადებში 1-5% ოდენობით, ლეგირებულ ფოლადებში 8-35%. ზოგიერთ შენადნობებში ნიკელი აღწევს 85%-ს. ნიკელი ზრდის პლასტიკურობასა და სიმტკიცის მახასიათებლებს ფოლადებში, აგრეთვე ხელს უწყობს სტრუქტურის დაწვრილმარცვლოვანებას.

მოლიბდენი ფოლადებში გვხვდება 0,15-0,8% ოდენობით, რომელიც ზრდის დარტყმით დატვირთვებს. აწვრილმარცვლოვანებს სტრუქტურას, მაგრამ, ხელს უწყობს ბზარების წარმოქმნას დადუღებულ ლითონში, ნაკერ-მიმდებარე და თერმული გავლენის ზონებში. შედუღების დროს აქტიურად იჟანგება და ამოიწვება.

ვანადიუმი სპეციალურ ფოლადებში 0,2-0,8%-მდეა, დატვიფრულ ფოლადებში კი – 1,0-1,5% რაოდენობით. ვანადიუმი ხელს უწყობს ფოლადის წრთობას, რითაც ხელს უშლის შედუღებას. მაღალ ტემპერატურებზე აქტიურად იჟანგება და ამოიწვება [13].

ვოლფრამი საიარალო და დატვიფრულ ფოლადებში გვხვდება 0,8-1,8%-მდე. ვოლფრამი მკვეთრად ზრდის სისაღეს ფოლადებში. აქ მისი შემცველობა იძლევა მაღალ ტემპერატურაზე მუშაობის საშუალებას, ხოლო შე-

დულების პროცესს ართულებს, ვინაიდან ვოლფრამი ხელს უწყობს კარბიდების წარმოქმნას.

ტიტანი და ნიობიუმი 0,5-1,0% ოდენობით შეყავთ ფოლადებში კოროზიამედეგობის ამაღლების მიზნით. კოროზიამედეგი ფოლადების შედულებისას ნიობიუმი იწვევს ცხელი ბზარების წარმოქმნას. ტიტანის ორჟანგი TiO_2 წარმოადგენს კარგ გამჟანგველს და დანაფარის შემადგენლობაში მისი არსებობა უზრუნველყოფს: რკალის სტაბილურობას; ხარისხიანი ნაკერის ფორმირებას; გაშხეფების სიმცირეს; წიდის ადვილად მოცილებას; აუმჯობესებს წიდის წარმოქმნას; აწვრილმარცვლოვანებს შედულების ადგილის სტრუქტურას [13÷18].

მანგანუმის შემცველობა ფოლადებში გვხვდება 0,3-0,8%-მდე, რომელიც არ უშლის შედულების პროცესს. საშუალო მანგანუმიან ფოლადებში, სადაც მანგანუმის შემცველობა 1,8-2,5%, იქმნება ბზარების წარმოქმნის საშიშროება, ვინაიდან მანგანუმის ზრდა იწვევს წრთობადი სტრუქტურის მიღებას და სიმტკიცის ზრდას, ხოლო ფოლადებში, სადაც მანგანუმი 11-16%-ის შემცველობით გვხვდება, მიმდინარეობს მანგანუმის ინტენსიური ამოწვა [19, 20];

სილიციუმი ფოლადებში გვხვდება 0,02-0,3% რაოდენობით და არ იწვევს სიძნელეებს შედულებისას. სპეციალურ ფოლადებში, სადაც სილიციუმის შემცველობა 0,8-1,5%-ია, შედულება გამწვანებულია ფოლადის თხიერდენადობისა და სილიციუმის ძნელმდნობი ჟანგეულების წარმოქმნის გამო. სილიციუმის ორჟანგი SiO_2 - მიეკუთვნება წიდაწარმომქმნელ კომპონენტებს, უზრუნველყოფს შენადული ნაკერის კარგ ფორმირებასა და წიდის ადვილად მოცილებას, ზრდის ნაკერის მექანიკურ თვისებებს, ხარისხსა და მწარმოებლურობას [13, 16];

კალციუმი აუმჯობესებს რკალის სტაბილიზაციას, იონიზაციის ხარისხსა და ელექტრონების ემისიას კათოდის ზედაპირიდან [15, 22];

საშემდულებლო სფეროში ხელით ელ.რკალური შედულებისათვის გამოყენებული ელექტროდები დანაფარების მიხედვით იყოფა ოთხ ძირი-

თად ჯგუფად. დანაფარების ხასიათი კი განისაზღვრება წიდაწარმომქნელების შემადგენლობით. ამ ჯგუფებს მიეკუთვნება:

1. **P** – მადანმჟავა (3-42 ტიპის მარკა IIM-7) ელექტროდები, რომლის დანაფარის შემადგენლობაში შედის ისეთი მადნები, რომლებიც შეიცავენ რკინისა და მანგანუმის (მარგანეცი) ოქსიდებს და სხვადასხვა ალუმოსილიკატებს (მინდვრის შპატი, გრანიტი და სხვ.). ისინი დნობის პროცესში საშემდუღებლო რკალში გამოყოფენ თავისუფალ ჟანგბადს, რაც განაპირობებს მათ ჟანგვით ბუნებას. მჟავა დანაფარების მაღალი ჟანგვითი პოტენციალი იწვევს მალეგირებელი ელემენტების დიდი რაოდენობით კარგვას, ამიტომ მისი გამოყენება მაღალლეგირებული ფოლადების შედუღებისათვის არ არის მიზანშეწონილი. ამავე დროს, თუ ფოლადში ნახშირბადის შემცველობა მეტია 0,15%-ზე, შენადული ნაკერის ლითონში ცხელი ბზარების წარმოქმნის შესაძლებლობა დიდია [22]. ამ ტიპის ელექტროდები არ გამოიყენება იმ ფოლადების შედუღებისათვის, რომლებიც მომატებული რაოდენობით შეიცავენ გოგირდს, რაც დაკავშირებულია მათი დესულფურაციის დაბალი უნარით. მადანმჟავე ელექტროდებით დადუღებული ლითონი ხასიათდება წყალბადის მაღალი კონცენტრაციით, რაც მაგალითად, ლეგირებული ფოლადების შედუღებისას ზრდის ცივი ბზარების წარმოქმნის საშიშროებას. მადანმჟავე ელექტროდები გამოიყენება მცირენახშირბადიანი ფოლადების ცვლად და მუდმივ დენებზე შედუღებისათვის.
2. **T** – რუტილის დანაფარიანი ელექტროდები ხასიათდება მაღალი საშემდუღებლო-ტექნოლოგიური თვისებებით, რომლებიც უზრუნველყოფენ ნაკერის მაღალ ხარისხს და დამაკმაყოფილებელ სან-ჰიგიენურ მახასიათებლებს. დანაფარის 45-50% პროცენტს შეადგენს ტიტანის ოქსიდი. ის ასევე შეიცავს მინერალურ სილიკატებს, კარბონატებს და მცირე ორგანულ დანამატებს. თავის მხრივ რუტილის ელექტროდები იყოფა ორ ქვეჯგუფად: რუტილოალუმინსილიკატური და რუტილო-

კარბონატული დანაფარებით. შემადგენლობაში კარბონატების მომატება დადუღებულ ლითონში იწვევს ჟანგადისა და კრემნიუმის (არალითონური ჩანართების) შემცირებას, რაც ხელს უწყობს დარტყმითი სიბლანტისა და ცხელი ბზარების წარმოქმნისადმი მდგრადობის ზრდას. რუტილის დანაფარიანი ელექტროდები უზრუნველყოფენ რკალის ნათების სტაბილურობას, როგორც ცვლად ისე მუდმივ დენზე შედუღებისას, გააჩნია გაშხეფების დაბალი კოეფიციენტი და ასევე სირთულეს არ წარმოადგენს წიდის ქერქის მოცილება [13]. ეს გამოწვეულია დნობის დროს ტიტანიტების კოაგულაციის მაღალი უნარით და თხევადი აბაზანის ზედაპირზე სწრაფი ამოტივტივებით. რუტილის ელექტროდების ერთ-ერთ უპირატესობას წარმოადგენს ელექტრული რკალის იოლი ანთება. ეს ელექტროდები ძირითადად გამოიყენება მცირენახშირბადიანი და მცირედლეგირებული ფოლადებისაგან საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შესადუღებლად. ის მიეკუთვნება 3-42 ტიპის ელექტროდებს მარკით OMA-2)

3. Φ – ფტორკალციუმიანი დანაფარით (3-42 ტიპის მარკა УОНИ-13/45)

ელექტროდებით შედუღებისას შედუღების აბაზანის დაცვა ხორციელდება კარბონატების დნობისას გამოყოფილი ნახშირორჟანგისა და ნახშირჟანგის საშუალებით. გამდნარი ლითონის განჟანგვა მიმდინარეობს დანაფარის შემადგენლობაში არსებული ფეროშენადნობების (ფერომანგანუმი, ფეროსილიციუმი) საშუალებით. ნაკერი ხასიათდება მაღალი პლასტიკურობით, დარტყმითი სიბლანტით, ცხელი ბზარებისადმი მცირე მიდრეკილებით და სხვა. ფტორკალციუმიანი ელექტროდები გამოიყენება მცირე და საშუალო ნახშირბადიანი პასუხსაგები კონსტრუქციების შესადუღებლად, მცირედ ლეგირებული ფოლადების, (მინუსიან ტემპერატურულ რეგიონებში ხარისხიანი ნაკერის მისაღებად), და მაღალნახშირბადიანი და გოგირდის შემცველი სქელი ლითონკონსტრუქციების შესადუღებლად.

4. **O** – ორგანული დანაფართ ელექტროდები შეიცავენ ისეთ ორგანულ ნივთიერებს, როგორცაა მაგალითად, პურის ფქვილი, ასევე შეიცავენ ტიტანის კონცენტრატს, მანგანუმის მადანს, ფერომანგანუმს, ფეროსილიციუმს და სხვ. დნობის პროცესში ორგანული ნივთიერებები იშლება და წარმოქმნიან დამცავი აირების დიდ რაოდენობას. წიდა-წარმომქნელებია რუტილი, კარბონატები, ალუმინოსილიკატები და სხვ. განმჟანგველად ძირითადად გამოიყენება ფერომანგანუმი. მათ უარყოფით მხარეებს განეკუთვნება ლითონის გაშეფების მაღალი კოეფიციენტი, ტენიანობისადმი დაბალი მდგრადობა და სხვ.

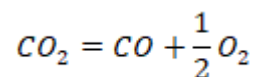
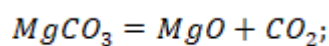
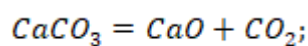
1.2. დანაფარის შემადგენლობის გავლენა შენადული ნაკერის თვისებებზე

ელექტროდის დანაფარის ქიმიური შემადგენლობა, ღეროსთან ერთად მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შენადული ნაკერის ლითონის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. შედუღების აბაზანაში მიმდინარე რთული მეტალურგიული და ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები განაპირობებენ ნაკერის სასურველი თვისებების ჩამოყალიბებას.

განვიხილოთ შედუღებისას თხევად ლითონში მიმდინარე პროცესების ზოგიერთი ძირითადი ასფექტები:

1. გამდნარი ლითონის მცირე მასა;
2. ლითონის თხევად მდგომარეობაში ყოფნის მცირე დრო;
3. გახურების მაღალი სიჩქარე;
4. შედუღების აბაზანის სხვადასხვა უბნებზე ტემპერატურების დიდი განსხვავება;
5. განჟანგვის, ლეგირების, რაფინირების და სხვა პროცესების მყისიერი მიმდინარეობა.

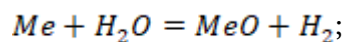
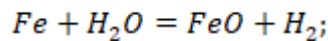
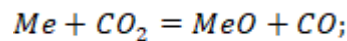
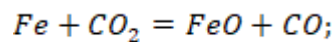
ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ასფექტები აჩქარებენ შედუღების აბაზანაში ფაზებს (აირული, წიდური და ლითონური) შორის ურთიერთქმედების მიმდინარე რეაქციებს, რაც დაკავშირებულია გამდნარი ლითონის მაღალ ტემპერატურასთან. მაგრამ, ვინაიდან გამდნარი ლითონის მცირე მოცულობის გაცივების სიჩქარე მაღალია, ამიტომ რეაქციები ვერ ასწრებენ დასრულებას და წონასწორული მდგომარეობის მიღწევას. აირული ფაზა შედგება იმ აირების ნარევისაგან, რომლებიც წარმოიქმნება ელექტროდის დანაფარში შემავალი აირწარმომქმნელი კომპონენტებისაგან და რკალის მიმდებარე უბანში გარემო ატმოსფეროდან შეღწეული ჰაერისაგან. ამასთან ერთად, აირული ფაზის შემადგენლობაში შედის ძირითადი ლითონისა და მალეგირებელი ელემენტების ორთქლი. აირულ ფაზის კომპონენტები გარკვეულ გავლენას ახდენენ ნაკერის ლითონის თვისებებზე. ამ კომპონენტებიდან, როგორც ცნობილია, ნაკერის ხარისხზე უარყოფით გავლენას ახდენენ ჟანგბადი, აზოტი და წყალბადი. შემდგომი კვლევებისათვის, აუცილებელია გარკვეულ იქნას ნაკერის ლითონში მათი შეღწევის მიზეზები. აირულ ფაზაში ჟანგბადის მოხვედრა შესაძლებელია გამოწვეული იყოს დანაფარის შემადგენლობაში კალიუმის და მაგნიუმის კარბონატების არსებობით. რომლებიც დისოციაციის პროცესში წარმოქმნიან ნახშირჟანგს, რომელიც თავის მხრივ დისოცირდება ჟანგბადის წარმოქმნით:



დატენიანებული ელექტროდები გამოყენებისას ელექტრული რკალის სითბური მოქმედების არეში წყლის ორთქლის დისოციაციისას წარმოიქმნება ჟანგბადი. ჟანგბადის ხსნადობა თხევად ლითონში დნობის ტემპერატურაზე შეადგენს დაახლოებით 0,175%-ს [23]. რაც მეტია თხევადი ლითონის ტემპერატურა, მით მეტია ხსნადობაც. ხსნადობის დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობის გადაჭარბებისას, ჟანგბადი იწვევს რკინისა და იმ მალეგირებელი

ელემენტების ჟანგვას, რომლებსაც გააჩნიათ მისდამი გაზრდილი სწრაფვა. ლითონში გახსნილი ჟანგბადი და მისი აქტივობა განსაზღვრავს განჟანგვის, რაფინირებისა და მეორადი ჟანგვის პროცესებს და ახდენს გავლენას ნაკერის ლითონის საბოლოო შემადგენლობაზე, სტრუქტურის ჩამოყალიბებაზე და თვისებებზე [24].

უნდა აღინიშნოს, რომ რკინისა და მალეგირებელი ელემენტების ჟანგვა ასევე შესაძლებელია მათი ურთიერთქმედებისას ნახშირორჟანგთან ან წყლის ორთქლთან:



წარმოქმნილი ოქსიდების ნაწილი გადადის წიდაში, ნაწილი კი რჩება ნაკერის ლითონში ოქსიდური დისპერსიული ჩანართების სახით. ეს არალითონური ჩანართები, ძირითადად განლაგებულია მარცვლების საზღვრებზე და უარყოფითად მოქმედებენ ნაკერის მექანიკურ თვისებებზე. კერძოდ, მნიშვნელოვნად ამცირებენ ლითონის პლასტიკურობას და სიმტკიცეს. ამიტომ მიზანშეწონილია, გამჟანგველების საშუალებით იქნას მინიმუმამდე დაყვანილი ჟანგბადის შემცველობა შედუღების აბაზანაში.

ერთფაზიანი სტრუქტურის ფოლადებისა და შენადნობების შედუღებისას, თერმული გავლენის ზონაში ბზარების წარმოქმნა დაკავშირებულია მარცვალთაშორის რღვევის პროცესებზე ჟანგბადის გავლენით. კერძოდ, კი პლასტიკურობის შემცირებასთან.

წყალბადის წყაროდ ძირითადად გვევლინება დატენიანებული ელექტროდების გამოყენება. ზემოთ ავღნიშნეთ, რომ ელექტრული რკალის სითბური მოქმედების არეში მიმდინარეობს ელექტროდიდან აორთქლებული წყლის დისოციაცია, რომლის დროსაც ჟანგბადთან ერთად წარმოიქმნება წყალბადი, რომელიც აირულ ფაზაში იმყოფება როგორც მოლეკულურ, ისე

ატომურ მდგომარეობაში. მისი ხსნადობა ლითონში დამოკიდებულია პარციალურ წნევაზე და გამდნარი ლითონის ტემპერატურაზე. თხევად ფოლადში დნობის ტემპერატურაზე და წყალბადის 101 კპა პარციალურ წნევაზე წყალბადის ხსნადობა შეადგენს 27,5-28 მლ-ს 100 გ რკინაზე. ტემპერატურის შემდგომი მომატებისას (2400-2500 °C) ხსნადობა იზრდება 42,5 მლ/100 გ-მდე [22]. მისი ხსნადობის შესამცირებლად დანაფარში შეჰყავთ მლხობი შპატი, რომელიც ააქტიურებს ფტორისა და წყალბადის ნაერთის მიღების რეაქციას, რომელიც ქიმიურად მდგრადი ნაერთია და არ იხსნება თხევად ლითონში. დანაფარში კარბონატების ან რკინისა და მარგანეცის ოქსიდების შეყვანა ხელს უწყობს წყალბადის პარციალური წნევის შემცირებას და შესაბამისად მცირდება მისი ხსნადობა თხევად ლითონში. დანაფარის მდგრადობას დატენიანებისადმი ზრდის ტუტე სილიკატების არსებობა, რადგან ისინი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ დანაფარის დეჰიდრატაციაზე. [25÷30]. წყალბადის ხსნადობაზე გავლენას ასევე ახდენენ მალეგირებელი ელემენტები. მათი გავლენა შესამჩნევი ხდება მხოლოდ მაღალი კონცენტრაციებისას. მაგალითად, ტიტანი, ცირკონიუმი და ვანადიუმი ზრდიან ხსნადობას, ხოლო სილიციუმი და ალუმინი ამცირებენ.

კრისტალიზაციის პროცესში იწყება წყალბადის გამოყოფა თხევადი ლითონიდან, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს ნაკერში ფორების წარმოქმნას და ამცირებს შენადული ნაკერის სიმტკიცეს. გახსნილი წყალბადის ნაწილი კი რჩება ნაკერის ლითონში, სადაც შეიძლება არსებობდეს შემდეგ მდგომარეობებში: 1. მოძრავი, რომელსაც შეუძლია გადაადგილება კრისტალურ გისოსში ტემპერატურათა, კონცენტრაციებისა და ძაბვების გრადიენტის პირობებში და აქვს დიფუნდირების უნარი; 2. ნარჩენი მოლეკულური წყალბადი, რომელიც გროვდება მაკრო და მიკროფორებში და არა აქვს დიფუნდირების უნარი. ნარჩენი წყალბადი ქმნის მაღალ წნევებს, რომელსაც შეუძლია ლითონში წარმოქმნას ჩანაგლეჯები, რომლებიც ხელს უწყობს ცივი ბზარების განვითარების ალბათობას. ასევე მცირდება შენადული შეერთების პლასტიკურობა [30, 31].

ზემოთ ავლნიშნეთ, რომ ნაკერის ლითონის დაწყალბადების ძირითადი მიზეზია ელექტროდების დანაფარების დატენიანება. ამ პროცესის შესამცირებლად გამოიყენება ელექტროდების გახურება, დანაფარის შემადგენლობიდან იმ ნივთიერებების ამოღება, რომლებიც შეიცავენ კრისტალიზაციურ ტენს, დანაფარის ისეთი კომპოზიციის შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს ფტორისა და წყალბადის ნაერთის მიღებას, ან ამცირებს მის პარციალურ წნევას.

ამგვარად, აირული ფაზა, რომელიც იცავს შენადულ ნაკერს მასში ჟანგბადის, აზოტისა და წყალბადის მოხვედრისაგან, ამავე დროს წარმოადგენს მათი წარმოქმნის წყაროს. ცხდია, რომ აუცილებელია შედუღების აბაზანის დაცვა ამ ელემენტების მოხვედრისაგან და არ დავუშვათ ლითონისათვის აუცილებელი ელემენტების ამოწვა.

შედუღებისას ხარისხიანი ნაკერის მიღება დამოკიდებულია წიდურ ფაზაზე. ის წარმოადგენს მინერალური ხასიათის ნადნობს, რომელიც ძირითადად შედგება ოქსიდებისაგან და სხვადასხვა მჟავების მარილებისაგან. წიდის ფუძის შემუშავებისას გათვალისწინებული უნდა იყოს მის შემადგენლობაში შემავალი ოქსიდებისა და სხვადასხვა შენაერთების თანაფარდობის გავლენა წიდის ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე. თხევად წიდურ ფაზაში, დნობის პროცესში წარმოიქმნება რთული ქიმიური ნაერთები, რომლებიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ნაკერის ლითონის თვისებებზე. წიდა ლითონთან ქმნის ორ ერთმანეთთან შეურევად სითხეს, რაც იძლევა ნაკერის დაცვის საშუალებას. წიდა გარდა დაცვისა ასევე ასრულებს ლითონის ლეგირებისა და რაფინირების ფუნქციას. წიდას გააჩნია თბოიზოლაციური თვისებები, რაც ხელს უწყობს ლითონის თხევად მდგომარეობაში ყოფნის დროის გაზრდას და ხელს უწყობს დეგაზაციის პროცესს. წიდის ფენებს შორის გაცივების სიჩქარეების განსხვავება იწვევს მათი განსხვავებული სტრუქტურების ჩამოყალიბებას. პირველი შრე, რომელიც უშუალოდ იმყოფება ნაკერთან შეხებაში ცივდება სწრაფად და წარმოქმნის მინისმაგვარ სტრუქტურას, ხოლო ზედა შრე თბოიზოლაციური თვისებების გამო

სრულად ან ნაწილობრივ არის დაკრისტალებული [32,33]. ეს განსხვავებები იმლევა წიდის ქერქის იოლად მოცილების საშუალებას. უკანასკნელი დამოკიდებულია წიდის ჟანგით პოტენციალზე, რომლის რეგულირებით შეიძლება გამოვრიცხოთ ოქსიდების შუალედური შრის წარმოქმნა. ქერქის მოცილება აგრეთვე დამოკიდებულია თხევადი ლითონისა და წიდის სიმკვრივეებზე, წრფივი გაფართოების ტემპერატურულ კოეფიციენტებს შორის განსხვავებაზე და წიდის გამყარების ტემპერატურაზე [34]. წიდის ერთ-ერთ მთავარ თვისებას წარმოადგენს მისი და ლითონის საზღვარზე ფაზათა-შორის დაჭიმულობა. ის განსაზღვრავს შენადული ნაკერის გარე ზედაპირის ფორმირებას. ამრიგად, დანაფარის შემადგენლობის შერჩევასა, ყველა შემთხვევაში მოყვანილი ფაქტორები უნდა იქნას გათვალისწინებული.

ელექტროდის დანაფარში გამჟანგველების არსებობა უზრუნველყოფს ნაკერის ლითონის განჟანგვას, რაც განაპირობებს თხევადი ლითონიდან როგორც გახსნილი, ისე ნაკერის ლითონში ოქსიდების სახით მყოფი ჟანგბადის განდევნას. ამისათვის დანაფარში ფეროშენადნობების სახით შეჰყავთ განმჟანგველები, რომლებსაც, რკინასთან შედარებით, მეტი აქვთ ჟანგბადისაკენ სწრაფვა. მაღალ ტემპერატურებზე (1800 -1900°C) ნახშირბადით მიმდინარე განჟანგვის პროცესი მიმდინარეობს გამდნარი ლითონის წვეთში და შედეგების აბაზანის წინა ნაწილში: $FeO + C = Fe + CO$; წარმოქმნილი ნახშირბადის ოქსიდი ატმოსფეროში გამოიყოფა აირად მდგომარეობაში და იწვევს შედეგების აბაზანის ძლიერ დუღილს და ნაკერის ლითონში ფორების წარმოქმნას [23]. იმისათვის, რომ თავიდან იქნას აცილებული ფორების მიღება, აუცილებელია აბაზანაში გაცილებით აქტიური განმჟანგველების შეყვანა [16]. მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნას კომპლექსური განჟანგვა. განმჟანგველების შემადგენლობა და კონცენტრაციები ისე უნდა შეირჩეს, რომ მიღებული ოქსიდების მიერ წარმოქმნილი ქიმიური ნაერთები ხასიათდებოდეს ძირითად ლითონთან შედარებით დნობის დაბალი ტემპერატურით. ამრიგად, დანაფარის შემადგენლობის სწორი შემუშავება უზ-

რუნველყოფს წარმოქმნილი წიდის საჭირო ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს და ნაკერის ლითონის მაღალ პლასტიკურ თვისებებს.

მაღალი ხარისხის ნაკერის მისაღებად, ასევე მნიშვნელოვანია ნაკერის ლითონის რაფინირება, რაც ფოლადებისათვის გამოიხატება მის გასუფთავებაში ფოსფორისა და გოგირდისაგან. ამისათვის, უნდა იყოს მიღებული გამდნარ ლითონში უხსნადი გოგირდის ქიმიური ნაერთები და გადაყვანილი წიდაში. გოგირდისა და ფოსფორის ლითონის სიმყიფეზე გავლენის ხარისხი დამოკიდებულია მარცვლოვან სტრუქტურაში ფოსფორის სეგრეგაციის ხარისხზე, სულფიდური ჩანართების ზომაზე, ფორმაზე და განაწილებაზე [35, 36]. გოგირდის მოცილების ეფექტურ გზას წარმოადგენს მაღალი სულფიდური ტევადობის წიდების გამოყენება. სასურველია, რომ შედუღების პროცესში შეიქმნას პირობები ლითონის ღრმა დესულფურაციისათვის. ფოსფორიც ანალოგიურ უარყოფით გავლენას ახდენს ნაკერის ლითონზე, მაგრამ მისგან განსხვავებით ის არამარტო წარმოქმნის დაბალი დნობის ტემპურატურის მქონე რკინის ფოსფიდებს და მის ევტექტიკებს, ასევე იხსნება რკინაში [37].

ნაკერის ლითონში არალითონური ჩანართები უარყოფითად მოქმედებენ შენადული შეერთების მექანიკურ თვისებებზე, განსაკუთრებით კი ლითონის მიდრეკილებაზე მყიფე რღვევისადმი. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ამ ჩანართების მიდებარე უბნებზე კონცენტრირდება ძაბვები, რომლებიც წარმოქმნიან პლასტიკური დეფორმაციის უბნებს.

ნაკერის ლითონის ლეგირება შესაძლებელია, როგორც დანაფარიდან, ისე საელექტროდო ღეროდან. ლეგირების საშუალებით მიიღწევა ნაკერის ლითონის სასურველი მექანიკური თვისებები. მაგალითად, ლითონის წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა განაპირობებს მისი სიმტკიცისა და პლასტიკურობის ზრდას. ლეგირების პერსპექტიულ და ეფექტურ მეთოდს წარმოადგენს კომპლექსური ლეგირება, ანუ ლითონში ელემენტების შეყვანა როგორც საელექტროდო ღეროდან, ისე მისი დანაფარიდან. მაგალითად, მინერალური შენადნობი, რომელიც შეიცავს ალუმინის ოქსიდს და მაქსიმა-

ლურად არის იზოლირებული თხევადი მინისაგან ხელს უშლის ლითონში ფორმის წარმოქმნას. ნაკერის ლითონისადმი ისეთი მოთხოვნების დაკმაყოფილება, როგორცაა სიბლანტე, ცივმედეგობა, ბზარმედეგობა დაკმაყოფილებული უნდა იყოს წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებით. ამისათვის კი ლეგირება უნდა მოხდეს დნობის მაღალი ტემპერატურის მქონე ლითონებით, რომლებიც ქმნიან კრისტალიზაციის ცენტრებს. მაგალითად, ტიტანის ოქსიდები და ცირკონიუმი მნიშვნელოვნად ამცირებენ პირველადი აუსტენიტური მარცვლის ზომას (50 მკმ-დე), გარდაქმნის არეს წანაცვლებენ დაბალი ტემპერატურების არისაკენ და ხელს უწყობენ ნემსისებური სტრუქტურის სრულ ფორმირებას (94-98%-მდე) [38].

სიმტკიცისა და პლასტიკურობის გაზრდისათვის მიზანშეწონილია ნაკერის ლითონის ლეგირება ისეთი ელემენტებით, რომლებიც წარმოქმნიან კარბიდებს შედუღების აბაზანის ლითონზე მეტი დნობის ტემპერატურით და იმ რაოდენობით, რომელიც არ აღემატება მათ ზღვრულ ხსნადობას აუსტენიტში. ასეთ ელემენტებს მიეკუთვნება მოლიბდენი, ვანადიუმი, ნიობიუმი [39]. მათი დაბალლეგირებულ ფოლადებში მცირე პროცენტული რაოდენობით შეყვანაც კი ანელებს აუსტენიტში მარცვლების ზრდის საზღვრების მიგრაციას [40].

იშვიათი მიწალითონებით ლეგირება, იძლევა გოგირდის, ჟანგბადისა და წყალბადის მავნე ზემოქმედების გაუვნებლობას, რაც აიხსნება მათი ამ ელემენტებისაკენ მაღალი სწრაფვით [41]. იშვიათი მიწალითონები ასევე უზრუნველყოფენ გამდნარი ლითონის კარგ ფორმირებას და მდორე გადასვლას შესადუღებელი დეტალის ლითონთან, ამასთან ხელს უწყობენ რკალის განმეორებით ანთებას და წიდის ადვილად მოცილებას.

ამრიგად, შენადული ნაკერის ლითონის ლეგირება ბევრად უფრო ეფექტური და ეკონომიურია კომბინირებული მეთოდით, ვინაიდან ასეთი ფართო სპექტრის ლითონების შეყვანა, ტექნიკურად გაცილებით ადვილია ელექტროდის დანაფარის კაზმის დამზადებისას.

1.3. საქართველოში გამოყენებული LG და GK ტიპის ელექტროდებით საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შედუღებისას არსებული პრობლემების მიმოხილვა

შესავალში ავლნიშნეთ, რომ საქართველოში გასული საუკუნის 90-იან წლებში ელექტროდების ბაზარზე შეიქმნა მწვავე დეფიციტი და დაიწყო თურქეთიდან, შემდეგ კი ირანიდან ხელით ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების იმპორტი. XXI სუკუნიდან კი და განსაკუთრებით ბოლო 10 წლის განმავლობაში საქართველოში მაღალი ტემპებით დაიწყო განვითარება ბინათშენებლობამ, კერძოდ კი მაღალსართულიანი კარკასული ტიპის კორპუსების (16 სართულზე მეტი) მშენებლობამ. შესაბამისად გაიზარდა მოთხოვნები შენადული შეერთებების სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მიმართ. მშენებლობებში ძირითადად გამოიყენება შველერები, კუთხოვანები და არმატურა, ეს უკანასკნელი კი არ დულდება. შველერებისა და კუთხოვანებისაგან დამზადებული კონსტრუქციები უნდა იყოს მტკიცე და მაღალი პლასტიკურობის მქონე, რომ გაუძლოს რკინაბეტონის მზარდ დატვირთვას და რაც უფრო მრავალსართულიანია კორპუსი, მით უფრო მკაცრია მოთხოვნა შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების მიმართ.

საერთაშორისო თანამედროვე მაგისტრალური მილსადენების (ნავთობ და გაზსადენები) ინტენსიური მშენებლობის განვითარებამაც მოითხოვა შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება. ეს დაკავშირებულია, ენერგომატარებლებზე გაზრდილი მოთხოვნის გამო, სამუშაო რეჟიმის ცვლილებასთან. კერძოდ, გასული საუკუნის 70-80-იან წლებში ნავთობ და გაზსადენებზე სამუშაო რეჟიმი შეადგენდა დაახლოებით 55 ატმ. მაგალითად, ირანის გაზი აზერბაიჯანის საზღვართან იყო 43 ატმ., ხოლო თბილისში 35-37 ატმ. გაზსადენის მშენებლობის ობიექტების ჩაბარებისას მათი პნევმოგამოცდა ტარდებოდა წნევაზე $55 \times 1,10 = 60,5$ ატმ., ხოლო ჰიდროგამოცდა - $55 \times 1,25 = 68,75$ ატმ. [9].

დღეს სამუშაო რეჟიმი შეადგენს 90 ატმ.-ს. პნევმო გამოცდა ტარდება წნევაზე $90 \times 1,10 = 99$ ატმ., ხოლო ჰიდრო გამოცდა - $90 \times 1,25 = 112,5$ ატმ. ამრიგად, გაზრდილი წნევა მოითხოვს ნაკერის მაღალ სიმტკიცესა და პლასტიკურობას (განსაკუთრებით ზამთრის პერიოდში). თურქეთიდან და ირანიდან შემოტანილი ძვირადღირებული და საშუალო ხარისხის ელექტროდები ვერ უზრუნვეყოფენ შენადული ნაკერის მაღალ ხარისხს, კერძოდ ნაკერის სიმტკიცეს და პლასტიკურობას და ასეთი პასუხსაგები კონსტრუქციების შედუღებისას ამ ელექტროდების გამოყენება ჩვენი აზრით არ არის რეკომენდირებული [8].

საქართველოს ბაზარი გაჯერებული იყო “LG”- ტიპის თურქული ელექტროდებით, რომელიც მოგვიანებით შეიცვალა “GK”- ტიპის ელექტროდებით ეს ელექტროდები განეკუთვნება რუტილის დანაფარიან ელექტროდებს და ISO 2560-A საერთაშორისო სტანდარტებით შეესაბამება E 42 0 RR 12 ტიპის ელექტროდებს, ხოლო ISO 2560-B-თი - E4313 A-ს.

ამ ტიპის ელექტროდებში ღეროდ გამოიყენება C_B-08 ტიპის საშემდუღებლო მავთული, რომლის ქიმიური შემადგენლობა ГОСТ 2246-70-ის შესაბამისად მოყვანილია ცხრილში 1.

ცხრილი 1. C_B-08 მარკის საშემდუღებლო ფოლადის ქიმიური შემადგენლობა, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu	Fe
≤0,1	≤0,3	0,35-0,60	≤0,15	≤0,3	0,03-0,04	0,03-0,04	≤0,25	დანარჩენი

“GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი 2. “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის შემადგენლობა, %

მინდვრის შპატი	რუტილი	მაგნეზიტი	დეგსტრინი	FeMn	თხევადი მინა
30	48	5	2	15	23-25

საპასპორტო მონაცემებით შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლების საორიენტაციო ზღვრები ნაჩვენებია ცხრილში 3.

ცხრილი 3. “GK”- ტიპის ელექტროდებით მიღებული შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლების საპასპორტო მონაცემები

სიმტკიცის ზღვარი, σ_B , მგპა	510-610
დენადობის ზღვარი, σ_T , მგპა	420-480
ფარდობითი წაგრძელება, δ %	≤ 22
დარტყმითი სიბლანტე, α_H , ჯ/მ ²	≤ 650

“GK”-ტიპის ელექტროდების გამოყენებისას არსებობს პრობლემები, რომელთა თავიდან აცილება, ისეთი საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შედუღებისას, როგორცაა მრავალსართულიანი შენობები და თანამედროვე მაგისტრალური მილსადენები წარმოადგენს მნიშვნელოვან ამოცანას. ამ პრობლემებს მიეკუთვნება:

- შედუღების წინ აუცილებელია მათი გამოშრობა და გამოწვა;
- გამოწვის შემდეგ ელექტროდების გამოყენება დასაშვებია 24 საათის შემდეგ;
- აუცილებელია შედუღების რეჟიმების ზუსტი დაცვა, წინააღმდეგ შემთხვევაში მათი თვისებები უარესდება;
- შენადული ნაკერის არასაკმარისი ლეგირება ისეთი ელემენტებით, რომლებიც ხელს უწყობენ სიმტკიცისა და პლასტიკურობის ზრდას.

ჩვენს მიერ წინასწარ ჩატარებული იქნა კვლევები ნაკერის ლითონის მექანიკური თვისებების შესასწავლად, რათა შეგვემოწმებინა ცხრილში 3 მოყვანილი მონაცემების სიზუსტე. კვლევის მეთოდოლოგიაზე შემდეგ თავში გვექნება საუბარი. ცხრილში 4 მოგვყავს კვლევის შედეგები. როგორც ცხრილიდან ვხედავთ სიმტკიცის ზღვარი მცირეა დაახლოებით 18-25 %-ით, ფარდობითი წაგრძელება დასაშვებ მინიმალურ მნიშვნელობაზე მცირეა 9-10% -ით. ამასთან ერთად მექანიკური გამოცდების დროს, გაგლეჯა მოხდა შენადულ ნაკერში. აქედან გამომდინარე, შენადული ნაკერის ლითონის ლეგირება აუცილებელია, მაგალითად მაღალი დნობის ტემპერატურის ელ-

ცხრილი 4. შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლები

სიმტკიცის ზღვარი, σ_B , მგპა	420
დენადობის ზღვარი, σ_T , მგპა	268
ფარდობითი წაგრძელება, δ %	20
დარტყმითი სიბლანტე, a_H ჯ/მ ²	950

მენტებით, რომლებიც ხელს უწყობენ წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას, რაც თავის მხრივ დადებითად მოქმედებს მექანიკურ თვისებებზე.

ერთ-ერთი პრობლემაა ელექტროდების გამოშრობა და გამოწვა, რაც დაკავშირებულია ელექტროდების დატენიანებასთან, რომლის მიზეზს წარმოადგენს დანაფარის შემადგენლობაში არსებული შემკვრელის - ტუტე სილიკატების მშრალი ნარჩენი. ცნობილია, რომ ტენის შთანთქმის დონე ნატრიუმის ან ნატრიუმ-კალიუმის შემკვრელების გამოყენებისას 8 სთ-ის განმავლობაში შეადგენს 0,6 – 0.8 %-ს, ხოლო კალიუმის ან კალიუმ-ნატრიუმის შემკვრელებისას - 1,1 %-ს.[42]. კვლევებით დადგინდა, რომ ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდის დანაფარის შემთხვევაში შემცირებული იყო დატენიანების ხარისხი. ამგვარად, ზემო თქმულიდან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ მტკიცე და პლასტიკური შენადული ნაკერის მიღებისათვის, დანაფარის თვისებების და ელექტროდის ტექნოლოგიური შესაძლებლობების გაუმჯობესებისათვის, მიზანშეწონილია შეიქმნას ახალ დანაფარიანი ელექტროდი საქართველოში მოპოვებული ნედლეულის ბაზაზე, რაც ასევე მოგვცემს მნიშვნელოვან ეკონომიურ ეფექტს.

1.4. საქართველოში არსებული საბადოების მიმოხილვა და ნედლეულის გამოყენების პოტენციური შესაძლებლობები ელექტროდის დანაფარის დამზადებისათვის

ხელით ელექტრორკალური შედუღებისას ნაკერის ჩამოყალიბებაზე, როგორც უკვე ავღნიშნეთ, ერთ-ერთ ძირითად დომინანტ გავლენას ახდენს შედუღების ელექტროდის დანაფარის შემადგენლობა და ფარდობითი წონა.

ვინაიდან, ჩვენი მიზანია შევქმნათ ელექტროდის ისეთი დანაფარი, რომელიც საქართველოში იმპორტირებული GK მარკის (90%) ელექტროდისაგან განსხვავებით უზრუნველყოფს გაზრდილი სიმტკიცისა და პლასტიკურობის შენადული ნაკერის მიღებას. ამ შედეგის მიღწევა კი დამოკიდებულია დანაფარის შემადგენლობაში შესაბამისი მალეგირებელი ელემენტების შეყვანით. ჩვენი მიზანია ასეთი დანაფარის შექმნა საქართველოში არსებული ნედლეულის ბაზაზე, რაც შენადული ნაკერის მაღალი ხარისხის გარდა, მნიშვნელოვნად შეამცირებს ელექტროდის დამაზადების თვითღირებულებას და დიდ წვლილს შეიტანს ქვეყნის ეკონომიკის განვითარებაში.

საქართველოში დიდი რაოდენობით არსებობს მინერალური ნედლეულის მდიდარი საბადოები. საქართველოს წიაღისეულ საბადოთა გეოლოგიურ რუქაზე (ნახ. 1) მითითებულია, ჩვენთვის საინტერესო, 12 ძირითადი საბადო: კასპის, საჩხერის, ასკანის, ბჟინევის, გუმბრინის, ზნაურის, თელავის, ტყიბულის, ზუგდიდის, თბილისის შემოგარენი, ჩრდილო-კავკასიის და ჭიათურის. აქვე ჩვენს მიერ განხილული და შესწავლილი იყო საქართველოს სახელმწიფოს ბალანსზე აღრიცხული მინერალური ნედლეულის ეკონომიკური პოტენციალი (ცხრილი 5) [43÷ 45]. როგორც ცხრილიდან ჩანს, საქართველო მდიდარია ფართო სპექტრის მინერალური ნედლეულით, რომელთაგან ბევრია ისეთი, რომელთა ფართო გამოყენება შესაძლებელია მეტალურგიულ წარმოებაში და მათ შორის საშემდუღებლო მასალების დამზადებისათვის. კერძოდ, საშემდუღებლო ფლუსების და ფხვნილგულა საშემდუღებლო მავთულების წარმოებაში.

ცხრილი 5. საქართველოს სახელმწიფოს ბალანსზე აღრიცხული მინერალური ნედლეულის ეკონომიკური პოტენციალი

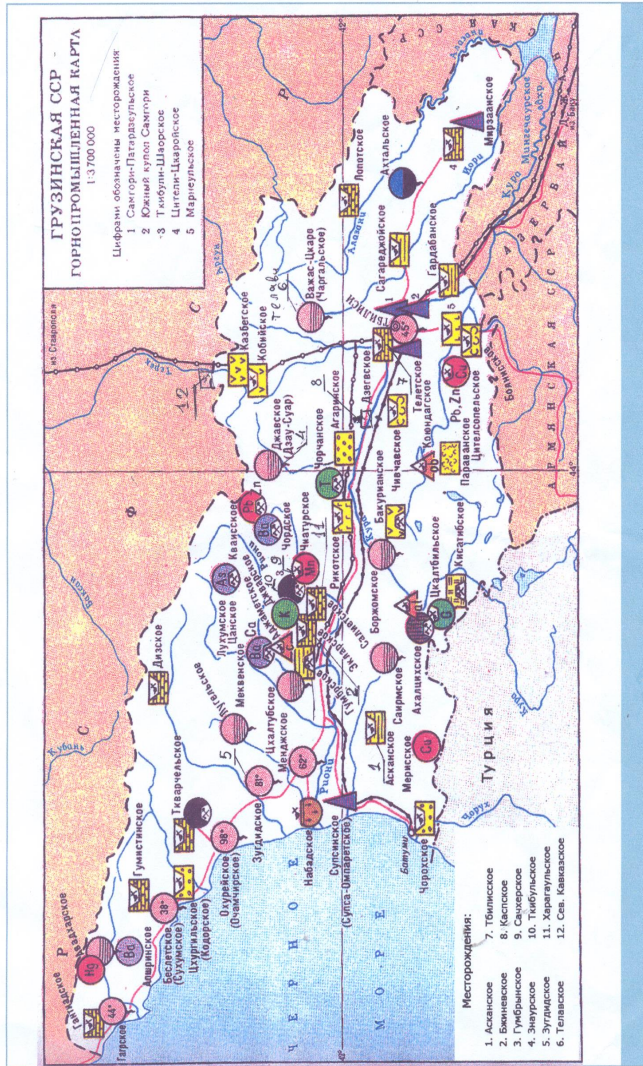
N	მინერალური ნედლეული	ღირებულება	
		მლრდ.აშშ. დოლარებში	პროცენტებში
1.	მოსაპირკეთებელი მასალები	10.75	20.77
2.	სასმელი წყლები (მტკნარი და მინერალურ-სამკურნალო სუფრის წყალი)	9	17.38
3.	სამკურნალო ბალნეოლოგიური მინერალური წყლები	-	-

4.	ქვანახშირი	7	13.52
5.	მანგანუმის მადანი	4.7	9.08
6.	ნავთობი	4.7	9.08
7.	ქვიშა-ხრეშის მასალები	3.64	7.03
8.	დიატომიტი	1.23	2.37
9.	ცეოლითები	1.23	2.37
10.	თერმული წყლები	1.2	2.3
11.	კალციტი	1.06	2.04
12.	პერლიტები	1.05	2.02
13.	ბუნებრივი საწვავი აირი	0.8	1.54
14.	ანდეზიტი	0.79	1.52
15.	სპილენძი	0.7	1.35
16.	კვარც-მინდვრის შპატთან ქვიშები	0.6	1.16
17.	ბენტონიტები	0.58	1.12
18.	ოქრო	0.55	1.06
19.	ბარიტი	0,47	0.90
20.	თუთია	0,4	0,77
21.	არამადნეული ნედლეულის მეტალურგიისა-თვის (დოლომიტები და სალუსე კიქვები)	0.38	0,73
22.	კერამიკული ნედლეული (ტრაქიტი, რიოლითი)	0.34	0.65
23.	ტყვია	0.2	0.38
24.	დარიშხანი	0.14	0,27
25.	ქვიშები მინის მრეწველობისათვის	0.13	0.25
26.	ბაზალტი (ქვასხმულისათვის)	0.06	0.11
27.	ვერცხლი	0.03	0.06
28.	სტიბიუმი	0.03	0.06
29.	სულ	51.76	100

საქართველოს ტერიტორიაზე არსებული საბადოები განსხვავდება მათში არსებული მადნეულის შემადგენლობით. დღეისათვის ცნობილი საბადოებიდან შეიძლება გამოვყოთ ზოგიერთი მათგანი: ახალციხის აუზი, ცნობილი მურა ნახშირის შემცველობით და წარმოადგენს ქვიშა – თიხნარის 180 მ სისქის დანალექ ფენას. მარაგი 1983 წლის მონაცემებით შეადგენს შეადგენს 70 მლნ. ტონას.

რკინის მადანით არის ცნობილი ბოლნისის საბადოები, სადაც მისი შემცველობა უბნების მიხედვით შეადგენს: (30–60%) + (1,5–60%)+(20–45%), ხოლო ჯამური მარაგი კი 36 მლნ. ტონას.

აჭარა-თრიალეთის ზონაში, ჭოროხი-სუფსის უბანზე, რომელიც წარმოადგენს 50 კმ სიგრძის შავი ზღვის სანაპირო ზოლს, გრუნტის შემადგენ-



ნახ. 1. საქართველოს გეოლოგიური სექცმა

წრეში ციფრით ნაჩვენებია წვადისეული საბადოები:

1. ასკანის, 2. ბუჩხევის, 3. გუმბრინის, 4. ზნაურის, 5. ზუგდიდი,
6. თელავის, 7. თბილისის, 8. კასპის 9. საჩხერის, 10.

ტყიბულის,

11. ხარაგაოლის, 12. ჩრდილოეთ აბაჯისის.

ლობის 3-5% -ს შეადგენს სპილენძი, ხოლო ქვიშაში რკინის შემცველობა არის 2-3%. რკინის მადნის ჯამური მარაგი კი შეადგენს 150 მლნ. ტონას.

მანგანუმის საბადოები მდებარეობს ჭიათურასა და მდინარე ყვირილას შესართავებში.

მანგანუმის ტიპების მიხედვით საპროგნოზო მარაგები შემდეგია:

- ა) ოქსიდური, საშუალოდ მანგანუმის შემადგენლობა: 25%.
 - ბ) კარბონატული: 17,3%.
 - გ) დაჟანგული: 20,4%.
- სულ: 62,7 მლნ. ტონა.

ბენტონიტური თიხნარი გრუნტი – (საბჭოთა პერიოდში მას თავისი ხარისხით მოწინავე პოზიციები ეკავა ანალოგიუ მასალებთან შედარებით). საქარ-

თველოში მოიპოვება:

გუმბრინში – ჰიდროდანალექის საბადოები.

ასკანაში – ვულკანური წარმოშობის.

გუმბრინის მადანის მარაგი: 6,5 მლნ. ტონა.

ასკანის: 10,6 მლნ. ტონა.

დიატომიტის რაოდენობა 1983 წლის მონაცემებით შეადგენს 10 მლნ. ტონას და მოიპოვება გოდერძის უღელტეხილზე, ახალციხის რაიონში (კი-სა-ტიბის საბადო)

ტალკი და სერპანტინით ($3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ცნობილია ბჟინევის საბადო, აგრეთვე მდინარე ძირულას აღმოსავლეთ მასივში მდებარე ჩონჩხანის საბადოთა ჯგუფი. ქვაშავის, თეთრი მინდორის, ჩემურის, უცლევის, წნელისის და სხვა მადნები. ტალკის დაზვერილი მასალების რაოდენობა (მარაგი): 2,2 მლნ. ტონა, სერპანტინის კი 2,9 მლნ მ³.

ვულკანური წარმოშობის თეძამის საბადოში, ტუფოქვიშნარი და ტუფობრიკეტული ცეილოტის შემცველობაა 30 - 60%, ხოლო ბალანსური მარაგი შეადგენს 4,8 მლნ. ტონას.

არასაბადობრივი ინდუსტრიალური ნედლეული წარმოდგენილია: დოლომიტების, დოლომიტიზირებული და ფლუსოვანების: კირის, ცეცხლგამძლე თიხნარის, კვარც-მინდვრის შპატის სახით. აბანოებისა და ტყვარჩელის – დოლომიტური ქანების საბადო (ჯავისა და გაგრის ზონა) განეკუთვნება დოლომიტისა და დოლომიტიზირებული კირის 1 და 2 კლასს. მარაგი 1983 წლის მონაცემების მიხედვით შეადგენს: აბანოების საბადო: 3,6 მლნ. ტონა (გამოსავალი: 7,5%); ტყვარჩელის საბადო: 83.2 მლნ. ტონა (გამოსავალი: 16%); წითელწყაროს საბადო (1983 წლის მონაცემები); ფლუსიანი კირის ბაზა რუსთავის მეტალურგიული კომბინატისთვის. მარაგი: 50 მლნ. ტონა (1983 წ.); ჭიათურის საბადო – ზესტაფონის ფეროშენადნობი ქარხნისთვის. მარაგი: 6 მლნ.მ³ [43].

ქვემოთ მოგვყავს, ზოგიერთი მადანის ნედლეულის ქიმიური შემადგენლობები.

ცხრილი 6. თელავის მარმარილოს ქიმიური შედგენილობა

კომპონენტების შემადგენლობა	შემცველობა, %-ში
CaCO ₃	90,1
MgO	1,5
SiO ₂	1,2
S	0,025
P	0,027
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0,6

როგორც ცნობილია, ელექტროდის დანაფარის წარმოებაში გამოყენებული მარმარილოს შემადგენლობა უნდა შეესაბამებოდეს GOCT 4416-72-ის ნორმებს, რომელიც მოცემულია ცხრილში 7.

თელავისა და სტანდარტული მარმარილოების შედარება გვიჩვენებს, რომ თელავის მარმარილო სტანდარტულისაგან უმნიშვნელოდ განსხვავდება.

ცხრილი 7. მარმარილოს სტანდარტული ქიმიური შედგენილობა

შემადგენლობის კომპონენტების ზოგიერთი მაჩვენებლები	მარკებისათვის ნორმები, %-ში	
	M-97M M-97K M-97B	M-92M M-92K M-92B
CaCO ₃ , არანაკლებ	97,0	92,0
MgO, არა უმეტეს	1,0	3,0
SiO ₂ , არა უმეტეს	0,7	2,0
S, არა უმეტეს	0,015	0,04
P, არა უმეტეს	0,015	0,015
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ , არა უმეტეს	0,5	არანორმიდებული

ელექტროდის დანაფარის წარმოებაში გამოყენებული ქვიშის SiO₂ GOCT 4417-75-ის მიხედვით განსაზღვრული შემადგენლობა წარმოდგენილია ცხრილში 8:

ცხრილი 8. ქვიშის ქიმიური შემადგენლობა

შემადგენელი კომპონენტები	პროცენტული რაოდენობა, %
SiO ₂	97,0
S	კვალი
P	0,15

საჩხერის ქვიშის ქიმიური შემადგენლობა კი მოცემულია ცხრილში 9. ამ ორი ცხრილის შედარება გვიჩვენებს, რომ საჩხერის ქვიშის მჭიმში შემადგენლობა სტანდარტულისგან უმნიშვნელოდ განსხვავდება.

ცხრილი 9. საჩხერის ქვიშის ქიმიური შემადგენლობა

შემადგენელი კომპონენტები	პროცენტული რაოდენობა
SiO ₂	95,0
S	0,15
P	0,23

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ელექტროდის დანაფარის წარმოებაში მარმარილოს და ქვიშის მსგავსად გამოიყენება ტალკი. ГОСТ 21234-75-ის მიხედვით არსებობს ორნაირი მარკის ტალკი TMK-28 და TMK-27. მათი ქიმიური შემადგენლობა მოცემულია ცხრილებში 10 და 11.

ცხრილებიდან ჩანს, რომ ზნაურის ტალკი ქიმიური შედგენილობით უმნიშვნელოდ განსხვავდება სტანდარტულისგან.

ელექტროდების დანაფარებში გამოიყენება კაოლინი, რომლის ქიმიური ფორმულაა: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. კაოლინის მარკებია KΦ-1, KΦЖ-2.

ცხრილი 10. სტანდარტული ტალკის ქიმიური შემადგენლობა

შემადგენლობის კომპონენტების ზოგიერთი მაჩვენებლები	რაოდენობა, %-ში	
	მარკა	
	TMK-28	TMK-27
MgO	28	27
Fe ₂ O ₃	5	6
CaO	5	6
მასის დანაკარგი შრობისას	6	7
სინესტის მასიური წილი	1	1
ნარჩენები ბადეზე	2	2

ცხრილი 11. ზნაურის ტალკის ქიმიური შემცველობა

კომპონენტების შემადგენლობა	შემცველობა, %-ში
MgO	24
Fe ₂ O ₃	4
CaO	3

ცხრილში 12 მოყვანილია ტყიბულის კაოლინის ქიმიური შემადგენლობა:

ცხრილი 12. ტყიბულის კაოლინის ქიმიური შემცველობა

კომპონენტების შემადგენლობა	შემცველობა, %-ში
Al ₂ O ₃	31,0
Fe ₂ O ₃	1,2
TiO ₂	0,5
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	1,1
CaO	0,5
SO ₃	0,7

ასკანის მადანი შეიცავს ისეთ ელემენტებს, რომლებიც გამოიყენება ელექტროდების დანაფარში, განსაკუთრებით კი ალუმინს, რომელიც კარგი გამჟანგველია, ასევე წიდაწარმომქმნელ ელემენტს სილიციუმს. აღნიშნული ელემენტები ასკანის მადანში ჟანგეულების სახითაა. ასკანის მადნის ქიმიური შემადგენლობა %-ში მოცემულია ცხრილში 13.

ცხრილი 13. ასკანის მადნის ქიმიური შემადგენლობა, %-ში

Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1,813	6,115	22,5	3,47	0,76	0,22	0,6	1,03
Zn	Zr	Cd	Sn	Sb	LE		
0,005	0,01	0,027	0,022	0,035	0,22		

გუმბრინის საბადო შეიცავს წიდაწარმომქმნელ და გამჟანგველ ელემენტებს (ცხრილი 14.).

ცხრილი 14. გუმბრინის საბადოს ქიმიური შემადგენლობა, %-ში

Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Cr
0,886	4,569	26,437	0,61	1,484	5,353	0,33	0,012

Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Zr	Cd
3,628	0,056	0,023	0,002	0,042	0,005	0,0162	0,085

Sn	Sb	LE
0,022	0,036	56

ბჟინევის სერპენტინიც შეიცავს გამჟანგველებს და წიდაწარმომქმნელ ელემენტებს. მისი ქიმიური შემადგენლობა % მოცემულია ცხრილში 15.

ჩრდილო კავკასიის საბადო კი, შეიცავს ფუბე ტიპის დაფარვისათვის აუცილებელ კომპონენტებს (ცხრილი 16).

ცხრილი 15. ზეინვის სერპენტინის შემადგებლობა, %-ში

Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	V
2,547	6,994	24,817	0,068	7,832	1,832	0,604	0,052
Cr	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As
0,016	0,120	8,58	0,023	0,006	0,0066	0,0141	0,0039
Zr	Cd	Sn	Sb	LE			
0,0192	0,100	0,027	0,045	46,717			

ცხრილი 16. ჩრდილო კავკასიის საბადოს ქიმიური შემადგებლობა, %-ში

CaCO ₃	CaO	FeMn	FeSi
54	15,0	5	5

თბილისის შემოგარენი- აეროპორტის გზისკენ, საბადო შეიცავს ისეთ ელემენტებს, რომელთა გამოყენება შეიძლება ელექტროდების დანაფარში (ცხრილი 17).

ცხრილი 17. თბილისის შემოგარენის მადნის შემცველობა, %-ში

Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Cr
0,912	4,353	17,7	0,029	4,729	24,265	0,220	0,015
Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Zr	Cd	
0,10	2,20	0,0037	0,054	0,042	0,0163	0,090	

კასპის რაიონში არსებული მადანი, თავისი ქიმიური შედგენილობით წარმოადგენს საუკეთესო ნედლეულს ელექტრორკალური შედუღების ელექტროდების ახალი დანაფარის შესაქმნელად. კასპის მადანი შედგება რუხი, ღია სალათისფერი და თეთრი ნატეხებისაგან, მათი ქიმიური შემადგენლობაც მთის სხვადასხვა ადგილას განსხვავებულია. ცხრილში 18 მოყვანილია სალათისფერი ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა, ხოლო თეთრი ნატეხების ცხრილში 19.

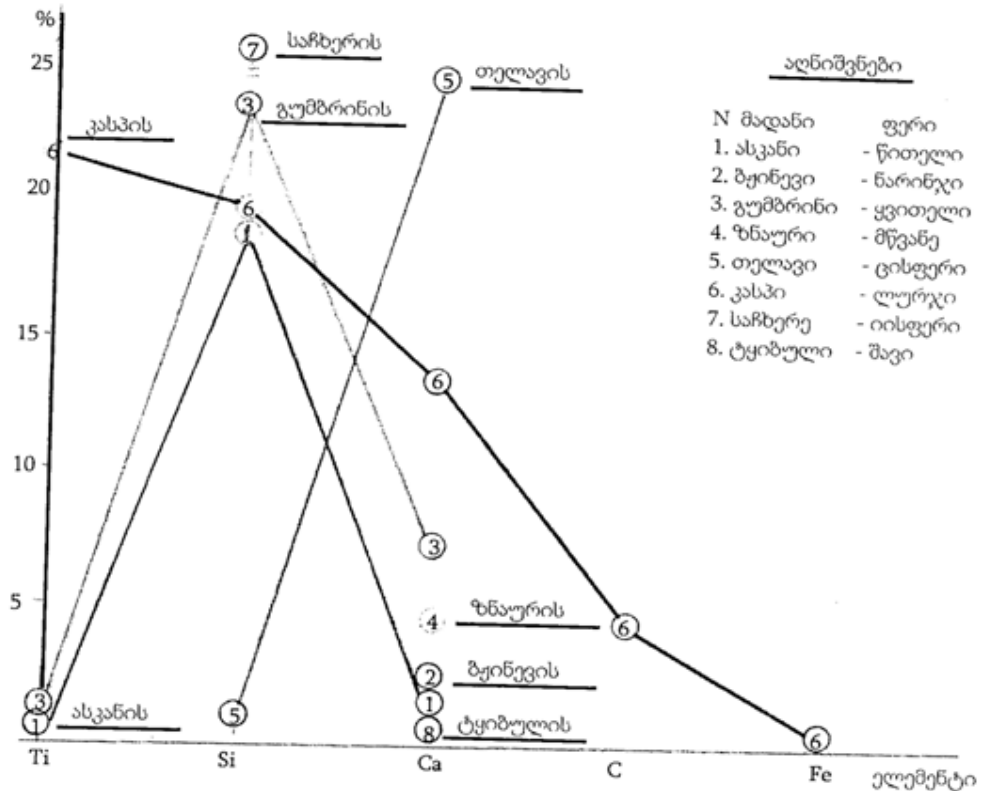
ცხრილი 18. კასპის მადანი- სალათისფერი ნატეხები

Ti	V	Mn	Fe	Zn	Nb	LE
22,00	0,36	5,47	10,44	0,096	0,079	61,56

ცხრილი 19. კასპის მადანი – თეთრი ნატეხები

Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	V
0,909	5,311	21,992	0,026	7,544	4,895	0,386	0,038

როგორც ზემოთ მოყვანილი ცხრილებიდან ვხედავთ, საქართველოში არსებული ნედლეულის რესურსების შემადგენლობის მრავალფეროვნება, იძლევა მათი გამოყენების საშუალებას ხელით ელ.რკალური შედუღების ელექტროდის მაღალხარისხიანი დანაფარის შესაქმნელად. ნახ.2-ზე, საბადოების მიხედვით წარმოდგენილია საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებულ დანაფარში შემავალი ძირითადი ელემენტების რაოდენობრივი მაჩვენებლები:



ნახ. 2. საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებული შედუღების ელექტროდის დანაფარში საჭირო ძირითად ელემენტთა რაოდენობრივი მაჩვენებლები

2. შედეგები და მათი განსჯა

2.1. კვლევის ამოცანები და მეთოდика

სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ობიექტს წარმოადგენს დაბალი და საშუალო ნახშირბადიანი ფოლადებისაგან საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების ხელით ელექტრორკალური შედუღებისათვის ელექტროდის ახალი დანაფარის შემუშავება საქართველოში არსებული ნედლეულის ბაზაზე, მისი მახასიათებლებისა და ტექნოლოგიური თვისებების კვლევა.

სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობის განმავლობაში ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა კვლევის შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

1. საქართველოს მადნეული რესურსების მინერალოგიური და ქიმიური კვლევა და ელექტროდის დანაფარის დასამზადებლად მათი ვარგისიანობის დადგენა;
2. დანაფარის ქიმიური შემადგენლობის შერჩევა;
3. ახალი დანაფარის დნობისას წარმოქმნილი თხევადი წიდის სიბლანტის კვლევა;
4. დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის კვლევა;
5. დანაფარის მიერ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარის (დანაფარის ჰიდროსკოპულობა) შესწავლა;
6. ელექტრული რკალის განმეორებითი ანთების შესწავლა;
7. ახალი დანაფარიანი ელექტროდის ამოწვაზე და გაშხეფებაზე დანაკარგების შესწავლა და შეფასება;
8. ახალი დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების კვლევა.

კვლევითი სამუშაოების შესრულებისას გამოყენებული იყო ცნობილი და კარგად აპრობირებული კვლევის მეთოდები.

საქართველოს მადნეული რესურსების მინერალოგიური და ქიმიური კვლევა ჩატარებული იქნა სტუ-ს სამთო-გეოლოგიურ ფაკულტეტის გეოლოგიისა და მინერალურ ნივთიერებათა კვლევის, დიაგნოსტიკისა და გადამუშავების რესპუბლიკურ ცენტრში. მადანთა ნედლეულის ქიმიური

შემადგენლობის შესწავლა წარმოებდა რენტგენოფლოუორესცენტული მეთოდით, EDX3600B - ანალიზატორის საშუალებით. მინერალოგიური კვლევას კი გამოიყენებოდა პოლარიზაციული მიკროსკოპი AMSCOPE PZ300T.

დანაფარის ქიმიური შემადგენლობის შერჩევა მიმდინარეობდა ექსპერიმენტის გზით. გამოცდილი იყო რამდენიმე შემადგენლობის დანაფარი, რომელთა ქიმიური შემადგენლობის კვლევა ჩატარდა “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლოუორესცენტული და სპექტრული ანალიზატორების გამოყენებით.

დანაფარის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს გამდნარი წიდის სიბლანტე. სიბლანტის გასაზომად გამოვიყენეთ სტოქსის მეთოდი. მეთოდი მდგომარეობს მცირე ზომის სხეულების სითხეში ვარდნის სიჩქარის გაზომვაში. გრაფიტისაგან დამზადებულ ტიგელში თავსდება დანაფარის კაზმი და იდგმევა ინდუქციურ ლუმელში, სადაც ის დნება. შემდეგ კი მიღებულ თხევად გარემოში ვაგდებით ტიტანისაგან დამზადებულ გარკვეული მოცულობის სფეროს ფორმის სხეულებს. წამზომის საშუალებით ვზომავთ ვარდნის დროს და ვიცით, რა სიღრმე, ვანგარიშობთ ვარდნის სიჩქარეს. ვითვალისწინებთ სითხეში სხეულზე მოქმედები სიმძიმის, არქიმედეს და სითხის წინააღმდეგობის ძალების გამოსათვლელ ფორმულებს და სიბლანტეს ვანგარიშობთ შემდეგი ტოლობიდან:

$$6\pi R\eta v = \rho_{\text{სფ}}gV_{\text{სფ}} + \rho_{\text{სით}}gV_{\text{სფ}} \quad (1)$$

სადაც, R -სფეროს რადიუსია, მ; η - სიბლანტეა, პაწმ; $\rho_{\text{სფ}}$ და $\rho_{\text{სით}}$ - შესაბამისად ტიტანისა და გამდნარი წიდის სიმკვრივეა, კგ/მ³; $V_{\text{სფ}}$ - ტიტანის სფეროს მოცულობაა, მ³.

დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის შემოწმებას ვაწარმოებდით ორი გზით:

1. დამზადებული ელექტროდების ფოლადის ფილაზე 0.5 , 1 და 1,5 მ- სიმალიდან ბრტყლად ვარდნისას მიღებული შედეგების მიხედვით
2. დანაფარის კაზმისაგან დამზადებული ცილინდრული ფორმის ნიმუშების მექანიკური სიმტკიცე განისაზღვრებოდა სამწერტილოვანი

ღუნვის მეთოდის გამოყენებით. ნიმუშები მიიღებოდა ტიგელში გამდნარი მასის კაპილარული ექსტრუზიით ლაბორატორიული ვაკუუმური ტუმბოს საშუალებით. ნიმუში მაგრდებოდა სპეციალურად დამზადებულ საყრდენებზე, ხოლო მის ცენტრზე კი ვმოქმედებით გარკვეული მასის საწონებით და ვზომავდით ღუნვის სიდიდეს, რომლის მიხედვითაც განისაზღვრებოდა მექანიკური სიმტკიცე.

დანაფარის მიერ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარის (დანაფარის ჰიგროსკოპულობა) შესწავლისას გამოიყენებოდა ელექტროდების აწონვის მეთოდი. ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდები და “GK”-ტიპის ელექტროდები (თითოეული 16-16 ცალი) ღუმელში 100°C-ზე გამოწვის მერე იწონებოდა, შემდეგ ერთნაირი დროის განმავლობაში ვათავსებდით ჩვენს მიერ დამზადებულ ჰიდროსტატში, რომელშიც აორთქლებული წყლის ხარჯზე იქმნებოდა 100%-იანი ტენიანობა. დატენიანებული ელექტროდები კვლავ იწონებოდა და ვანგარიშობდით მასის ფარდობით ცვლილებას, რომლითაც შეიძლებოდა მსჯელობა დატენიანების ხარისხზე.

ახალი დანაფარის ელექტროდით განმეორებითი ანთების შეფასება ეფუძნებოდა შემდეგ კრიტერიუმებს:

- მილისებური დანაფარის გამონაშვერის სრული გაცივების შემდეგ, რღვევის გარეშე, რკალის მყისიერი ანთებას;
- მყისიერ ანთებას რკალის ანთების ხანმოკლე (10-30 წმ) შეწყვეტის შემდეგ დანაფარის რღვევის გარეშე;
- შენელებულ ანთებას რკალის ანთების ხანმოკლე (10-30 წმ) შეწყვეტის შემდეგ დანაფარის გამონაშვერის სრული რღვევის შემდეგ.

დანაკარგები ამოწვაზე და გაშხეფებაზე, შედუღებისას აღებული მონაცემების საშუალებით, განისაზღვრებოდა თეორიულად, შემდეგი ფორმულით:

$$Y = \frac{Q_{გაფ} - Q_{დაფ}}{Q_{გაფ}} 100\% \quad (2)$$

სადაც $Q_{გაფ}$ - გადნობილი საელექტროდო ლითონის მასაა; $Q_{დაფ}$ - დადნობილი საელექტროდო ლითონის მასა. $Q_{გაფ}$ და $Q_{დაფ}$ განისაზღვრებოდა პრაქტიკაში მიღებული სტანდარტული აწონვის მეთოდით.

რკალის სტაბილური ნათება, წიდის ქერქის მოცილება მოწმდებოდა უშუალოდ შედეგების პროცესის შესრულებისას.

შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურული კვლევა ჩატარდა მიკროსკოპზე NEOFOT- 32, გადიდებებით X25 , X100 და X360.

შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების შესასწავლად დამზადებული იქნა სტანდარტით განსაზღვრული ნიმუშები. გაჭიმვაზე გამოცდები ჩატარდა FPZ – 100 ტიპის მანქანაზე. მიღებული შედეგების საფუძველზე თეორიულად გავიანგარიშეთ შენადული ნაკერის ლითონის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მაჩვენებლები: სიმტკიცის ზღვარი, დენადობის ზღვარი. ფარდობითი წაგრძელება.

დარტყმითი სიბლანტე შევისწავლეთ სტანდარტული მეთოდით – დარტყმითი ღუნვით ქანქარა ურნალზე.

სისალის გაზომვები ჩატარდა TK – 2 ტიპის როკველის წნეხზე და PIMT - 3 ტიპის მიკროსისალის მზომ მიკროსკოპზე.

2.2. საქართველოში არსებული ნედლეულის მინერალოგიური და ქიმიური კვლევა.

1.4. თავში საუბარი იყო საქართველოში არსებულ მინერალური ნედლეულით მდიდარ საბადოებზე. განხილულია ჩვენთვის საინტერესო, 12 ძირითადი საბადო, რომელთა უმრავლესობის შემადგენლობა შესწავლილი იყო შესაბამისი გეოლოგიური სამსახურების მიერ და წარმოდგენილია ამავე თავში.

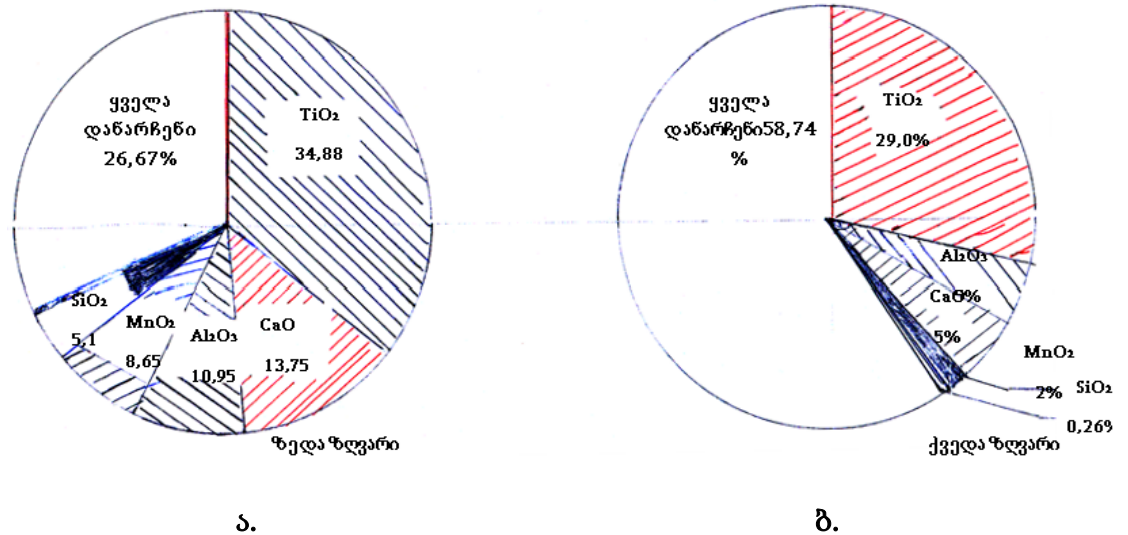
არსებული საბადოებიდან ჩვენი ყურადღება, თავისი ქიმიური შემადგენლობის მრავალფეროვნებით, მიიქცია კასპის, ასკანის, გუბრინის და ბჟინვის საბადოებმა. ინტერესს წარმოადგენდა მათში კაოლინური თიხის შემც-

ველობა, რომელიც შედის ფუჭი ქანების შემადგენლობაში. ასევე კიდევ ერთხელ შევისწავლეთ საჩხერის ქვიშა და თელავის მარმარილო, რაც ასევე, დანაფარის შემადგენლობის მნიშვნელოვანი კომპონენტია.

აღნიშნული მადნეული რესურსების მინერალოგიური და ქიმიური კვლევა ჩატარებული იქნა სტუ-ს სამთო-გეოლოგიურ ფაკულტეტის გეოლოგიისა და მინერალურ ნივთიერებათა კვლევის, დიაგნოსტიკისა და გადამუშავების რესპუბლიკურ ცენტრში. მადანთა ნედლეულის ქიმიური შემადგენლობის შესწავლა წარმოებდა რენტგენოფლოუორესცენტული მეთოდით, EDX3600B - ანალიზატორის საშუალებით. მინერალოგიური კვლევისას კი გამოიყენებოდა პოლარიზაციული მიკროსკოპი AMSCOPE PZ300T. ცნობილია, რომ მადანის მოპოვების ადგილის სხვადასხვა ზონებიდან ამოღებული გრუნტები ყოველთვის განსხვავდებიან შემადგენლობის პროცენტული შემცველობით, ამიტომ კვლევებისათვის მადნეულებიდან გრუნტები აიღებოდა ერთმანეთისაგან დაახლოებით 150-200 მ მანძილის ინტერვალებით მთის სხვადასხვა ადგილებიდან (მთის ძირიდან, შუა ნაწილიდან და ფერდობის ზედა ნაწილიდან) [46, 47].

მინერალოგების ჰიპოთეზით ნედლეული წარმოშობილია დანალექი ქანების ფენებად შეკავშირებით. მაგრამ წყალი, რომელიც რეაქტივის როლს ასრულებს, ფორებში მოძრაობის დროს ნალექის შემადგენელ წვრილი ნაწილაკების გახსნასთან ერთად, სხვადასხვა მინერალების ქიმიურ გამოლექვასაც აწარმოებს, სწორედ ამ პროცესის შედეგია მარცვლების ერთმანეთთან შეკავშირება და ნალექის შეცემენტება. აი ამ რთულ პროცესს, რომელიც ნალექის თავდაპირველი შედგენილობის მნიშვნელოვნად შეცვლას, მის გამკვრივებას, შეცემენტებას და საერთოდ ქანად გარდაქმნას იწვევს, გენედიზი ეწოდება. კასპის საბადოს მადანი წარმოქმნილია ტბური ნალექის შედეგად და მიეკუთვნება კაოლინურ თიხებს. კაოლინური თიხები წარმოშობის პირობების მიხედვით ორგვარია: ქემოგენური (პირველადი) და გადანალექი (მეორადი). დაკლდოვანებული ქანების შემადგენლობაში სუფთა ელემენტების რაოდენობა შეადგენს 46%, ხოლო ფუჭი ქანებისა 53,9%-ს.

როგორც 1.4 თავში ავლინებთ კასპის მადანი შედგება რუხი, ღია სალათისფერი და თეთრი ნატეხებისაგან. მათი ქიმიური შემადგენლობაც მთის სხვადასხვა ნაწილში განსხვავებულია. კერძოდ, მთის შუა ადგილას მეტია Al და Ca, ხოლო მის ძირში Al, Ti, Si, K და Mn მცირე შემცველობითაა (ნახ. 3.):

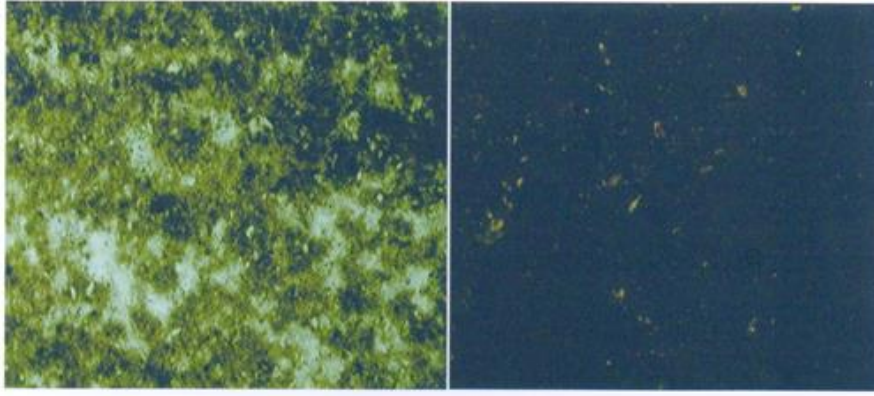


ნახ. 3. კასპის მადნის ქიმიური შემცველობა, %-ში
 ა. მთის შუა ნაწილი; ბ. მთის ძირი

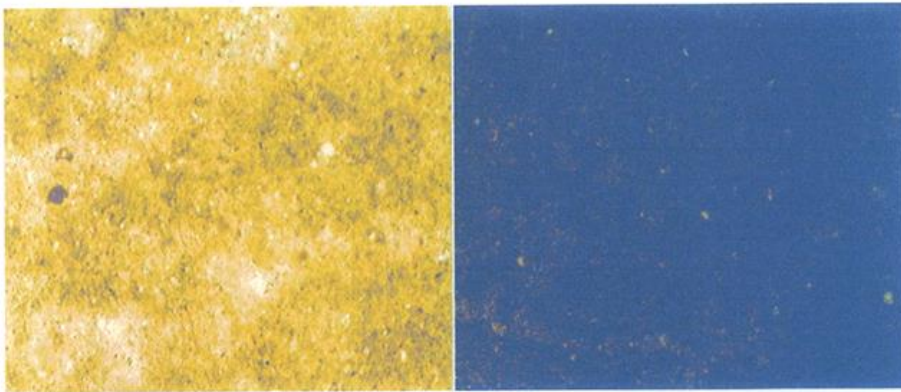
შესწავლილი იყო კასპში მოპოვებული კაოლინური თიხის ნიმუშები, რისთვისაც გამოყენებული იქნა პოლარიზაციული მიკროსკოპი AMSCOPE PZ300T. ნიმუში N1 და N2 მთლიანდ თიხოვანი მასითაა წარმოდგენილი, რომელიც კარბონატითაა გაჯერებული. მექანიკური მასალა ძალიან მცირე რაოდენობითაა და წარმოდგენილია სავარაოდოთ მინდვრის შპატით (ნახ. 4). ნიმუში N3 წარმოადგენს კაოლინურ თიხას ორგანოგენული მასალით. მიკროსკოპულად ქანი, ორივე შემთხვევაში, ნაცრისფერია. ქანი მთლიანდ თიხოვან-კარბონატული მასითაა წარმოდგენილი და მასში საკმაოდაა ორგანოგენული მასალა სხვადასხვა ზომის ჩანართებით (ნახ. 5)

ნიმუში N4 კი წარმოადგენს ნატეხური წარმოშობის თიხოვან ქანს (ნახ. 6).

ქიმიური კვლევისათვის ნიმუშები შერჩეული იყო მთის სხვადასხვა ადგილებში და სიმაღლეზე. ნიმუშების ქიმიური შემადგენლობა განისაზღვრებოდა რენტგენოფლოორესცენტული მეთოდით. ცხრილში 20 მოყვანილია რუხი, ღია სალათისფერი და თეთრი ნატეხების (დანართი 1, 2, 3) ქიმი-

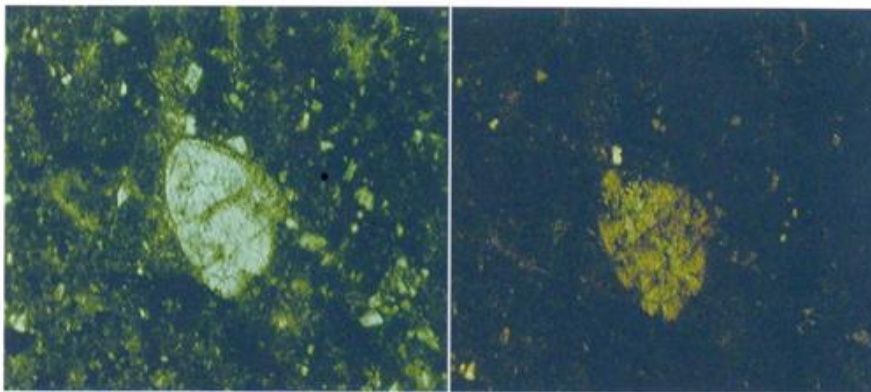


ა)

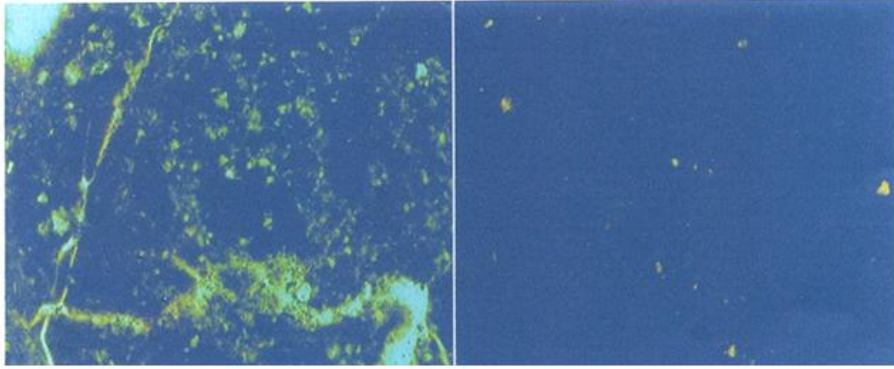


ბ)

ნახ. 4. კაოლინური თიხა:
ა) ნიმუში N1; ბ) ნიმუში N2



ნახ. 5. ნიმუში N3-კაოლინური თიხა ორგანოგენული მასალით



ნახ. 6. ნატეხური წარმოშობის თიხოვანი ქანიური შემადგენლობა. შემდეგ ეტაპზე ვიანგარიშეთ ცხრილში შემავალი ელემენტების ჟანგეულების პროცენტული რაოდენობა. გაანგარიშებისას ჯერ გამოითვლება ელემენტის ჟანგეულის მოლური მასა და მისი პროცენტული შემცველობა მასში, შემდეგ კი ამ პროცენტისა და ცხრილში 20, მოყვანილი მონაცემების მიხედვით ჟანგეულის რაოდენობა მადანში. გამოთვლების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 21.

ცხრილი 20. კასპის მადნის ქიმიური შემადგენლობა, %

ქიმიური ელემენტები	თეთრი ნატეხები	რუხი ნატეხები	სალათისფერი ნატეხები
Ti	0,386±0,015	0,348±0,015	22,0±0,21
Al	5,311±0,113	5,368±0,116	-
V	0,038±0,006	-	0,36±0,06
Fe	3,783±0,019	3,142±0,018	10,44±0,08
Mn	0,046±0,005	0,164±0,005	5,47±0,07
Mg	0,909±0,292	-	-
Zr	0,0178±0,0006	0,0184±0,0003	0,096±0,002
Nb	-	-	0,079±0,002
Si	21,992±0,106	22,006±0,109	-
Ca	4,895±0,015	0,348±0,015	-
Cr	0,014±0,003	0,05±0,003	-
P	0,026±0,007	0,038±0,009	-
K	7,544±0,040	7,879±0,042	-
Ni	0,0066±0,0008	0,0052±0,0008	-
Cu	0,0057±0,0006	0,0046±0,0006	-
Zn	0,0112±0,0003	0,0071±0,0005	-
Cd	0,097±0,003	0,097±0,003	-
Sb	-	0,046±0,002	-
Co	0,012±0,012	-	-
Sn	-	0,028±0,001	-
LE	54,905±1,40	51,031±1,40	61,56±1,85

ჟანგეულების რაოდენობრივმა ანგარიშმა გვაჩვენა, რომ თეთრი, რუხი და სალათისფერი ნიმუშებიდან არცერთი მათგანი ცალ-ცალკე არ გამოდგება დანაფარის მასალად გამოყენებისათვის. ეს ბუნებრივიც არის, რადგან

ცხრილი 21. კასპის მადანში ჟანგეულების შემცველობა, %

ჟანგეულები	თეთრი ნატეხები	რუხი ნატეხები	სალათისფერი ნატეხები
TiO ₂	0,643	0,58	36,67
Al ₂ O ₃	10,03	10,14	-
VO ₂	0,06	-	0,59
Fe ₂ O ₃	5,404	4,49	14,9
MnO ₂	0,07	0,26	8,65
MgO	1,515	-	-
Zr O ₂	0,0240	0,025	0,129
Nb O	-	-	0,106
Si O ₂	47,126	47,15	-
Ca O	6,853	0,49	-
Cr ₂ O ₃	0,0205	0,073	-
P ₂ O ₃	0,045	0,066	-
K ₂ O	9,091	9,49	-
Ni ₂ O ₃	0,009	0,007	-
Cu O	0,007	0,006	-
Zn O	0,0139	0,009	-
Cd O	0,110	0,11	-
Sb ₂ O ₃	-	0,055	-
CoO	0,0152	-	-
Sn O ₂	-	0,035	-

სალათისფერი ნატეხები სხვებთან შედარებით მდიდარია ტიტანის, რკინის, მანგანუმის და ცირკონიუმის ჟანგეულებით, ხოლო დანარჩენები მდიდარია ისეთი ელემენტების ჟანგეულებით, როგორცაა ალუმინი, სილიციუმი, კალიუმი, კალციუმი და სხვა. მათი არსებობა ელექტროდის დანაფარის შემადგენლობაში მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს ელექტროდის თვისებებს. თეთრი და რუხი ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა თითქმის ერთმანეთის იდენტურია. ამიტომ საუკეთესო ვარიანტად მივიჩნიეთ თეთრი და სალათისფერი ნატეხების ერთმანეთში შერევა. ცხადია შერევისას დაცული უნდა იყოს ისეთი პროპორცია, რომ მაქსიმალურად იყოს უზრუნველყოფილი ელემენტების რაოდენობა. პირველ რიგში ყურადღება მივაქციეთ

ტიტანის ორჟანგის (რუტილის) რაოდენობას, ვინაიდან ის კარგი გამჟანგველია და რუტილის ელექტროდის მთავარი შემადგენელი კომპონენტია. უზრუნველყოფს რკალის სტაბილურობას, აუმჯობესებს წილის წარმოქმნას, უზრუნველყოფს ხარისხიანი ნაკერის ფორმირებას, გაშხეფების სიმცირეს და წილის ადვილად მოცილებას [13, 37]. ამავე დროს გათვალისწინებული უნდა იყოს ისეთი აუცილებელი ელემენტების პროცენტული რაოდენობა, როგორცაა გამჟანგველები: Al, Mn, Si, ნაკერის ლითონის მალეგირებელი ელემენტები: Zr, Nb, V და სხვა. ცხადია, რთულია ვიანგარიშოთ და შევარჩიოთ ისეთი პროპორციები, რომ ყველა ელემენტის შემცველობის მნიშვნელობათა შუალედი დაკმაყოფილებული იყოს, მაგრამ სასურველია დანაფარში შემავალი ძირითადი კომპონენტების მიყვანა ისეთ კონდიციამდე, რომ საჭიროების მიხედვით მცირე რაოდენობით მოხდეს ზოგიერთი დეფიციტის შევსება.

შენარევში ჟანგეულების პროცენტული რაოდენობის ანგარიში ვაწარმოეთ ჩვეულებრივი კლასიკური მეთოდით:

$$X\% = \frac{ak\% + bm\%}{a + b}$$

სადაც **a** და **b** სალათისფერი და თეთრი ფერის ნედლეულის რაოდენობაა, ხოლო **k**, და **m** ელემენტის პროცენტული რაოდენობაა შესაბამის ნედლეულში, ხოლო **X** კი მისი რაოდენობა შენარევში. ვინაიდან, პირველ რიგში ჩვენს ინტერესს წარმოადგენს ტიტანის ჟანგეულის შემცველობა, ამიტომ რამდენიმე შერჩეული კომბინაციიდან შევარჩიეთ ნარევი, რომელშიც 95% იყო სალათისფერი ნატეხები, ხოლო 5%- კი თეთრი ნატეხები. გაანგარიშება ჩავატარეთ 1 კგ ნარევისათვის რომელშიც **a = 950 გრ** და **b = 50 გრ**. TiO₂-სათვის მივიღებთ:

$$X\% = \frac{950 \cdot 36,67 + 50 \cdot 0,643}{1000} = 34,87\%$$

Fe₂O₃-სათვის:

$$X\% = \frac{950 \cdot 14,9 + 50 \cdot 5,404}{1000} = 14,42\%$$

ანალოგიურად, MnO_2 -სათვის $X\% = 8,22\%$ და ა. შ. ცხრილში 22 მოყვანილია შერეულ კაზმში ჩვენს მიერ გაანგარშებული ჟანგულების პროცენტული რაოდენობები. როგორც ცხრილიდან ჩანს ამ შერევით მიღებულ კაზმითი თქმის უახლოვდება საელექტროდო დანაფარებისათვის გამოყენებულ სტანდარტით არსებულ შედგენილობებს. მასში შემავალი ძირითად ჟანგულთა პროცენტული შემადგენლობა, რომლებიც აუცილებელია ელექტროდის დანაფარის დასამზადებლად, სავსებით საკმარისია და საჭიროებს მცირედენ კორექტირებას.

ცხრილი 22. თეთრი და სალათისფერი შერევით მიღებული კაზმში ჟანგულების შემცველობა, %

TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	VO ₂	MgO	Zr O ₂	Nb O	Si O ₂	Ca O
34,87	0,502	14,42	8,22	0,563	0,0015	0,124	0,1007	2,356	0,343
Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₃	K ₂ O	Ni ₂ O ₃	Cu O	Zn O	Cd O	Sb ₂ O ₃	CoO	SnO ₂
0,001	0,0023	0,009	0,00045	0,00035	0,0007	0,0055	-	0,00076	-

2.3. ახალი საელექტროდო დანაფარის შემადგენლობის შემუშავება.

კვლევების შემდგომი ეტაპი მდგომარეობდა საელექტროდო დანაფარის შემადგენლობის შერჩევასა და დამზადებაში მისი ტექნოლოგიური თვისებების შესასწავლად. საელექტროდო ღეროს დასამზადებლად გამოვიყენეთ სტანდარტული შედგენილობის CB-08 ტიპის საშემდუღებლო მავთული, რომლის ქიმიური შემადგენლობა მოყვანილია ცხრილში 1 [5].

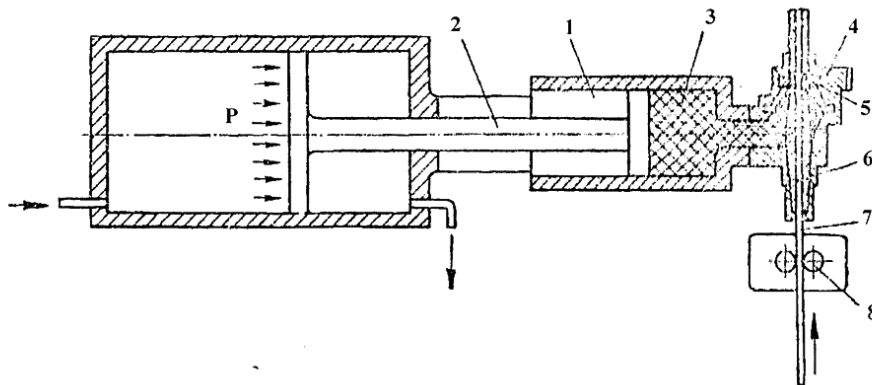
ელექტროდი მზადდებოდა ცნობილი ტექნოლოგიური მეთოდით, რომელიც შეიცავს შემდეგ ეტაპებს [3, 48]:

- საელექტროდო ღეროს მომზადება;
- ფშვნადი და დაქუცმაცებული მასალების გამოშრობა;
- გოგირდის შემცველობის შემცირების მიზნით დანაფარის კომპონენტების გამოწვა;
- უფრო მსუბუქად დანაწევრების მიზნით ფეროშენადნობთა წრთობა;
- დადუღებული მასალების მსხვილად და საშუალოდ დანაწევრება;

- დანაფარის მომზადება და ელექტროდის ღეროს დაფარვა;
- ღეროს ბოლოების გაშიშვლება, დახარისხება და შეფუთვა.
- ელექტროდების შენახვა.

დანაფარის დაწნეხვით დაფარვა სრულდებოდა სპეციალურ ელექტროდის დანაფარის დამწნებ დანადგარზე, რომელიც მუშაობდა დაბალ, საშუალო და მაღალ წნევებზე (ნახ. 7). ელექტროდების დაწნეხვისას 15-20 მგპა-ზე ზევით ელექტროდები მიიღება უფრო მტკიცე, რაც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ელექტროდების ნაწიბურების მექანიკური გაწმენდა [88].

დამზადების შემდეგ აუცილებელია მათი გამოწვა. ელექტროკარადაში მათი გაშრობა-გამოწვა მიმდინარეობს დაახლოებით 2 სთ-ის განმავლობაში 150- 450°C ტემპერატურაზე. დრო და ტემპერატურული რეჟიმი დამოკიდებულია დანაფარის სისქეზე. ასეთი ტიპის სერიული წარმოების დანადგარები ხასიათდება მაღალი მწარმოებლურობით - 300 და მეტი ელექტროდი წუთში [49].



ნახ. 7. ელექტროდების პრესის სქემა

- 1 - ცილინდრი დამფარავი მასით; 2 - დგუში; 3 - დამფარავი მასა; 4 - თავი; 5 - დამაკალიბრებელი მილისა; 6 - მიმართველი; 7 - ელექტროდის ღერო; 8 - მიმწოდებელი გორგოლაჭები. ისრით ნაჩვენებია ღეროს მიმართულება

პირველ ეტაპზე დანაფარის კაზმის დასამზადებლად გამოვიყენეთ ნარევი, რომელიც შედგებოდა თეთრი და სალათისფერი ნატეხების დაფქვით მიღებული მასების შერევით. შემაკავშირებლად ნარევს დამატებული ჰქონდა ნატრიუმის თხევადი მინა ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$). დანაფარში მცირე რაოდენობით შევიყვანეთ 3%-იანი დექსტრინი. ამ შემადგენლობით დამზადებულ ელექტროდებს

ტროდებზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა სასურველი შედეგები ვერ მოგვცა. კერძოდ, დანაფარის თვისებების შესწავლამდე და მისი ვარგისიანობის დასადგენად, შევადუღეთ დაბალნახშირბადიანი ფოლადები. ექსპერიმენტების შედეგებმა ცხადყო, რომ აღნიშნული ელექტროდი ვერ აკმაყოფილებდა დაფარული ელექტროდებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს. კერძოდ, პროცესი ხასიათდებოდა რკალის არასტაბილური ნათებით, გართულებული იყო რკალის, როგორც პირველადი ისე განმეორებითი ანთება, ნაკერი ხასიათდებოდა მაღალი ფორიანობით და დაბალი ხარისხით. საკმაოდ შესამჩნევი იყო საელექტროდო ღეროსა და დანაფარის არათანაბარი დნობა. ცხრილში 23 მოგვყავს შენადული ნაკერის მექანიკური გამოცდის შედეგები. სადაც $\sigma_{დრ}$ -დროებითი წინაღობაა, $\sigma_{დენ}$ - დენადობის ზღვარია, δ - ფარდობითი წაგრძელებაა, φ - ფარდობითი შევიწროებაა, α_H - დარტყმითი სიბლანტეა, α° - გაღუნვის კუთხეა. როგორც ცხრილიდან ვხედავთ, ნაკერი ხასიათდება საკმაოდ დაბალი მექანიკური თვისებებით.

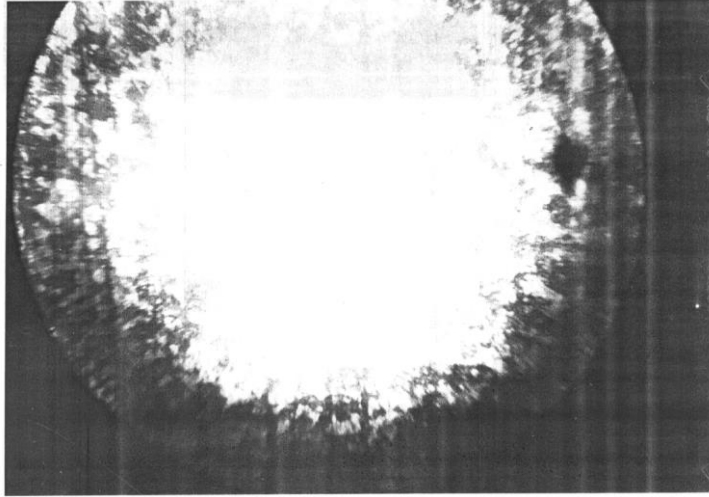
ცხრილი 23. მექანიკური გამოცდის შედეგები

N	$\sigma_{დრ}$, მგპა	$\sigma_{დენ}$, მგპა	δ , %	φ , %	α_H , კჯ/მ ²	α°
1	315	243,5	15,0	16,0	43	>150
2	200	162	7,0	17,37	55	>150
3	394	357	13,3	17,37	68	<150

აღნიშნული ნაკერების მეტალოგრაფიულმა კვლევებმა (ნახ. 8) აჩვენა, რომ მიკროხეხი, რომელიც ფერიტული სტრუქტურისა, ხასიათდება დაბალი სისალით. მიკროსტრუქტურულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ნაკერი მრავალფენოვანია. ზედა ფენა, სადაც სრულდება შედუღება, გამოირჩევა მსხვილმარცვლოვანი აგებულებით, რომელიც მოწმობს იმ ფაქტს, რომ კერის გაცივების სიჩქარე იყო ძალზედ დაბალი.

შემდეგი ქვედა ფენები გამოირჩევა წვრილმარცვლოვანი აგებულებით ყველაზე წვრილმარცვლოვანი არის ნადნობის ის ფენა, სადაც მოხდა მისი სწრაფი გაცივება. აღნიშნულის გარდა, ნაკერის ყველა ფენაში შეინიშნება საკმაოდ დიდი ზომის არალითონური ჩანართები. ზედა ფენაში კი სტრუქტუ-

რა საერთოდ მსხვილმარცვლოვანია, პერლიტის ჩანართები არ მოჩანს, ხოლო შემდეგ ფერიტის რაოდენობა იზრდება და მეტალოგრაფიული ანალიზით უტოლდება $C=0,15-0,2$ % ოდენობას [50].



ნახ. 8. მიკროხეხი $\times 200$

დენტრიტული სტრუქტურა კი თითქმის დამსხვრეულია, რაც მიუთითებს მისი სწრაფი გაცივების სიჩქარეზე.

აქედან გამომდინარე საჭირო შეიქმნა მოპოვებული წიაღისეულის გამდიდრება (დანამატის სახით) ისეთი კომპონენტებით, რომლებიც მოგვცემდა ისეთი თვისებების კომპლექსს, როგორცაა რკალის მდგრადი ნათება; შედუღების აბაზანის აქტიური დაცვა ატმოსფეროს ზემოქმედებისაგან; ლითონის ნაკერის სრული განჟანგვა; მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება, განსაზღვრული ფიზიკური თვისებების შედუღების წიდის წარმოქმნას, რომელიც გაცივებისას უზრუნველყოფს შენადული ნაკერიდან მის ადვილად მოცილებას.

კვლევების შემდგომ ეტაპზე, ოპტიმალური დანაფარის შემადგენლობის მისაღებად დამზადდა დანაფარის ხუთი ვარიანტი, რომელთა შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 24.

თითოეულ ვარიანტში თეთრი და სალათისფერი მადანი ირეოდა სხვადასხვა შემცველობით. თითოეულ მათგანს, საერთო მასის 20-25%-ის რაოდენობით ემატებოდა თხევადი მინა.

დამზადებული ხუთი ვარიანტიდან ქიმიური შედგენილობისა და მექანიკური თვისებების მიხედვით ყველაზე კარგი შედეგი აჩვენა IV ვარიანტმა, მაგრამ არასაკმარისი. დანაფარისა და შენადული ნაკერის მექანიკური თვისების კვლევა და შედეგები ელექტროდის დანაფარის ვარიანტებისათვის განხილულია შემდეგ თავებში.

ცხრილი 24. კასპის მადნისაგან ელექტროდების დანაფარების ვარიანტები

ჟანგეულები %	1	2	3	4	5
<i>TiO₂</i>	28	29,0	32,0	34,88	36,05
<i>VO₂</i>	0.1	0,2	0,3	0,585	0,70
MnO ₂	1.9	2,0	6,5	8,65	10,0
Fe ₂ O ₃	4.5	5,0	8,0	14,91	15,0
ZrO	0.005	0,01	0,1	0,11	0,15
CaO	4.0	5,0	8,5	13,72	15,0
NbO	0.0001	0,001	0,003	0,009	0,01
<i>Co₂O₃</i>	0.00001	0,0001	0,01	0,015	0,02
CuO	0.001	0,002	0,003	0,005	0,006
<i>K₂O</i>	2.0	3,0	6,0	9,4	10,5
CdO	0.001	0,01	0,011	0,011	0,0115
<i>Cr₂O₃</i>	0.001	0,01	0,02	0,022	0,0025
NiO	0.001	0,002	0,005	0,008	0,009
<i>Al₂O₃</i>	2.0	5,0	8,0	10,95	12,0
MgO	0.3	0,5	1,0	1,5	2,0
<i>SiO₂</i>	დანარჩენი	დანარჩენი	დანარჩენი	დანარჩენი	დანარჩენი

ჩატარებული კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით, გადაწყვეტილი იქნა საელექტროდო დანაფარის კაზმის გამდიდრება რუტილით 50-55 %-მდე, სადაც 25% იყო სუფთა ტიტანი. გაუმჯობესებულმა დანაფარმა დააკმაყოფილა მისდამი წაყენებული ყველა მოთხოვნა.

ამ გზით მიღებული საელექტროდო დანაფარის შემადგენლობა ნაჩვენებია ცხრილში 25.

ცხრილი 25. გაუმჯობესებული დანაფარის ქიმიური შემადგენლობა %-ში

<i>TiO₂</i>	<i>VO₂</i>	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO	CaO	NbO	<i>Co₂O₃</i>	CuO	<i>K₂O</i>
55 %	0,585	6,5	8,0	0,11	8,0	0,009	0,015	0,005	7,4
CdO	<i>Cr₂O₃</i>	NiO	<i>Al₂O₃</i>	MgO	<i>SiO₂</i>	-	-	-	-
0,011	0,022	0.008	7,8	1,5	5,035	-	-	-	-

2.4. საელექტროდო დანაფარის თვისებების კვლევა.

ახალი საელექტროდო დანაფარების შემუშავებისას შესწავლილი უნდა იქნას მისი ისეთი ძირითადი თვისებები და მახასიათებლები, როგორცაა დანაფარის სიმტკიცე, სიბლანტე, რკალის სტაბილური ნათების უზრუნველყოფა, შედუღებისას მინიმალური გაშხეფებით დნობა, ნაკერის ზედაპირიდან წიდის ადვილად მოცილება, შედუღების აბაზანის საიმედო დაცვა ატმოსფეროს მავნე ზემოქმედებისაგან, შენადული ნაკერის ლითონის ლეგირება და ხარისხიანი ნაკერის მიღება [57, 59,60].

2.4.1. ახალი დანაფარის დნობისას წარმოქმნილი თხევადი წიდის სიბლანტის კვლევა.

საელექტროდო დანაფარის შემუშავებისას, აუცილებლად შესწავლილი უნდა იქნას ისეთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი, როგორცაა გამდნარი წიდის სიბლანტე. სიბლანტეზეა დამოკიდებული ელექტროდით სხვადასხვა სივრცით მდგომარეობაში შედუღების შესაძლებლობა. დანაფარის მინერალოგიური შემადგელობა მნიშვნელოვნად ზემოქმედებს სიბლანტეზე. კერძოდ კი, არსებულ ანალოგებთან შედარებით, ახალ საელექტროდო დანაფარში მანგანუმისა და რკინის ჟანგეულების მომატებული შემცველობა, აგრეთვე კალიუმისა და ნატრიუმის ჟანგეულების არსებობა დადებით ზემოქმედებას ახდენს გამდნარი წიდის სიბლანტეზე [51 ÷ 53, 58].

ელექტროდები, რომელთა დანაფარები დნობისას იძლევა ე.წ. „გრძელ“ წიდებს გამოიყენება შედუღებისათვის ქვედა მდგომარეობაში. ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში გამოიყენება ელექტროდები, რომელთა დანაფარები იძლევა „მოკლე“ წიდებს. მათთვის დამახასიათებელია ტემპერატურის მცირე შემცირებისას სიბლანტის მყისიერი ზრდა, რაც ხელს უშლის გამდნარი ლითონის ინტენსიურ ჩამოღვენთვის. რუტილის ელექტროდები ხასიათდება დნობისას „მოკლე“ წიდის წარმოქმნით და საუკეთესოა ნებისმიერ სივრცით მდგომარეობაში შედუღებისათვის [5].

რუტილის დანაფარის თხევადი წიდის ქიმიური შემადგენლობა ზოგერთი ელექტროდისათვის მოყვანილია ცხრილში 26 [5, 51].

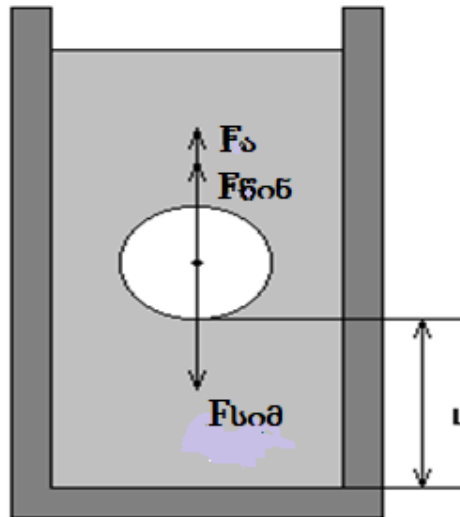
ცხრილი 26. რუტილის დანაფარის თხევადი წიდის ქიმიური შემადგენლობა, %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O+K ₂ O	სხვა
20,0	45,0	5,0	5,0	8,0	5,0	5,0	4,0	3,0
18,0	33,0	5,6	14,5	14,0	3,1	3,3	4,31	4,19
27	43,1	6,0	3,7	14,7	2,2	0,3	3	-

წიდების შემადგენლობა განსაზღვრავს მის სიბლანტეს და ცვლილებას ტემპერატურათა მცირე ინტერვალში. **MnO** და **FeO**-ს გაზრდილი რაოდენობა, **SiO₂**-ის ნაწილობრივ შეცვლა **TiO₂**-ზე და **Na₂O**-ით **K₂O**-ს ნაწილობრივი ჩანაცვლება იწვევს სიბლანტის ზრდას და მოქმედებს მის სწრაფ ზრდაზე ტემპერატურის შემცირებისას. ვინაიდან, ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდის დანაფარი მიეკუთვნება რუტილის დანაფარიანი ელექტროდების ტიპს, რომელსაც დამატებული აქვს მალეგირებელი და მაიონიზირებელი ელემენტები, ამიტომ მისი თხევადი წიდის შემადგენლობა იდენტურია ცხრილში (ცხრილი 26) მოყვანილი მონაცემებისა. აქვე გვინდა ავღნიშნოთ, რომ ჩვენს მიერ შემუშავებული დანაფარი შეიცავს ტიტანის ოქსიდს 55 %-ის რაოდენობით, შემკვრელად გამოყენებული გვაქვს ნატრიუმის თხევადი მინა (Na₂O·SiO₂), ამიტომ წიდის სიბლანტე აკმაყოფილებს მისდამი წაყენებულ მოთხოვნას, რაც კარგად გამოვლინდა ვერტიკალური შედუღების შესრულებისას [60]. ამ ტიპის თხევადი წიდის სიბლანტე ტემპერატურათა შემცირების ინტერვალში 1600-1400°C იზრდება საშუალოდ 0,17 პა·წმ-დან 1,2 პა·წმ-მდე .

სიბლანტის ექსპერიმენტული გაზომვის ხელსაწყოები და მეთოდები მრავალნაირია, მაგრამ მათი მოძიება საქართველოში გაგვიჭირდა [54÷56]. ამიტომ შევეცადეთ გასაზომად გამოგვეყენებინა სტოქსის მეთოდი, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში მოგვცემდა გარკვეულ ცდომილებას. მეთოდი მდგომარეობს მცირე ზომის სხეულების სითხეში ვარდნის საშუალო სიჩქარის გაზომვაში. გრაფიტისაგან დამზადებულ ტიგელში, რომლის შიდა

დიამეტრი იყო 20 მმ, ხოლო სიღრმე 70 მმ. ვათავსებდით გარკვეული რაოდენობის (50 გ) დანაფარის კაზმს და ვადნობდით ინდუქციურ ლუმელში (ნახ. 9). მიღებულ თხევად გარემოში ვაგდებთ ტიტანისაგან დამზადებულ გარკვეული მოცულობის სფეროს ფორმის სხეულებს. მათზე მექანიკური გადაბმით ვამაგრებდით ვოლფრამის უწონად მავთულს. მავთულის სიგრძის მიხედვით განისაზღვრებოდა ჩაძირვის სიღრმე. წამზომის საშუალებით ვზომავთ ვარდნის დროს და ვიცოდით რა სიღრმე, ვანგარიშობდით ვარდნის სიჩქარეს. გამდნარი წიდის სიბლანტის დნობის ტემპერატურამ შეადგინა დაახლოებით 1220 - 1226°C. გაზომვები ვაწარმოეთ 1350-1600°C-მდე ტემპერატურის ინტერვალში.



ნახ. 9. გამდნარი წიდის კვლევის სტოქსის მეთოდი

გამოთვლის მეთოდი ეფუძნება სხეულზე მოქმედი ძალებისათვის ნიუტონის II კანონის გამოყენებას. სითხეში სხეულზე მოქმედებს სიმძიმის, არქიმედეს და სითხის წინააღმდეგობის ძალები. რომლებიც გამოიანგარიშება შემდეგი ფორმულების საშუალებით:

$$F_{ბიბ} = \rho_{სს} g V_{სს}$$

$$F_{ა} = \rho_{სით} g V_{სს}$$

$$F_{წიბ} = 6\pi R\eta v$$

სადაც η - სიბლანტეა, ხოლო v - ვარდნის საშუალო სიჩქარეა. სიბლანტე

იანგარიშება (1) ტოლობიდან:

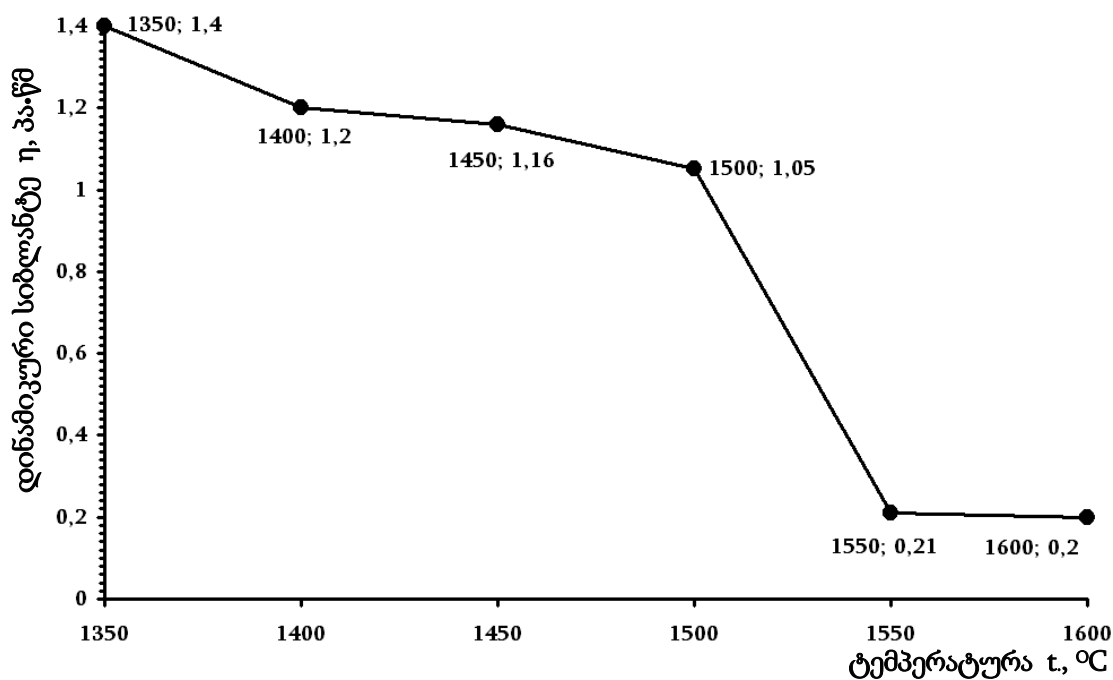
$$\eta = \frac{gV_{\text{სს}}(\rho_{\text{სს}} - \rho_{\text{სით}})}{6\pi Rv}$$

ექსპერიმენტისა და გათვლების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 27.

ცხრილი 27. თხევადი წიდის სიბლანტე

$\rho_{\text{სს}}, \text{კგ/მ}^3$	$\rho_{\text{სით}}, \text{კგ/მ}^3$	$R, \text{მ}$	$v, \text{მ/წმ}$	$t, \text{°C}$	$\eta, \text{პა}\cdot\text{წმ}$
4505	2520	$3 \cdot 10^{-3}$	0,29	1350	1,4
			0,35	1400	1,2
			0,36	1450	1,16
			0,4	1500	1,05
			1,97	1550	0,21
			2,0	1600	0,2

სიბლანტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება გამოსახულია ნახ. 10-ზე. ჩვენს შემთხვევაშიც სიბლანტე, რუტილის დანაფარიანი ელექტროდების ანალოგიურიდან ნახტომისებურად იზრდება 1550-1450°C ინტერვალში.



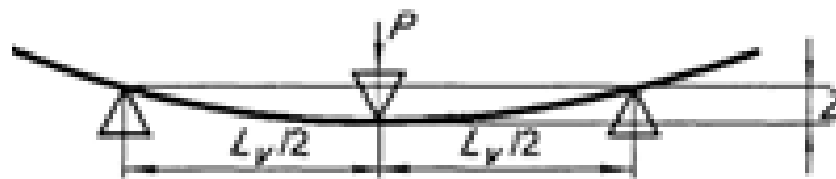
ნახ. 10. დინამიკური სიბლანტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

2.4.2. დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის კვლევა და დანაფარის მიერ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარის (დანაფარის ჰიგროსკოპულობა) შესწავლა

ახალი საელექტროდო დანაფარის შექმნისას მნიშვნელოვანია, რომ უზრუნველყოფილი იყოს მოთხოვნა მისი მექანიკური სიმტკიცის მიმართ. ელექტროდების წარმოების პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ ელექტროდების ნედლეულის დამაკმაყოფილებელი ქიმიური შემადგენლობა არ იძლევა ხარისხიანი ელექტროდების წარმოების გარანტიას. ხარისხიანი ელექტროდები უნდა აკმაყოფილებდნენ მთელ რიგ ტექნოლოგიურ მახასიათებლებს. მაგალითად, დამზადებული ელექტროდები უნდა იყოს მკვრივი, მტკიცე, გამონაბერების, ფორების, კოჟრების და ბზარების გარეშე [62÷ 65].

დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის შემოწმებას ვაწარმოებდით ორი გზით:

1. დამზადებული ელექტროდების ფოლადის ფილაზე 0.5 , 1 და 1,5 მ-ის სიმალიდან ბრტყლად ვარდნისას მიღებული შედეგების მიხედვით;
2. დანაფარის კაზმისაგან დამზადებული 4 მმ დიამეტრის და 0,4 მ სიგრძის ცილინდრული ფორმის ნიმუშების მექანიკური სიმტკიცე განისაზღვრებოდა სტანდარტული სამწერტილოვანი ღუნვის მეთოდის გამოყენებით, რომლის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 11-ზე.



ნახ. 11. სამწერტილოვანი ღუნვის მეთოდის სქემა

ნიმუშები მიიღებოდა ტიგელში გამდნარი მასის კაპილარული ექსტრუზიით ლაბორატორიული ვაკუუმური ტუმბოს საშუალებით. ნიმუში მაგრ-დებოდა სპეციალურად დამზადებულ საყრდენებზე, ხოლო მის ცენტრზე კი ვმოქმედებოდათ გარკვეული მასის საწონებით

და ვზომავდით ღუნვის სიდიდეს, რომლის მიხედვითაც განისაზღვრებოდა მექანიკური სიმტკიცე [66].

მექანიკური სიმტკიცის პირველი გზით შესწავლისას ცდები ჩავატარეთ, როგორც ჩვენს მიერ დამზადებული ელექტროდისათვის, ისე “GK”-ტიპის ელექტროდებისთვისაც. შესწავლისას გამოვიყენეთ 3 და 4 მმ დიამეტრის ელექტროდები. ვაწარმოებდით ელექტროდების ფოლადის ფილაზე ბრტყლად ვარდნას 0,5 მ სიმალიდან, 1,0 მ-დან და ბოლოს 1,5 მ-დან.

4 მმ დიამეტრის ელექტროდების დანაფარები არ ირღვეოდა 0,5 მ სიმალიდან ვარდნისას, ხოლო 1,0 მ-დან კი განიცდიდა ნაწილობრივ რღვევას, 1, 5 მ-დან ვარდნისას კი ადგილი ჰქონდა დანაფარის სრულ რღვევას.

3 მმ დიამეტრის ელექტროდები არ ირღვეოდა 1 მ სიმალიდან ვარდნისას და 1,5 მ-დან კი ნაწილობრივ განიცდიდა რღვევას. ანალოგიური შედეგები დაფიქსირდა “GK”-ტიპის ელექტროდებისათვისაც. ამ მეთოდით მექანიკურმა გამოცდამ აჩვენა, რომ ჩვენი ელექტროდები სიმტკიცით არ ჩამოუვარდება შესადარებელ ანალოგს [67].

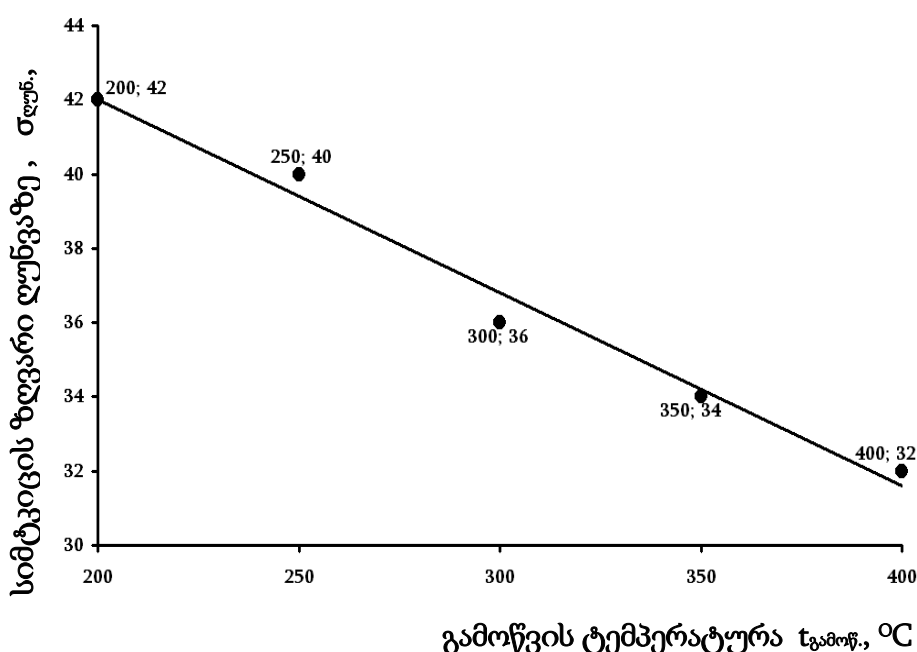
ღუნვის მეთოდით ჩატარებული კვლევებით მივიღეთ ღუნვაზე სიმტკიცის კონკრეტული მნიშვნელობები. ცნობილია, რომ დანაფარის მექანიკურ სიმტკიცეზე (სიმტკიცე ღუნვაზე - $\sigma_{ღუნ}$) გავლენას ახდენს მათი გამოწვის ტემპერატურა [42]. კვლევები ჩავატარეთ 200°C-დან 400°C-მდე დიაპაზონში გამომწვარი დანაფარებისათვის. ცხრილში 28 მოყვანილია კვლევის შედეგები. შედარებისათვის ასევე შევისწავლეთ სერიულად გამოშვებული “GK”-ტიპის ელექტროდების სიმტკიცე ღუნვაზე.

ცხრილი 28. საელექტროდო დანაფარის ღუნვაზე სიმტკიცის დამოკიდებულება გამოწვის ტემპერატურაზე

IV-ვარიანტი		გაუმჯობესებული დანამატი		“GK”-	
$t_{გაოფ}, ^\circ C$	$\sigma_{ღუნ}, მგპა$	$t_{გაოფ}, ^\circ C$	$\sigma_{ღუნ}, მგპა$	$t_{გაოფ}, ^\circ C$	$\sigma_{ღუნ}, მგპა$
200	32	200	42	-	39
250	30	250	40	-	
300	24	300	36	-	
350	21	350	34	-	
400	20	400	32	-	

როგორც ცხრილიდან ჩანს, ჩვენს მიერ შემუშავებული დანაფარის IV ვარიანტის დანაფარის სიმტკიცე, ტიტანის ოქსიდით გაუმჯობესებულზე საშუალოდ 30 %-ით დაბალია. რუტილის დანაფარიანი ელექტროდებისათვის (MP-3, AHO-4) გამოწვის ოპტიმალური ტემპერატურაა 150-190°C.

შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ გამოწვის ტემპერატურის მატება იწვევს სიმტკიცის შემცირებას (ნახ.12) დაახლოებით 24%-ით. გამოწვის ოპტიმალურ ტემპერატურას შეადგენს 200-250°C.



ნახ. 12. დანაფარის ლუნვაზე სიმტკიცის ზღვრის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

დანაფარის მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს მისი ჰიგროსკოპულობა, ანუ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარი. წყალბადის გავლენა შემადუღი ნაკერის და ელექტროდის ტექნოლოგიურ თვისებებზე განხილული იყო თავში 1.2.

დანაფარის ჰიგროსკოპულობის შესწავლისას გამოიყენებოდა ელექტროდების აწონვის მეთოდი. ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდები და “GK”-ტიპის ელექტროდების (თითოეული 16-16 ცალი) ღუმელში 100°C-ზე გამოშრობის მერე იწონებოდა, შემდეგ კი ერთნაირი დროის განმავლობაში

ვათავსებდით ჩვენს მიერ დამზადებულ ჰიდროსტატში, რომელშიც აორთქლებული წყლის ხარჯზე იქმნებოდა 100%-იანი ტენიანობა. დატენიანების შემდეგ ელექტროდები კვლავ იწონებოდა და ვანგარიშობდით მასის ფარდობით ცვლილებას, რომლითაც შეიძლება დატენიანების ხარისხზე. კვლევები ჩატარდა ელექტროდების 8 და 24 საათიანი ექსპოზიციისათვის. ექსპერიმენტების პირველი ციკლის დროს ჰიდროსტატში მოვათავსეთ 8-8 ელექტროდი და თითო საათის ინტერვალით ვზომავდით დატენიანების ხარისხს, რომელიც გამოითვლება დატენიანებამდე და დატენიანების შემდეგ მასების სხვაობის ფარდობით საწყის მასასთან.

$$B_{\text{დატ}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%$$

აქ, $B_{\text{დატ}}$ - დატენიანების ხარისხი, %; m_1 - გამომწვარი ელექტროდის მასა, გ; m_2 - დატენიანებული ელექტროდის მასა, გ.

მეორე ციკლის დროს კვლავ გამოვიყენეთ 8-8 ელექტროდი, რომელთა დატენიანების ხარისხს ვზომავდით 8 საათიანი ექსპოზიციის შემდეგ 2-2 სთ-ის ინტერვალით. კვლევისა და გამოთვლების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 29 და ცხრილში 30.

ცხრილი 29. დატენიანების ხარისხის შესწავლის შედეგები (პირველი ციკლი)

ელექტროდი	τ , სთ	m_1 , გ	m_2 , გ	$B_{\text{დატ}}$, %
გაუმჯობესებული დანამატით	1	32	32,09	0,30
	2	32	32,16	0,50
	3	32	32,22	0,70
	4	32	32,30	0,90
	5	32	32,32	1,00
	6	32	32,35	1,10
	7	32	32,38	1,18
	8	32	32,40	1,22
"GK"	1	32	32,25	0,8
	2	32	32,32	1,0
	3	32	32,38	1,20
	4	32	32,45	1,40
	5	32	32,50	1,60
	6	32	32,60	1,80
	7	32	32,67	2,10
	8	32	32,74	2,30

პირველი ციკლის შედეგების მიხედვით ვხედავთ, რომ პირველ 8 საათში ჩვენს მიერ შემუშავებული დანაფარის დატენიანების ხარისხი იცვლება 0,3 -1,22 % ინტერვალში და “GK”- ტიპის ელექტროდების დატენიანების ხარისხთან შედარებით დაბალია საშუალოდ 0.67 %-ით.

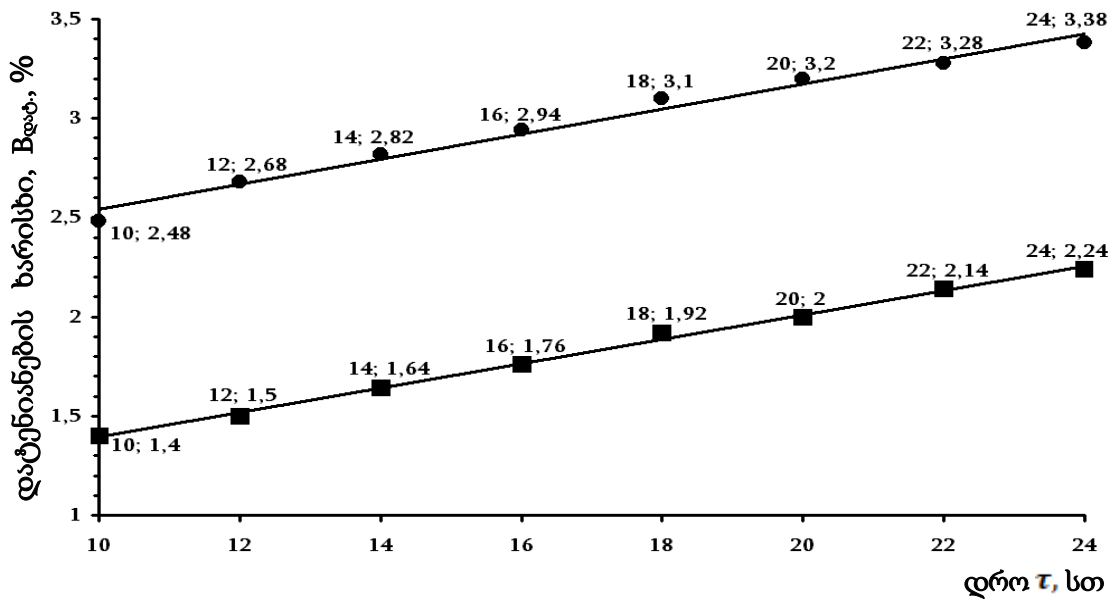
**ცხრილი 30. დატენიანების ხარისხის შესწავლის შედეგები
(მეორე ციკლი)**

ელექტროდი	τ , სთ	m_1 , გ	m_2 , გ	$B_{დატ}$, %
გაუმჯობესებული დანამატით	10	32	32,45	1,40
	12	32	32,48	1,50
	14	32	32,53	1,64
	16	32	32,56	1,76
	18	32	32,60	1,92
	20	32	32,64	2,00
	22	32	32,68	2,14
	24	32	32,	2,24
“GK”	10	32	32,32	2, 48
	12	32	32,45	2, 68
	14	32	32,50	2, 82
	16	32	32,60	2,94
	18	32	32,64	3,10
	20	32	32,67	3,20
	22	32	32,70	3, 28
	24	32	32,75	3,38

24 საათიანი ციკლის შედეგებიც ანალოგიური აღმოჩნდა და ჩვენს შემთხვევაში დატენიანების ხარისხი დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით. ეს შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ჩვენს მიერ შემაკავშირებლად გამოყენებული გვაქვს ნატრიუმის თხევადი მინა ($Na_2O \cdot SiO_2$). ცნობილია, რომ ჰიგრო-სკოპულობაზე გავლენას ახდენს დანაფარში შემაკავშირებელის - ტუტე სილიკატების მშრალი ნარჩენის ქიმიური შემადგენლობა. დადგენილია, რომ დანაფარები, რომლებშიც გამოყენებულია ნატრიუმის თხევადი მინა გაცილებით მდგრადია დატენიანობისადმი, ვიდრე დანაფარები, სადაც გამოყენებულია კალიუმის თხევადი მინა. [42, 61]

ნახ. 13 -ზე ნაჩვენებია დატენიანების ხარისხის დამოკიდებულება დატენიანების დროზე, სადაც ნათლად ჩანს ჩვენს მიერ შემუშავებული დანაფარ-

რიანი ელექტროდის უპირატესობა “GK”- ტიპის ელექტროდებთან შედარებით.



ნახ. 13. დატენიანების ხარისხის დამოკიდებულება დატენიანების დროზე

2.4.3. ახალი დანაფარის ელექტროდით განმეორებითი ანთების შესწავლა

რკალის განმეორებით ანთება ელექტროდის ტექნოლოგიური თვისებაა, უზრუნველყოს რკალის ადვილად აღზნება გაწყვეტის შემდეგ, ლითონთან ცივი კონტაქტის დროს. ამ დროს რკალის ანთება ხდება ელექტროდის ტორსის ძირითადად ლითონთან შეხებისას დარტყმის გარეშე, ანუ არ უნდა მოხდეს ელექტროდის ბოლოში გაუმდნარი მილისებური დანაფარის წგრევა.

რკალის პირველადი ანთება ხდება მარტივად, რადგან ელექტროდის საკონტაქტო ტორსზე არ არის დანაფარი. შედულების პროცესში წარმოიქმნება გაუმდნარი დანაფარისაგან მილისებური გამონაშვერი. ელექტროდის დანაფარი ელექტროგაუმტარია და რკალის გაწყვეტის დროს რკალის ხელმეორედ ანთებისას ქმნის პრობლემებს. რკალის ხელმეორედ ანთებისას გარკვეული ძალით ურტყავენ ელექტროდს შესადულებელ ნაკეთობას, რათა მოამ-

ტვირთვით გაუმდნარი მილისებური დანაფარის გამონაშვერი. ამ დროს მყარდება შესადულებელ ნაკეთობასა და ელექტროდს შორის კონტაქტი. ხშირად ხდება არა მარტო მილისებრი დანაფარის გამონაშვერის, არამედ მასთან მიმდებარე დანაფარის რღვევა, რაც თავის მხრივ განაპირობებს რკალის არასტაბილურობას, შედულების აბაზანის ცუდ დაცვას, შესაბამისად შენადუდი ნაკერის გაუარესებულ ქიმიური შემადგენლობას და მთლიანად ხარისხს.

ISO-ს სტანდარტებით დაუშვებელია ცუდი მეორადი ანთება რკალის შემთხვევითი გაწყვეტის დროს. ამრიგად, როგორც საქართველოში მოქმედი ГОСТ 9466-75-ისა და განვითარებულ ქვეყნებში მოქმედი სტანდარტების მოთხოვნის შესაბამისად რკალის განმეორებითი ადვილი ანთება აუცილებელია.

დაფარული ელექტროდით რკალის განმეორებითი ანთების კვლევები მოცემულია ნაშრომებში [68÷71].

ნაშრომში [68] მოცემულია აღნიშნული პრობლემის გადაჭრის გზები: რკალის განმეორებითი ადვილი ანთება კვების წყაროს მახასიათებლების ხარჯზე ან საელექტროდო დანაფარების თვისებების უზრუნველყოფით.

კვების წყაროს მახასიათებლების მეშვეობით პრობლემის გადაჭრისას საჭიროა ელექტროდზე გაიზარდოს ძაბვა, რათა მოხდეს დიელექტრიკული ფენის გარღვევა და აღიგზნას რკალი. ეს დაკავშირებულია კვების წყაროს სიმძლავრის გაზრდასთან, რაც თავის მხრივ ხშირად არასასურველია.

რკალის განმეორებითი ადვილი ანთება საელექტროდო დანაფარების თვისებების უზრუნველყოფით წარმოადგენდა ჩვენ ერთ-ერთ ამოცანას. შედარებისთვის გამოვიყენეთ რუტილის დანაფარიანი ელექტროდები MP-3 ГОСТ 9466-75. აღნიშნული და ჩვენს მიერ დამზადებული ელექტროდები შედარდა ავტორების [69] მიერ შემუშავებული ელექტროდების განმეორებით ანთების შეფასების მეთოდით.

შეფასება ხდებოდა შემდეგი კრიტერიუმებით:

- დანაფარის მილისებური გამონაშვერის სრული გაცივების შემდეგ,

- რღვევის გარეშე, რკალის მყისიერი ანთება;
- მყისიერი ანთება რკალის ნათების ხანმოკლე (10–30 წმ) შეწყვეტის შემდეგ დანაფარის გამონაშვრის რღვევის გარეშე;
 - შენელებული ანთება რკალის ნათების ხანმოკლე (10–30 წმ) შეწყვეტის შემდეგ დანაფარის გამონაშვრის სრული რღვევის შემდეგ.

მოყვანილი კრიტერიუმებით შედარებითი შეფასებისას ელექტროდების განმეორებით ანთებას ენიჭებათ შემდეგი ბალები: „ანალოგზე უკეთესი“ -3; „ანალოგის დონეზე“ - 2; „ანალოგზე უარესი“ - 1; „ანალოგზე გაცილებით უარესი“ - 0.

ამ მეთოდიკით 3 და 4 მმ დიამეტრის ახალი დანაფარიანი ელექტროდები შევადარეთ ანალოგს. პირველ და მეორე კრიტერიუმებისათვის გამოყენებულ იქნა ათ-ათი განმეორებითი (სულ 80) ანთება. შედარებისას რკალის ელექტრული პარამეტრები იყო ერთნაირი და ექსპერიმენტებისას არ იცვლებოდა. მეორადი ანთებისას დაახლოებით თანაბარი იყო ახალი და ანალოგი ელექტროდების სიგრძე. აქვე უნდა ავღნიშნოთ, რომ დანაფარის გამონაშვრის სრული რღვევა (მესამე კრიტერიუმი) ფაქტიურად არ დაფიქსირდა. მოყვანილი კრიტერიუმებით შეფასებისას და მინიჭებული ბალების მიხედვით აღმოჩნდა, რომ 75% განმეორებითი ანთება შეესაბამებოდა „ანალოგის დონეზე“ ბალს. 15% - „ანალოგზე უკეთესი“ და 10% - „ანალოგზე უარესი“.

ელექტროდების განმეორებით ანთების შეფასება ასევე მოვახდინეთ, გაუმდნარი დანაფარის მილისებური გამონაშვრის ტორსისა და ლითონის ფირფიტას შორის საკონტაქტო წინაღობის საანგარიშო მნიშვნელობით [71].

საკონტაქტო წინაღობის საშუალო საანგარიშო მნიშვნელობა შეადგენდა MP-3 ელექტროდებისათვის 52, 23 მომ-ს, ხოლო ახალი დანაფარიანი ელექტროდებისათვის 48, 16 მომ-ს.

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ახალი დანაფარიანი ელექტროდების გაუმდნარი დანაფარისაგან მილისებური გამონაშვრი დენგამტარია. ელექტროდის გაუმდნარი დანაფარის მილისე-

ბური გამონაშვერის შეხებისას ძირითად ლითონთან ადვილად იკვრება წრედი და აღიზნება რკალი, მეორადი ანთება საიმედოა. დანაფარი თანაბრად დნებოდა, მეტისმეტი გაშხეფვის გარეშე, არ ხდებოდა ნაჭრების ჩამოშლა [67].

ელექტრული რკალის პირველადი და მეორადი ანთების სიმარტივე დაკავშირებულია დანაფარში შემავალი მაიონიზებელი ანუ მასტაბილიზებელი ელემენტების იონიზაციის პოტენციალზე, სწორედ ისინი განსაზღვრავენ რკალის აღზნების სირთულეს. რაც ნაკლებია იონიზაციის პოტენციალი, მით უფრო ადვილია რკალის ანთება. ზოგიერთი ელემენტის იონიზაციის პოტენციალის მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 31.

ცხრილი 31. ზოგიერთი ელემენტის იონიზაციის პოტენციალი

ელემენტი	Cs	Rb	K	Na	Ca	Fe	C	H ₂	N ₂	Ar	He
<i>U₆</i>	3,88	4,2	4,3	5,11	6,11	7,83	11,22	13,6	14,51	5,72	4,5

ჩვენს დანაფარში შემავალი კალიუმის და კალციუმის პროცენტული რაოდენობა უზრუნველყოფს რკალის აღზნების სტაბილურობას.

2.4.4. ახალი დანაფარიანი ელექტროდის ამოწვასა და გაშხეფებაზე დანაკარგების კვლევა

ელექტროდებისადმი წაყენებული მოთხოვნებიდან ერთ-ერთია ელექტროდის ამოწვასა და გაშხეფებაზე მინიმალური დანაკარგების უზრუნველყოფა, რაც მნიშვნელოვნად განსაზღვავს ტექნოლოგიური პროცესის ეკონომიურობას.

დანაკარგები ამოწვასა და გაშხეფვაზე გამოითვლება (2)ფორმულით [72]. გადნობილი და დადნობილი ლითონის მასა განისაზღვრებოდა უშუალოდ დადუღების პროცესის დასრულების მერე. კერძოდ კი, 10 მმ სისქის დაბალნახშირბადიანი ფოლადის (ფლ.3) ფირფიტებზე ვაწარმოებდით დადუღებას. შედუღების კვების წყაროდ გამოვიყენეთ BДУ -506 ტიპის მუდმივი დენის კვების წყარო და შემუშავებული 3 მმ დიამეტრის ახალ დანაფა-

რიანი ელექტროდები. დადულებამდე და დადულების შემდეგ იწონებოდა ფირფიტა ($m_{ფ}, m_{დე.}$), ხოლო მათი მასების სხვაობა გვაძლევდა დადულებული ლითონის მასას ($Q_{დაფ} = m_{დეფ} - m_{ფ}$) გამდნარი ლითონის მასის განსაზღვრისათვის იზომებოდა ელექტროდის სიგრძე ($l_{ელ}$) და დადულების შემდეგ დარჩენილი ნაშრის სიგრძე, ($l_{ნაშფ}$) ხოლო მასა გამოითვლებოდა ფორმულით:

$$Q_{დაფ} = \frac{\pi d^2}{4} \rho (l_{ელ} - l_{ნაშფ})$$

აქ, ρ - საელექტროდო ღეროს სიმკვრივეა, ხოლო d -ელექტროდის დიამეტრი.

დანაფარიანი ელექტროდების მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს გადნობის კოეფიციენტი, რომელიც იანგარიშება ფორმულით:

$$\alpha_{დაფ} = \frac{Q_{დაფ}}{It} \left(\frac{\delta}{a \cdot b \sigma} \right)$$

სადაც $Q_{დაფ}$ რკალის ნათების t დროში გადნობილი ლითონის მასაა, გ-ში; I – შედულების დენია, ამპერებში.

ცდები ტარდებოდა, როგორც ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდებისათვის (მე-4 ვარიანტი ცხრილი 24 და გაუმჯობესებული დანამატით ცხრილი 25), ასევე, “GK”- ტიპის ელექტროდებისათვის. ექსპერიმენტები ჩატარდა დენის ძალის მნიშვნელობებისათვის 80 – 120 ა დიაპაზონში 10 ა-ის ბიჯით. დადულება ყველა შემთხვევაში მიმდინარეობდა 30 წმ-ის განმავლობაში. კვლევისა და ანგარიშების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 32 [85].

ნახ.14-ზე მოყვანილია ამოწვასა და გაშხეფებაზე დანაკარგების დამოკიდებულება შედულების დენის ძალაზე, როგორც ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალდანაფარიანი ელექტროდისათვის, ისე “GK”-ს ტიპის ელექტროდისათვის. IV-ვარიანტის დანაფარიანი ელექტროდის შემთხვევაში საკმაოდ დიდია ლითონის დანაკარგები და შედარებისათვის მისი განხილვა აუცილებლობას არ წარმოადგენს. როგორც ვხედავთ, “GK”-ს ტიპის ელექტროდის შემთხვევაში დანაკარგები საშუალოდ 2,75%-ით მეტია გაუმჯო-

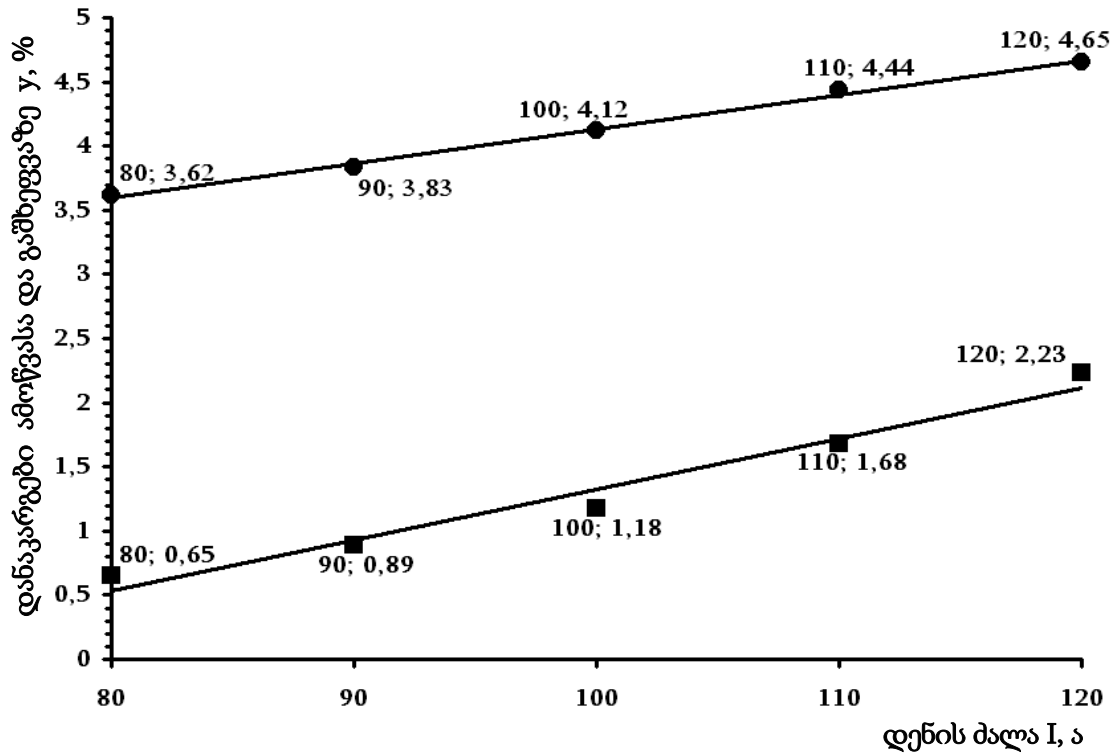
ბესებულები დანაფარიან ელექტროდთან შედარებით, რაც შეიძლება აიხსნას ტიტანის ოქსიდის გაზრდილი რაოდენობით (55%) [90].

ცხრილი 32. ელექტროდის ამოწვასა და გაშხეფებაზე კვლევისა და ანგარიშების შედეგები

ელექტროდი	I, ა	$m_{\text{ფ}}, \text{გ}$	$m_{\text{დ}}, \text{გ}$	$Q_{\text{დად}}, \text{გ}$	$l_{\text{ელ}}, \text{სმ}$	$l_{\text{ნაბფ}}, \text{სმ}$	$Q_{\text{გად}}, \text{გ}$	$\gamma, \%$	$\frac{\alpha_{\text{გად}}}{\text{ა}\cdot\text{სთ}}$
IV-ვარიანტი	80	1560	1567,2	7,20	35	18	9,35	22,9	14,25
	90		1568,0	8,0		16	10,45	23,4	13,93
	100		1568,6	8,60		15	11,00	21,8	13,2
	110		1569,2	9,20		13	12,1	23,4	13,2
	120		1571,5	11,5		10	13,75	16,3	13,75
გაუმჯობესებული დანამატი	80	1560	1566,95	6,95	35	22	7,0	0,65	10,6
	90		1568,00	8,00		20	8,1	0,89	10,8
	100		1569,10	9,10		18	9,2	1,18	11,0
	110		1570,0	10,0		16	10,2	1,68	11,2
	120		1571,10	11,1		14	11,4	2,23	11,4
“GK”	80	1560	1566,12	6,12	35	23	6,35	3,62	9,5
	90		1566,92	6,92		22	7,20	3,83	9,6
	100		1567,86	7,86		20	8,20	4,12	9,8
	110		1568,80	8,80		18	9,20	4,44	10,0
	120		1569,70	9,70		16	10,2	4,65	10,2

ცხრილის მონაცემების მიხედვით ვიანგარიშეთ გადნობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა, რომელმაც თითოეული შემთხვევისათვის შეადგინა: IV-ვარიანტი: $\alpha_{\text{გად}} = 13,7$ გ/ა-სთ; გაუმჯობესებული დანამატი: $\alpha_{\text{გად}} = 11$ გ/ა-სთ; “GK” : $\alpha_{\text{გად}} = 9,82$ გ/ა-სთ.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ: ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის სიმტკიცე არ განსხვავდება “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის მექანიკური სიმტკიცისაგან; დატენიანების ხარისხი “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარებთან შედარებით დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით; “GK”-ს ტიპის ელექტროდის შემთხვევაში დანაკარგები ამოწვასა და გაშხეფებაზე 2,75 %-ით მეტია მეტია ახალ დანაფარიან ელექტროდთან შედარებით. ამგვარად, ელექტროდი სავსებით შეესაბამება მათდამი წაყენებულ მოთხოვნებს [42].



ნახ. 14. გაშეფვისა და ამოწვის დამოკიდებულება შედულების დენის ძალაზე

2.5. შენადული ნაკერის მეტალოგრაფიული და მექანიკური თვისებების კვლევა

ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის თვისებების კვლევამ მოგვცა დადებითი შედეგები და გვაჩვენა, რომ კასპის მადანის ბაზაზე დამზადებული დანაფარი თავისი თვისებებით არა თუ არ ჩამოუვარდება საქართველოში ფართოდ გამოყენებულ „GK“ ტიპის ელექტროდებს, არამედ, ზოგიერთ კომპონენტში სარგებლობს უპირატესობით.

შენადულ შეერთებათა და შენადული კონსტრუქციების საიმედოობა და მუშაობის უნარი განისაზღვრება შენადული ნაკერების ხარისხით, მაკრო და მიკროსტრუქტურის ხასიათით, ქიმიური შემადგენლობის ერთგვაროვნებით, მათში დეფექტების არსებობით. ლითონის კონსტრუქციების დადლილობის მედეგობაზე გავლენას ახდენს შენადულ შეერთებათა მექანიკური და სტრუქტურული არაერთგვაროვნებები [73, 74].

შენადული კონსტრუქციების დაპროექტებისას და დამზადებისას მნიშვნელოვანია შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლების შესწავლა, შრომისუნარიანობის კრიტერიუმების დადგენა და სხვა. ამ მიმართულებით როგორც საზღვარგარეთ, ისე საქართველოშიც მიმდინარეობს სერიოზული სამეცნიერო მუშაობა [75÷ 77,91,92].

1.3 თავში ავლნიშნეთ, რომ საქართველოში მაღალსართულიანი კორპუსებისა და მაგისტრალური მილსადენების მშენებლობამ გაზარდა მოთხოვნები შენადული შეერთებების სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მიმართ. ამიტომ, მნიშვნელოვანია შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების შესწავლა და მეტალოგრაფიული კვლევა.

კვლევებისას შესწავლილი იქნა შენადული ნაკერის ისეთი მექანიკური თვისებები, როგორცაა: სიმტკიცის ზღვარი, დენადობის ზღვარი, ფარდობითი წაგრძელება, დარტყმითი სიბლანტე. შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების შესასწავლად გამოვიყენეთ სტანდარტული მეთოდები. კერძოდ, გაჭიმვაზე გამოცდები ჩატარდა FPZ – 100 ტიპის მანქანაზე. მიღებული შედეგების საფუძველზე თეორიულად გავიანგარიშეთ შენადული ნაკერის ლითონის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მაჩვენებლები. დარტყმითი სიბლანტე შევისწავლეთ სტანდარტული მეთოდით – დარტყმითი ლუნვით ქანქარა ურნალზე. სისალის გაზომვები ჩატარდა TK – 2 ტიპის როკველის წნეხზე და PMT - 3 ტიპის მიკროსისალის მზომ მიკროსკოპზე. შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურული კვლევები ტარდებოდა ოპტიკურ მიკროსკოპზე NEOFOT- 32 , გადიდებებით X25 , X100 და X360.

ვაწარმოებდით 10 მმ სისქის დაბალნახშირბადიანი ფოლადის (ფლ3) ნამზადების შედეგებს. როგორც ავლნიშნეთ, რკალის სტაბილური ნათება და წიდის ქერქის მოცილება მოწმდებოდა უშუალოდ შედეგების პროცესის შესრულებისას. ვახორციელებდით ნიმუშების ტესტურ და პირაპირა ცალმხრივ შედეგებს. შედეგების დენი განისაზღვრებოდა შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$I_{\text{აღე}} = \frac{\pi d^2}{4} i, \text{ ა}$$

სადაც $d_{ელ}$ - ელექტროდის დიამეტრია, მმ; i - დენის დასაშვები სიმკვრივეა, ა/მმ².
 3 მმ დიამეტრის ელექტროდებისთვის ვიღებდით 17 ა/მმ²:

$$I_{აქვ} = \frac{3,14 \cdot 9}{4} \cdot 17 \approx 120 \text{ ა}$$

ხოლო 4 მმ დიამეტრის ელექტროდებისთვის 14 ა/მმ²:

$$I_{აქვ} = \frac{3,14 \cdot 16}{4} \cdot 17 \approx 175 \text{ ა}$$

შედულებისას მიღებული ნაკერების ვიზუალური შეფასებისას დადგინდა, რომ ნაკერის ლითონში არ შეიმჩნეოდა ბზარები, ჩამონაგლეჯები და ზედაპირული ფორები. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ შედულებისას წარმოქმნილი თხევადი წიდა თანაბრად განიღვრებოდა ნაკერის ზედაპირზე და უზრუნველყოფდა ნაკერის ლილვაკის სწორ ფორმირებას. ხოლო, გაცივების შემდეგ წიდა ადვილად სცილდებოდა ნაკერის ზედაპირს, რაც დაკავშირებულია ნაკერის ლითონისა და წიდის მოცულობითი თერმული გაფართოების კოეფიციენტებს შორის სხვაობასთან [13, 78]. ტესტური შეერთების ნიმუში ნაჩვენებია ნახ. 15-ზე:



ნახ. 15. ტესტური შეერთების ნიმუში

მიღებული კუთხური და პირა-პირა ნაკერები კი ნაჩვენებია ნახ. 16-ზე. ყველა შემთხვევაში ნაკერის პარამეტრების შეფასებამ აჩვენა, რომ ისინი სავსებით აკმაყოფილებენ სტანდარტის მოთხოვნებს.

შევისწავლეთ შენადული ნაკერის ლითონის სისალის განაწილება სიღრმის მიხედვით. შენადული ნაკერის, მიმდებარე არეებისა და ფუძე ლი-

თონის სისალის გაზომვის შედეგები მოყვანილია ნახ.17-ზე.



ა.



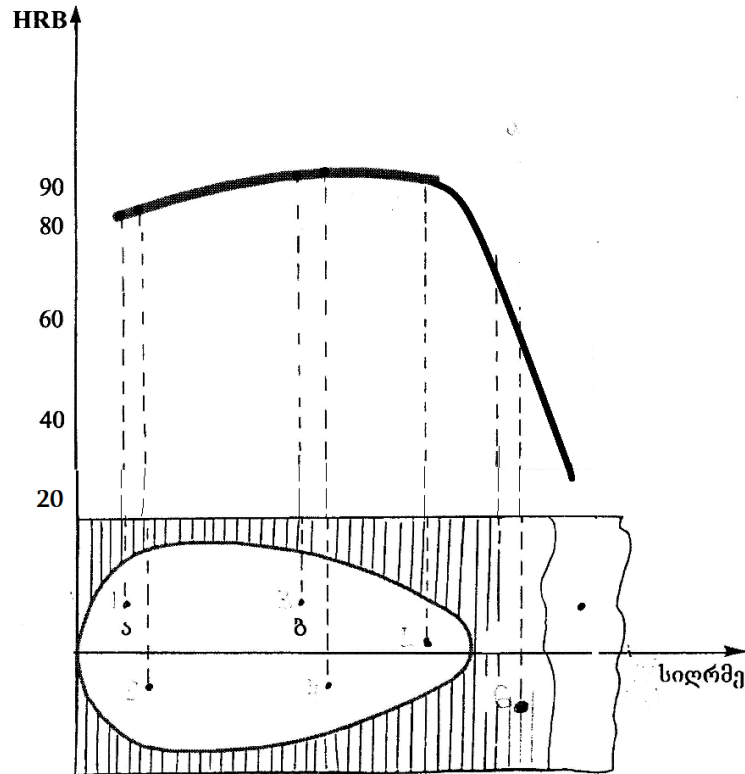
ბ.

ნახ. 16. შენადული ნაკერები
ა) პირა-პირა ნაკერი; ბ) კუთხური ნაკერი

გრაფიკიდან ნათლად ჩანს, რომ ლითონს შედარებით დაბალი სისალე გააჩნია ნაკერის ზედაპირზე, ნაკერის სიღრმისაკენ კი მატულობს. ძირითად ლითონზე გადასვლისას კვლავ მცირდება, რასაც გრაფიკზე შეესაბამება დაღმავალი მრუდი. საერთო ჯამში სისალის ცვლილების დიაპაზონია HRB 68-82 .

თავში 2.3. ავლნიშნეთ, რომ დანაფარიანი ელექტროდი, რომელიც დამზადებული იყო მხოლოდ თეთრი და სალათისფერი ნატეხებისაგან მიღებული ნარევით, მოგვცა უარყოფითი შედეგები, როგორც ტექნოლოგი-

ური თვალსაზრისით, ისე შენადული ნაკერის დაბალი ხარისხით და მექანიკური თვისებებით (ნახ.7, ცხრილი 23).



ნახ. 17. შენადული ნაკერის, მიმდებარე არეებისა და ფუძე ლითონის სისალის განაწილება სიღრმის მიხედვით

შემდგომ ეტაპზე გამოკვლეული იქნა ის გაუმჯობესებული ელექტროდები, სადაც დანამატის სახით შევიყვანეთ ტიტანის ორჟანგი, რომელიც განაპირობებს ელექტროდის ტექნოლოგიური მახასიათებლების გაუმჯობესებას (ცხრილი 24, IV ვარიანტი), რომელშიც ტიტანის ოქსიდის რაოდენობა გაზრდილი იყო ერთში 34,88 %-მდე და მეორე, სადაც TiO_2 გაზრდილია 55 %-მდე (ცხრილი 25).

კვლევებისას დუღდებოდა 10 მმ სისქის დაბალნახშირბადიანი ფოლადი - ფლ3, რომლის ქიმიური შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 33, ხოლო მისი მექანიკური თვისებები კი მოცემულია ცხრილში 34. [5].

ცხადია, რომ შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებები უნდა აღემატებოდეს ძირითადი ლითონის თვისებებს.

ცხრილი 33. დაბალნახშირბადიანი ფოლადის - ფლ. 3-ის ქიმიური შედგენილობა, %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As	Fe
0,14-0,22	0,4-0,65	0,12-0,3	≤0,05	≤0,05	≤0,30	0,30	≤0,30	≤0,08	~97

ცხრილი 34. შესადულებელი ლითონის მექანიკური მახასიათებლები

ძირითადი ლითონის	σ _{დრ.} მგპა	σ _{დნ.} მგპა	δ, %	α _H , კჯ/მ ²	გალუნვის კუთხე, α
ფლ.3 გოსტ.-380-94 მშგ.	370-480	არანაკლებ. 245	26	700	120

კვლევებისას ნიმუშები შედუღდა, როგორც ჩვენს მიერ დამზადებული ყველა ვარიანტის დანაფარიანი ელექტროდებით, ასევე “GK” - ტიპის ელექტროდებითაც. შედუღებას ვაწარმოებდით მოკლე რკალით და უკუპოლარობით. შესადულებელი ნაწიბურები წინასწარ იწმინდებოდა ჟანგისაგან, ზეთისაგან. ელექტროდები გამოიწვა 350–370° ტემპერატურაზე 1 საათის განმავლობაში. შედუღებისათვის გამოყენებული იყო BДУ-500 ტიპის შედუღების კვების წყარო ვარდნილი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლით.

შედუღების რეჟიმები 2, 3 და 4 მმ დიამეტრის ელექტროდებისათვის მოყვანილია ცხრილში 35 [6, 79].

მექანიკურ თვისებათა შესასწავლად მზადდებოდა სტანდარტული ბრტყელი ნიმუშები, რომლებსაც FPZ – 100 ტიპის მანქანაზე ვცდიდით გაჭიმვაზე. ქვემოთ მოგვყავს მხოლოდ ექვსი ნიმუშის გამოცდისას მიღებული შედეგები: ნიმუშები N1, N2 და N6- შედუღებულია “GK” - ტიპის ელექტროდებით, ხოლო ნიმუშები N3, N4 და N5 – 55%-მდე ტიტანის ჟანგით გაუმჯობესებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდით.

თვითმწერზე ფიქსირდებოდა გაჭიმვის დიაგრამები კოორდინატებში „დატვირთვა - დეფორმაცია“. გამოცდილი ნიმუშებიდან გაანგარიშებული იქნა ლითონის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მაჩვენებლები. გაჭიმვაზე გამოცდა ჩატარდა მხოლოდ პირაპირა შედუღების ნიმუშებზე.

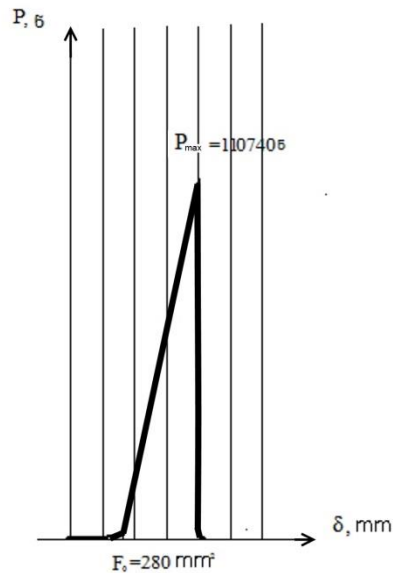
ცხრილი 35. შედუღების რეჟიმები

$d_{ელ}, მმ$	ელექტროდის სიგრძე, მმ	დენის ძალა ამპერებში		
		ნაკერის სივრცული მდგომარეობა		
		ქვედა	ვერტიკალური	ჭერული
2	250	45–65	30–40	30–45
3	350	80–100	60–80	70–90
4	450	130–160	100–130	120–140

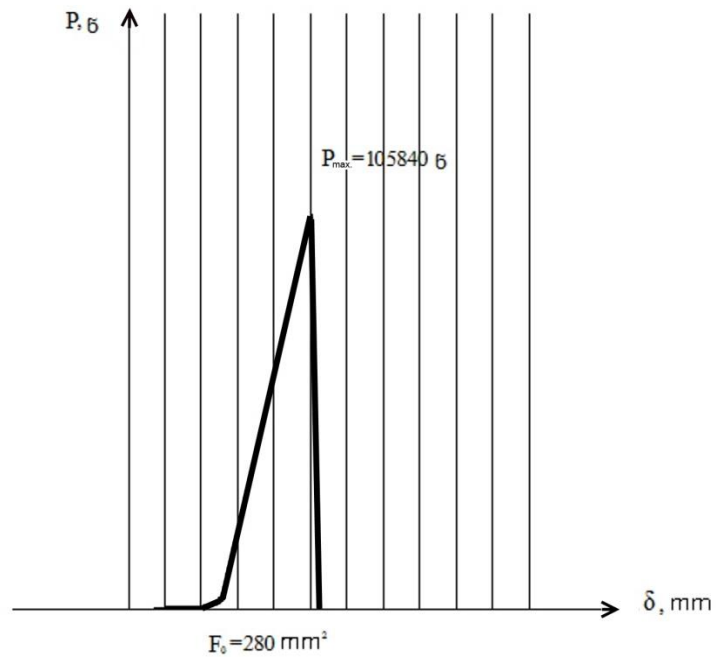
გაჭიმვის დიაგრამის აბცისათა ღერძზე მოცემულია გამჭიმავი მანქანის ტრავერსის გადაადგილების მნიშვნელობანი, ხოლო ორდინატათა ღერძზე მოცემულ მომენტში მოდებული ძალის სიდიდე.

გაჭიმვის დიაგრამიდან ვხედავთ თუ რა მოსდის მასალას მასზე მოდებული ძალის გავლენით. პირველი დიაგრამიდან ჩანს, რომ შენადული ნაკერი არ არის იმდენად მტკიცე და ნიმუში ინგრევა (ნახ.18). ასეთივე სურათი არის მეორე ნიმუშზე (ნახ.19). მესამე დიაგრამიდან ჩანს, რომ გაჭიმვისას დეფორმაციას ღებულობს ძირითადი ლითონი, ყველაფერი ეს ჩანს თვით გაჭიმვის ნიმუშზეც (ნახ.20). დრეკადობის უბანი იცვლება პლასტიკური დეფორმაციის უბნით. ამდროს ხდება ლითონის დეფორმაციული განმტკიცება $P_{MAX} = 117600$ ნ. დატვირთვის მიღწევისას ნიმუშზე ხდება ყელის გაჩენა. ნიმუშის კვეთი ერთ ადგილას მცირდება და გაჭიმვის დიაგრამაზე ჩანს მადეფორმირებელი ძალის შემცირება. შენადული ნაკერი იმდენად მტკიცეა, რომ გაჭიმვისას დეფორმაციას ღებულობს ძირითადი ლითონი. მსგავსი მდგომარეობაა მე-4 ნიმუშზე (ნახ. 21). ამრიგად, როცა შენადული ნაკერის სიმტკიცე საკმაოდ მაღალია ადგილი აქვს ძირითადი ლითონის დეფორმაციას. ხოლო როცა შენადული ნაკერის სიმტკიცე დაბალია მაშინ, მიუხედავად იმისა, რომ შენადულ ნაკერში განივკვეთი უფრო დიდია ვიდრე ძირითად ლითონში, მაინც ადგილი აქვს შენადული ნაკერის დეფორმაციას. ის განიცდის მყიფე ნგრევას ნიმუშებში N1, N2, N6 . ამ შემთხვევაში ლითონის გაწყვეტა ხდება დრეკადი დეფორმაციების პირობებში ანუ მყიფედ. I, II, და VI დიაგრამებზე (ნახ.18; 19; 23) მხოლოდ დამანგრეველი ძაბვაა: I-110740 ნ; II – 105840 ნ; VI – 32340 ნ. N3, N4 და N5 ნიმუშებში შესაძლებელია გაიზო-

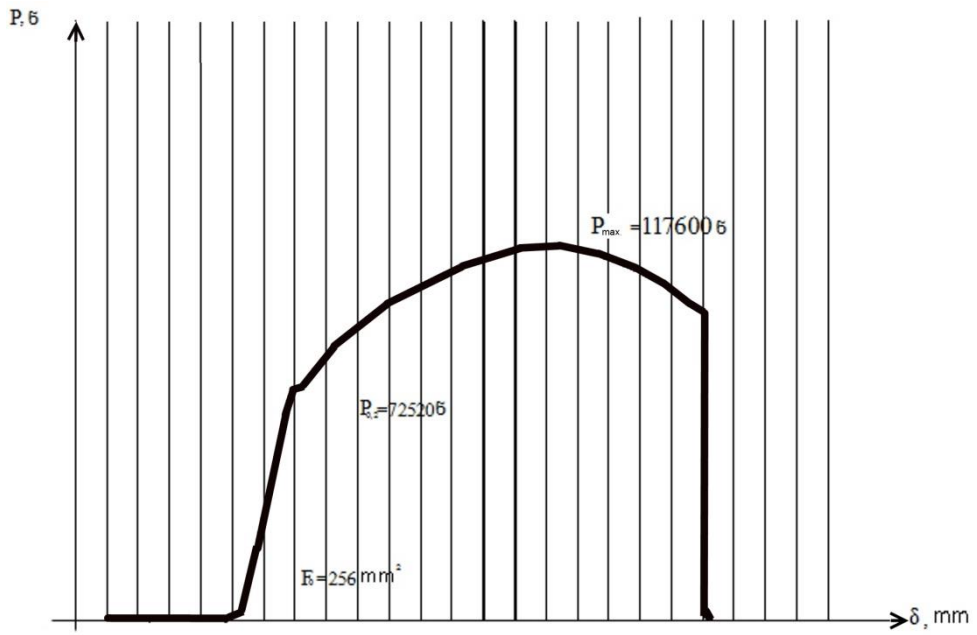
მოს სიმტკიცის ისეთი მახასიათებელი, როგორცაა დენადობის ზღვარი (σ_{დენ}; σ_{0.2}). ნახ. 20; 21; 22-ზე გმოსახული დიაგრამებიდან ჩანს: III – 72520 ნ; IV – 65660 ნ; V – 52920 ნ. ასევე შესაძლებელია გაიზომოს ლითონის პლასტიკურობის ისეთი მაჩვენებელი, როგორცაა ფარდობითი წაგრძელება δ%, მაგრამ ის იქნება არა შენადული ნაკერის, არამედ ძირითადი ლითონის.



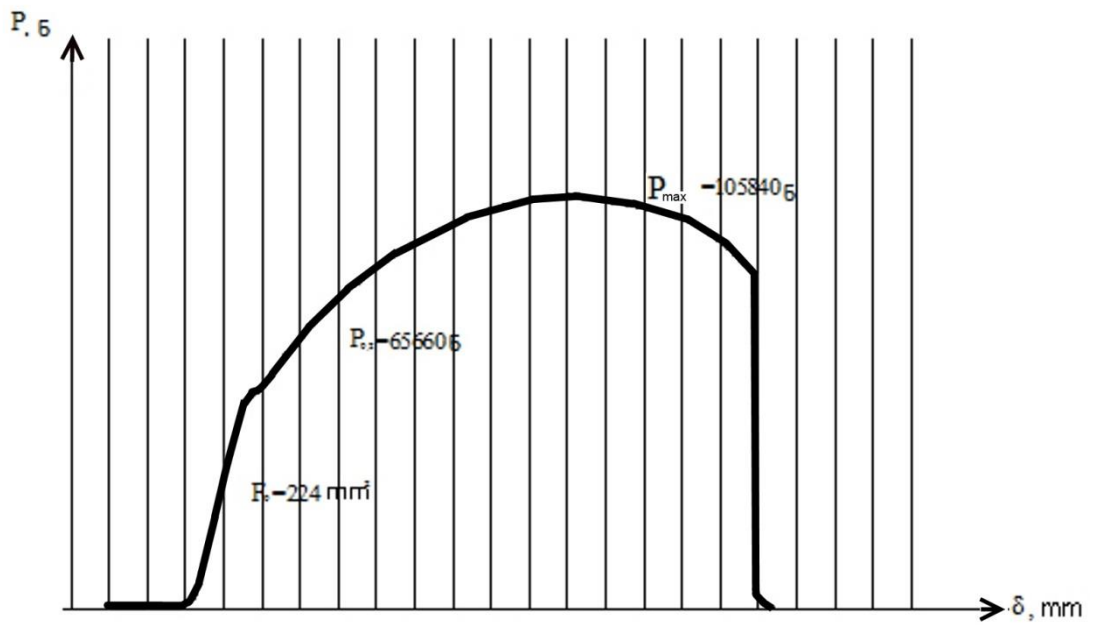
ნახ. 18. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 1.



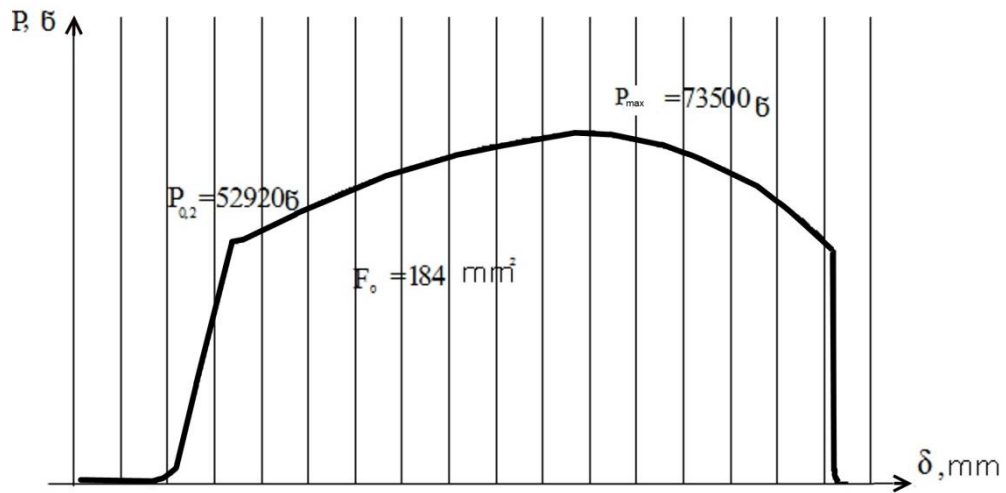
ნახ. 19. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 2



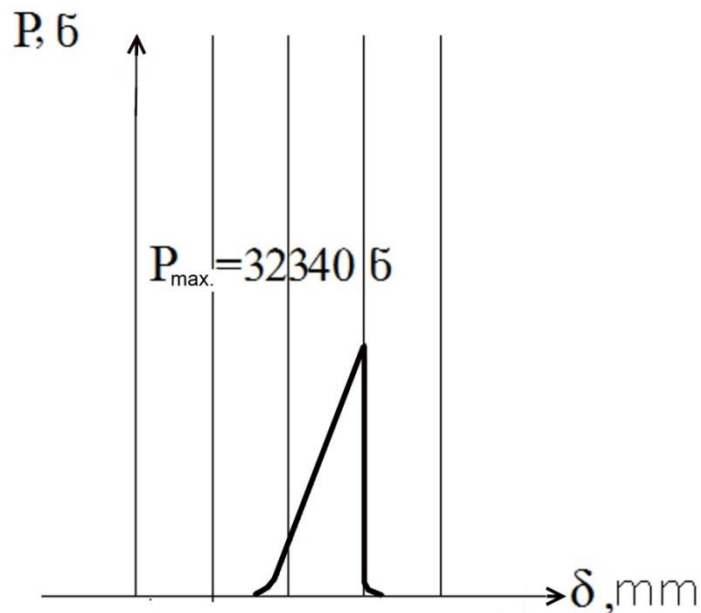
ნახ. 20. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 3



ნახ. 21. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 4



ნახ. 22. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 5



ნახ. 23. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა. ნიმუში N 6

გაჭიმვის დიაგრამებიდან ჩანს, რომ შენადული ნაკერის გამოცდის ნიმუშის წყვეტა ხდება ძირითადი ლითონის უბანში, რაც დასტურია იმისა, რომ შენადული ნაკერის სიმტკიცე აღემატება ძირითადი ლითონის სიმტკიცეს.

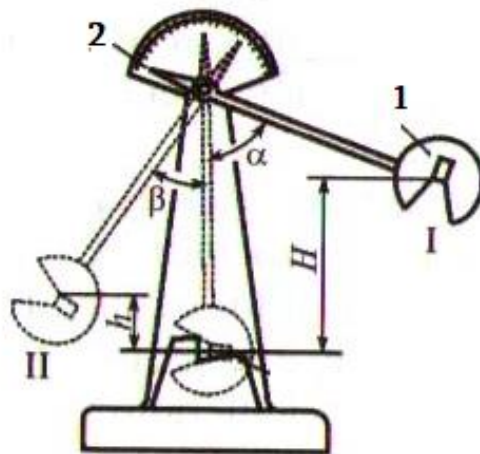
N3, N4 და N5 ნიმუშების გაჭიმვის დიაგრამიდან ნათლად ჩანს, რომ დეფორმაციას განიცდის ძირითადი ლითონი (ეს ვიზუალურდაც ჩანს თვით

ნიმუშზე). დიაგრამაზე ნათლად ჩანს დრეკადობისა და პლასტიკურობის უბნები. მექანიკური თვისებების მაჩვენებლები შემდეგია:

- დენადობის ზღვარი 289 მგპა;
- სიმტკიცის ზღვარი 468 მგპა;
- ფარდობითი წაგრძელება 31%.

რაც მისაღებ ზღვრებშია და შეიძლება დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე დამუშავებული ელექტრორკალური შედეგების საელექტროდო დანაფარადიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერების სიმტკიცე აღემატება იგივე კლასის ანალოგიური ელექტროდებით შედულებულ ნაკერებს [80, 87].

შენადული ნაკერის მნიშვნელოვან დინამიკურ მახასიათებელს წარმოადგენს დარტყმითი სიბლანტე, რომელიც შევისწავლეთ დარტყმითი ღუნვით ქანქარა ურნალზე (ნახ. 24) დანაფარების ყველა ვარიანტისათვის [81]:



ნახ. 24. ქანქარა ურნალი
1. ქანქარა; 2. სკალა.

სტანდარტული ნიმუში, ზომებით 55X10X10 მმ³ 1 მმ რადიუსის და 2 მმ სიღრმის U-ს მაგვარი ჭრილით, ვათავსებდით ორ საყრდენზე ისე, რომ ქანქარას (1) დარტყმა განხორციელდეს ჭრილის საპირისპიროდ. ქანქარა G ტვირთით ვარდება H სიმაღლიდან, დარტყმის შედეგად ნიმუში ტყდება, ხოლო

ქანქარა აგრძელებს მოძრაობას და ადის h სიმაღლეზე. ქანქარას პოტენციური ენერგიების სხვაობა ტოლია ნიმუშის რღვევაზე დახარჯული მუშაობის:

$$A = G(H - h)$$

თუ სიმაღლეთა სხვაობას გამოვსახავთ ქანქარას ღერძისა და α, β კუთხეების საშუალებით მივიღებთ ნიმუშის რღვევაზე და დეფორმაციაზე დახარჯულ მუშაობას:

$$A = Gl(\cos \beta - \cos \alpha)$$

აქ α -არის ქანქარას საწყისი აწევის კუთხეა, ხოლო β - ქანქარას აწევის კუთხე ნიმუშის რღვევის შემდეგ. კუთხეები ფიქსირდება სკალაზე (2). დარტყმითი სიბლანტე გამოითვლება ფორმულით:

$$\alpha_H = \frac{A}{S}$$

S- ნიმუშის განივი კვეთის ფართობია.

ლიტერატურაში არსებული მონაცემების მიხედვით ფლ 3 ნამზადების რუტილიან დანაფარიანი ელექტროდებით ხელით ელექტრორკალური შედუღებით მიღებული ნაკერის მექანიკური თვისებების დასაშვები მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 36. აქვე მოგვყავს “GK” ელექტროდების საპასპორტო მონაცემები [5, 38, 82, 83]:

ცხრილი 36. შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებები

ელექტროდი	სიმტკიცის ზღვარი, σ_B , მგპა	დენადობის ზღვარი, σ_T , მგპა	ფარდობითი წაგრძელება, δ , %	დარტყმითი სიბლანტე, $\alpha_{Hკჯ/მ^2}$
რუტილიანი დანაფარით	420-465	≤ 315	≤ 25	1050
“GK”	510-610	≤ 420	≤ 22	≤ 650

ჩვენს მიერ ჩატარებული მექანიკური გამოცდების შედეგები მოყვანილია ქვემოთ (ცხრილი 37). ცხრილის მონაცემებიდან ჩანს, რომ “GK” ელექტროდებით მიღებული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლები დაბალია საპასპორტო მონაცემებთან შედარებით, ხოლო კასპის მადანზე ტიტანის ოქსიდის დანამატით მიღებული დანაფარიანი ელექტროდით შედუღე-

ბული ნაკერის ლითონი ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით. ყველა პარამეტრის შედარება თვალნათლივ აჩვენებს ნაკერის მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას, კერძოდ გაიზარდა შენადული ნაკერის სიმტკიცეც და პლასტიკურობაც.

ცხრილი 37. მექანიკური გამოცდის შედეგები

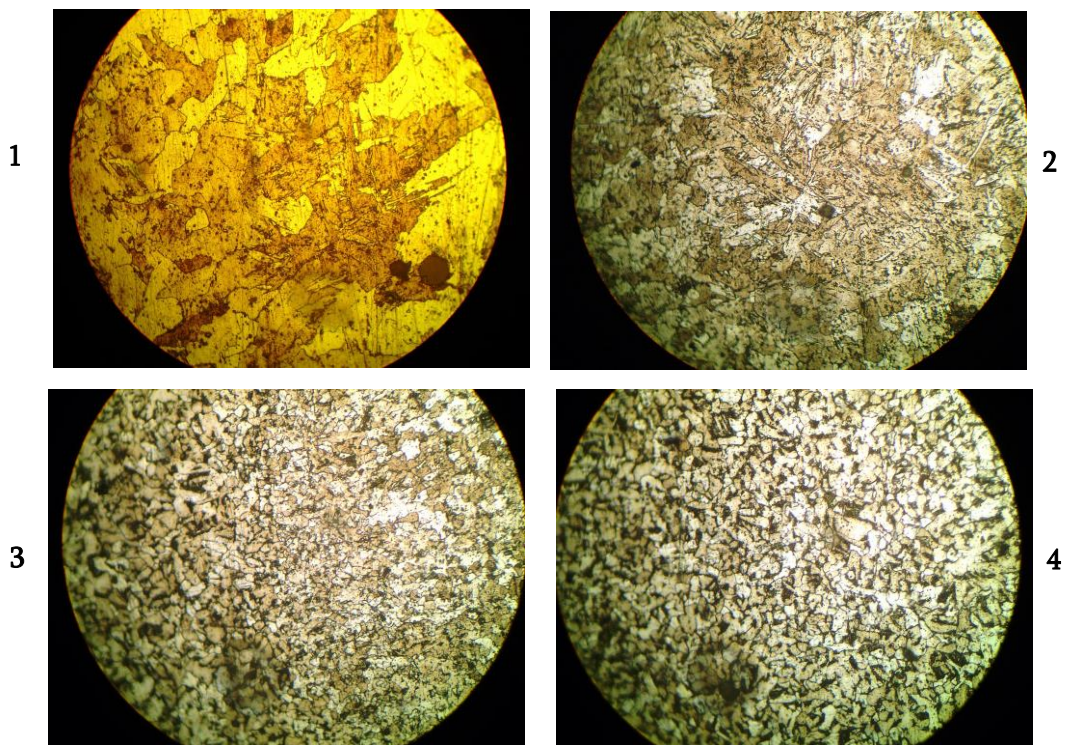
მექანიკური თვისებები	დანაფარის ვარიანტები					დანაფარი TiO ₂ დანამატით	GK
	1	2	3	4	5		
სიმტკიცის ზღვარი, σ _B , მგპა	410	425	450	440	445	468	420
დენადობის ზღვარი, σ _T , მგპა	305	292,5	280	275	280	289	268
ფარდობითი წაგრძელება, δ, %	23,0	24,0	26,0	20,0	25,0	31	20,0
ფარდობითი შევიწროება, φ, %	-	-	-	66,2	69,9	62	-
დარტყმითი სიბლანტე, α _{HCK} /მ ²	850	950	1150	1050	1200	1050	950

შენადული ნაკერის ქიმიური შემადგენლობა, რომელიც ასევე მიღებული იყო “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლოუორესცენტული ანალიზატორების გამოყენებით მოყვანილია ცხრილში 38.

ცხრილი 38. შენადული ნაკერის ქიმიური შემცველობა, %-ში (გაუმჯობესებული)

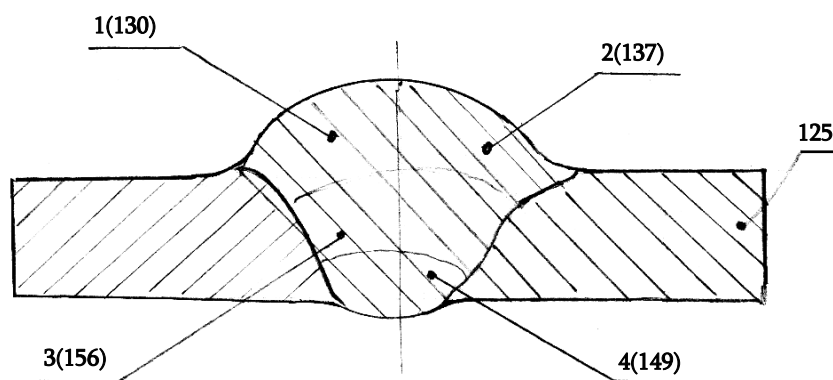
ქიმიური შემადგენლობა, %												
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu	Fe	Ni	As	P	S	
0,13	0,3-0,5	0,47	<0,2	<0,2	24-26	0,12	-			-	-	

IV ვარიანტის დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერის სტრუქტურა მოცემულია ნახ. 25. როგორც ვხედავთ, შენადული ნაკერი მრავალფენიანია, ზედა ფენა, სადაც შედუღება მთავრდება მსხვილმარცვლოვანია, ხოლო ქვედა ფენები კი წვრილმარცვლოვანი [71]. ზედა ფენის მსხვილმარცვლოვანი აგებულება, მიგვითითებს გაცივების დაბალ სიჩქარეზე. შენადული ნაკერის მიკროხეხი მოცემულია ნახ. 26-ზე.



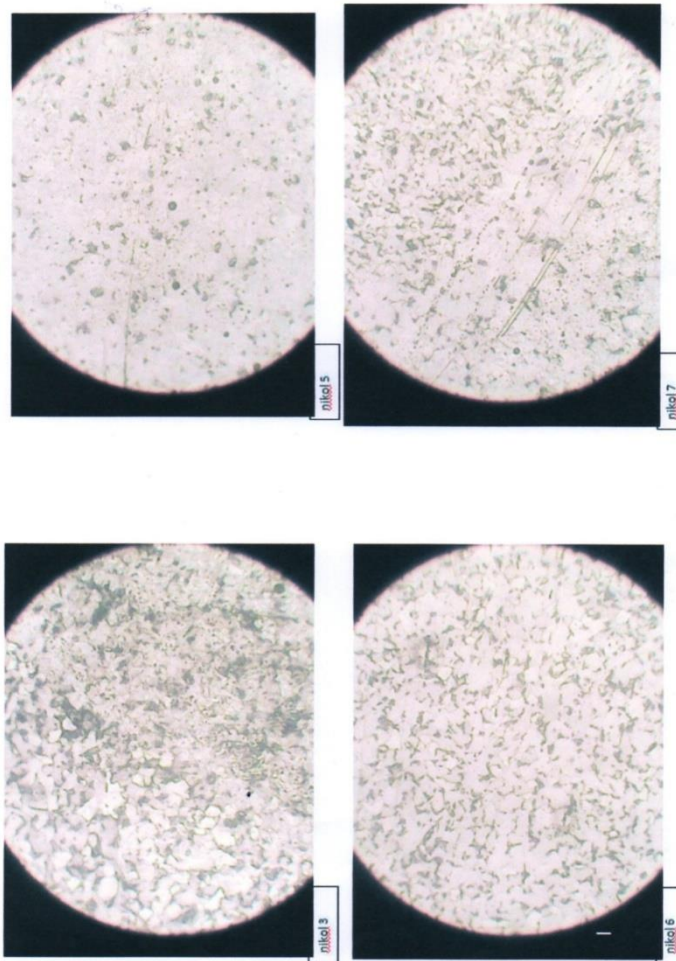
ნახ. 25. ტიტანის ჟანგით გამდიდრებული (IV ვარიანტი) დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა $\times 360$

1 – ზედა ფენა; 2 და 3 – შუალედური ფენები; 4 – ქვედა ფენა



ნახ. 26. შენადული ნაკერის მიკროხეხი

ნახ. 27-ზე ნაჩვენებია ტიტანის ოქსიდით 55%-მდე გამდიდრებული დანაფარიანი ელექტროდით შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა:

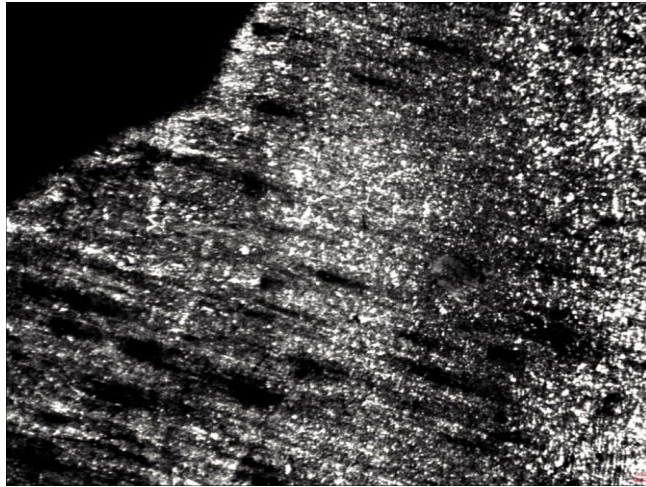


ნახ. 27. შენადული ნაკერის მიკროსტრუქტურა

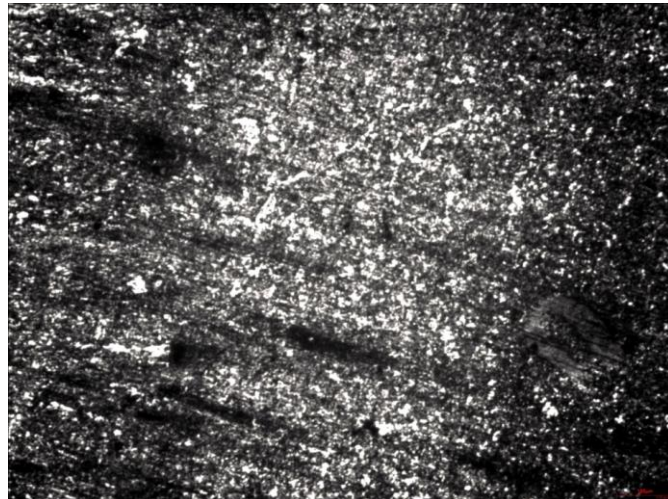
როგორც ზემოთ ავლინებით, შესრულებული იყო როგორც პირა-პირა, ისე კუთხური შეერთებები. მიკროსტრუქტურა გადავიღეთ გადიდებებზე X25 და X100-ჯერ. ნახ. 28-ზე მოცემულია შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა.

ლითონის მიკროსტრუქტურა (შენადული ნაკერიდან ძირითადი ლითონისკენ) წარმოადგენს წვრილმარცვლოვან ფერიტულ - პერლიტურ სტრუქტურას. შენადული ნაკერის ახლოს, ძირითად ლითონში შეინიშნება თერმული გავლენის ზონა, სადაც წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა შენარჩუნებულია. არ შეინიშნება მოზრდილი ზომის მარცვლები. კარგად ჩანს ზო-

ნებს შორის გადასვლა, რომელიც რომელიც არის მდორე, სუსტად გამოკვეთილი საზღვრებით.



ა) X25



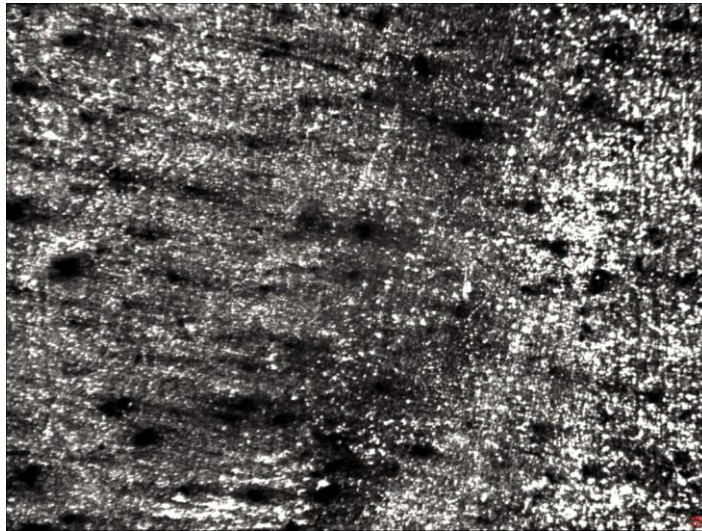
ბ) X 100



გ) X25



დ) X 100



ე) X25

ნახ. 28. შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა:

ა) -კუთხური ნაკერი შედუღების ზონა X25 ; ბ) -კუთხური ნაკერი შედუღების ზონა X 100; გ) - პირაპირა ნაკერი X25 ; დ) პირაპირა ნაკერი X 100; ე) პირაპირა ნაკერი შედუღების ზონა X25

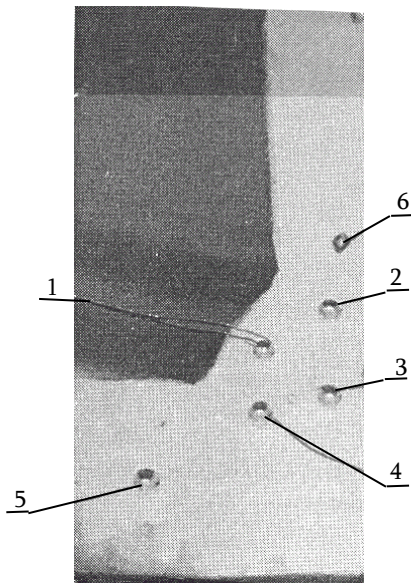
სისაღებზე გამოცდამ გვიჩვენა, რომ ამ მხრივაც არ არის საგრძნობი სხვაობა ნაკერის თერმული გავლენის ზონასა და ძირითადი ლითონის მექანიკურ თვისებებს შორის.

შენადული ნაკერის თვისებებზე ქიმიურ შედგენილობასთან ერთად მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მისი სტრუქტურა. შენადულ ნაკერში სტრუქტურა ფორმირდება შედუღების აბაზანის კრისტალიზაციის შემდეგ. იგი უზრუნველყოფს მექანიკური თვისებების დამოკიდებულებას ნაკერისა

და ძირითადი ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე, ხოლო თვით პირველადი კრისტალიზაციის სხვადასხვა წარმონაქმნები დამოკიდებულია ელექტროდისა და დანაფარის შედგენილობაზე, შედნობის სიღრმეზე, შედუღების რეჟიმზე და ა.შ.

შემუშავებული დანაფარიანი ელექტროდით დაბალნახშირბადოვანი ფოლადის შედუღების შემდეგ მიღებული ნაკერის სტრუქტურა წარმოადგენს ფერიტისა და პერლიტის თანაბარი განაწილებას, თუმცა ფერიტის მარცვლები ჭარბობს პერლიტისას. სტრუქტურა ჯამში წვრილმარცვლოვანია რაც ჩვენი აზრით აიხსნება იმით, რომ ფოლადის გადახურებულ მდგომარეობაში მცირე დროის გამო აუსტენიტის მარცვლები ვერ ასწრებს ზრდას, მეორეს მხრივ, შედუღების პირველი შრიდანვე წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღება შეიძლება აიხსნას დანაფარში ჩვენს მიერ დამატებით დნობის მაღალი ტემპერატურის მქონე მალეგირებელი ელემენტების (ციკონიუმი, ვანადიუმი, ნიობიუმი) შეყვანით და ასევე ტიტანის მე-2 ჯგუფის კარბიდების წარმოქმნით. ისინი შედუღებისას ვერ ასწრებენ გადნობას და ინარჩუნებენ ქიმიურ მდგრადობას. რკალის ჩაქრობის შემდეგ მიიღება კრისტალიზაციის ახალი ცენტრები, რაც თხევადი ლითონის გაცივების დროს იძლევა ახალი კრისტალების ჩასახვის ცენტრებს. რომლებიც ეწინააღმდეგებიან მარცვლის ზრდას. ასეთი ცენტრების არსებობა იძლევა წვრილმარცვლოვან სტრუქტურას, რაც აისახება შენადული ნაკერის მექანიკურ თვისებებზე. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა განაპირობებს შენადული შეერთების სიმტკიცეს. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის წარმოქმნა, ცალსახად მიუთითებს, ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის უპირატესობაზე.

შედარებისათვის, კუთხური ნაკერები შესრულებული იყო “GK”-ტიპის ელექტროდებითაც. ნახ. 29-ზე ნაჩვენებია კუთხური ნაკერის წერტილების განლაგება, რომელთა მიკროსტრუქტურებიც გადიდებით X360 მოცემულია ნახ. 30-ზე. კვლევები ჩატარდა მიკროსკოპ 2MMP-2P-ზე კომპიუტერული უზრუნველყოფით.



ნახ. 29. კუთხური ნაკერის წერტილების განლაგება.

1 – ნაკერის ზედა წერტილი; 2 – ნაკერის შუა წერტილი; 3 – ზედაპირის მიმდებარე წერტილი; 4 – ძირითადი ლითონი წერტილი; 5 – ძირითადი ლითონი – ქვედა ნაწილი; 6 – ძირითადი ლითონი – ზედა ნაწილი.

ქვედა ფენა შესრულებულია $\varnothing 3$ მმ დიამეტრის ელექტროდით 100-140 ა-ზე, ხოლო ზედა ფენა $\varnothing 4$ მმ დიამეტრის ელექტროდით 160-200 ა-ზე.

ნახ. 30-ზე, მარცხენა ვერტიკალურ მწკრივში ნაჩვენებია ახალ დანაფარიანი ელექტროდით შედუღებული (ნიმუში) ნაკერის მიკროსტრუქტურები, ხოლო მარჯვენა ვერტიკალურ სვეტში კი სტანდარტული, “GK”-ტიპის ელექტროდით შედუღებული ნაკერის მიკროსტრუქტურები.

შენადნულ ნაკერში შეიმჩნევა პერლიტის მოჭარბებული რაოდენობა, რომელიც შეიძლება აიხსნას ძირითად ლითონთა შედუღების ზონის შედარებით სწრაფი გაცივების ფაქტორით. ნაკერის ზედა ფენაში ფერიტის მარცვლები პოლიედრულია – წაგრძელებული, რაც აიხსნება ზედა ფენების გაცივების დაბალი სიჩქარით. ქვედა ფენაში ჩანს დეფორმაციის კვალი.

მიკროსტრუქტურებზე კარგად ჩანს, ნახშირბადიანი წვრილმარცვლოვანი ფოლადის სტრუქტურა. გამოკვეთილია სხმული ფოლადისათვის დამახასიათებელი წაგრძელებული კრისტალები, რაც გამოწვეულია გამდნარი ფოლადის დაკრისტალბით.

სიღრმისაკენ შეინიშნება დაბალნახშირბადიანი ფოლადის სტრუქტურა. აღარ ჩანს სხმული ფოლადისათვის დამახასიათებელი მოგრძო კრის-

ტალები. სტრუქტურა ერთგვაროვანია. აღსანიშნავია ისიც, რომ ამ უბანში სტრუქტურა წვრილმარცვლოვანია, რაც გამოწვეულია მალეგირებელი ელემენტების თანაბარი განაწილებით [84, 88].

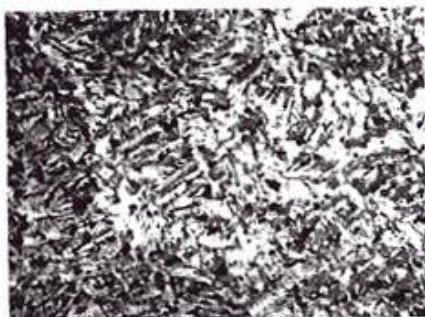
ლითონის სტრუქტურა ნაკერის მთელ მონაკვეთში ერთნაირია, არ ჩანს ფორები და შეუდუღებლობა. სტრუქტურების შედარებითი ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ პრაქტიკულად ნაკერის სტრუქტურის აგებულება ჩვენი ელექტროდით და “GK”-თი თითქმის არ განსხვავდება.



ა. წერტილი 1



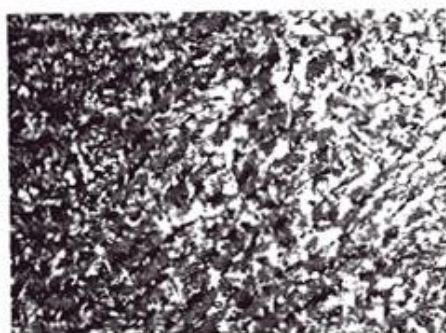
ვ. წერტილი 1



ბ. წერტილი 2



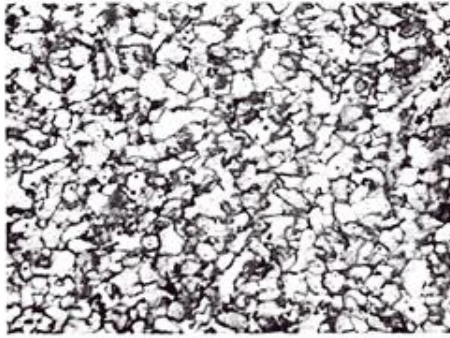
ზ. წერტილი 2



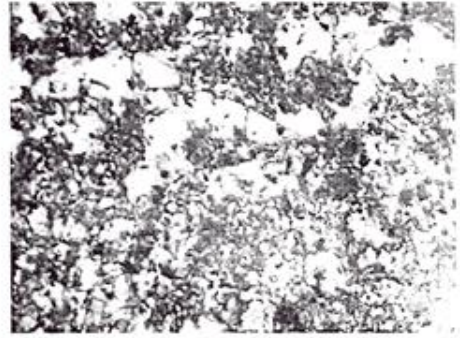
გ. წერტილი 3



თ. წერტილი 3



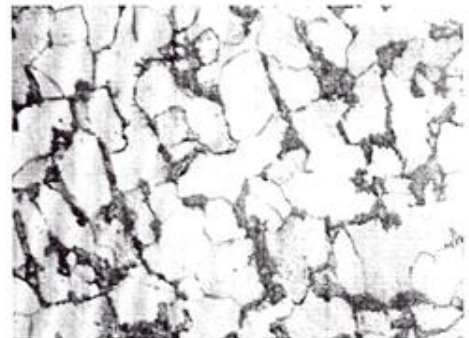
დ. წერტილი 4



ი. წერტილი 4



ე. წერტილი 5



კ. წერტილი 5

ნახ. 30. კუთხური ნაკერის მიკროსტრუქტურა (X100) წერტილების მიხედვით

ა.,ბ.,გ.,დ.,ე.-ახალ დანაფარიანი ელექტროდით შედუღებული;
ვ.,ზ.,თ.,ი.,კ.- "GK"-ტიპის ელექტროდით შედუღებული

სტატიკურ დატვირთვებზე მომუშავე კონსტრუქციების უმეტესობა მზადდება დაბალნახშირბადოვანი ფოლადებისაგან. ეს ფოლადები გამოირჩევა კარგი შედუღებადობით. დადგენილია, რომ ასეთი კონსტრუქციების შედუღებისას მიღებული ნაკერი თავისი სიმტკიცით უნდა იყოს არანაკლები ძირითადი ლითონის სიმტკიცისა, ნაკერის მიმდებარე არეებში ზხარებისა და პლასტიკურობის შემცირების გარეშე. შესაბამისად, შეიძლება გამოვიტანოთ დასკვნა, რომ შემუშავებული დანაფარით დამზადებული ელექტროდები იძლევა საშუალებას მივიღოთ შენადული ნაკერი გაუმჯობესებული მექანიკური თვისებებით.

ელექტროდის დანაფარი, რომელიც შეიცავს ტიტანის, ვანადიუმის, მანგანუმის, რკინის, ცირკონიუმის, კალციუმის, ნიობიუმის, კობალტის, სპილენძის, კალციუმის, კადმიუმის, ქრომის, ნიკელის, ალუმინის მანგანუმის,

სილიციუმის იქსიდებს, დაპატენტებულია საქპატენტის მიერ, № P 5989
გამოგონება გაცემული 2014-01-06. პატენტი თან ერთვის (დანართი) [86].

დასკვნა

1. საქართველოში არსებული ნედლეულის ბაზაზე შემუშავდა ახალი დანაფარიანი ელექტროდი, რომლის შემადგენლობაში 55 % ტიტანის ოქსიდია. საქართველოში არსებული ანალოგისაგან განსხვავებით, დანაფარის შემადგენლობაში შეყვანილია მაღალი დნობის ტემპერატურის მქონე ისეთი მალეგირებელი ელემენტები, როგორცაა: ცირკონიუმი, ვანადიუმი, ნიობიუმი. ისინი ქმნიან ახალი კრისტალების ჩასახვის ცენტრებს. რომლებიც ეწინააღმდეგებიან მარცვლის ზრდას და ხელს უწყობენ წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას;
2. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბება განაპირობებს შენადული შეერთების სიმტკიცეს. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის წარმოქმნა, ცალსახად მიუთითებს, ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის უპირატესობაზე;
3. შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის გამდნარის წიდის სიბლანტის კვლევამ აჩვენა, რომ ის პრაქტიკულად არ განსხვავდება რუტილის დანაფარიანი ელექტროდების გამდნარი წიდის სიბლანტისაგან, ტემპერატურათა შემცირების მცირე ინტერვალში მყისიერად იზრდება და ამიტომ, შეიძლება მისი გამოყენება ნებისმიერ სივრცით მდგომარეობაში შედუღებისათვის;
4. ახალი დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის შესწავლის შედეგად დადგინდა, მისი სიმტკიცე არ განსხვავდება რომ “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის მექანიკური სიმტკიცისაგან. დანაფარის ღუნვაზე შესწავლის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ გამოწვის ტემპერატურის მატება იწვევს სიმტკიცის შემცირებას დაახლოებით 24%-ით. გამოწვის ოპტიმალურ ტემპერატურას შეადგენს 200-250°C;
5. დანაფარის ჰიგროსკოპულობის შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ ჩვენს შემთხვევაში დატენიანების ხარისხი “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარებთან შედარებით დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით. ამ

ფაქტის ახსნა შეიძლება იმით, რომ ჩვენს მიერ შემაკავშირებლად გამოყენებული გვაქვს ნატრიუმის ნატივადი მინა ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$). ;

6. ელექტრული რკალის პირველადი და მეორადი ანთების შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ ელექტროდის გაუმდნარი დანაფარის მილისებური გამონაშვების შეხებისას ძირითად ლითონთან ადვილად იკვრება წრედი და აღიგზნება რკალი, მეორადი ანთება საიმედოა, დანაფარი თანაბრად დნება, ელექტრული რკალის სტაბილური აღზნება ასევე დაკავშირებულია დანაფარში შეყვანილი დაბალი იონიზაციის პოტენციალის მქონე ისეთ ელემენტებთან, როგორცაა კალიუმი და კალციუმი;
7. ელექტროდის ლითონის ამოწვაზე და გაშეფებაზე დანაკარგების კვლევით დადგინდა, რომ "GK"-ს ტიპის ელექტროდის შემთხვევაში დანაკარგები საშუალოდ 2,75%-ით მეტია ახალ დანაფარიან ელექტროდთან შედარებით, რაც შეიძლება აიხსნას ტიტანის ჟანგის გაზრდილი რაოდენობით (55%);
8. შენადული ნაკერის მექანიკური გამოცდების შედეგებმა აჩვენა, რომ "GK" ელექტროდებით მიღებული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლები დაბალია საპასპორტო მონაცემებთან შედარებით, ხოლო კასპის მადანზე ტიტანის ოქსიდის დანამატით მიღებული დანაფარიანი ელექტროდით შედუღებული ნაკერის ლითონი ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით და პლასტიკურობით. კერძოდ, სიმტკიცის ზღვარი 11,4%-ით, დენადობის ზღვარი - 7,8%-ით, დარტყმითი სიბლანტე - 10,5%-ით, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება - 55%-ით აღემატება "GK" ელექტროდებით მიღებული ნაკერის შესაბამის მახასიათებლებს;
9. შენადული ნაკერის მეტალოგრაფიულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ნაკერის ლითონს გააჩნია ნახშირბადიანი წვრილმარცვლოვანი ფოლადის სტრუქტურა. გამოკვეთილია სხმული ფოლადისათვის დამახასიათებელი წაგრძელებული კრისტალები, რაც გამოწვეულია გამდნარი ფოლადის დაკრისტალებით. სტრუქტურა ერთგვაროვანია. სიღრმი-

საკენ სტრუქტურა წვრილმარცვლოვანია, რაც გამოწვეულია მალეგირებული ელემენტების თანაბარი განაწილებით. ლითონის სტრუქტურა ნაკერის მთელ მონაკვეთში ერთნაირია, არ ჩანს ფორები და შეუდუღებლობა.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ნიკოლავა ო. ადგილობრივი ნედლეულის გამოყენება საშემდუღებლო მასალად. სტუდენტთა მე-80 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თეზისების კრებული 2012 წელი. გვ.96
2. Жизняков С.Н. Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология / С.Н. Жизняков, З.А. Сидлин. – Киев: «Экотехнология», 2006. – 368 ст.
3. Сидлин З.А., Производство электродов для ручной дуговой сварки. – Киев: Экотехнология, 2009. – 464ст.
4. Петров Г.Л. Сварочные материалы. – Л.: Машиностроение, 1972. 280-ст.
5. Патон Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Москва, изд. „Машиностроение,, 2012. 769 ст. (юбилейный выпуск).
6. Сариев Б.Е. Сварочные материалы. Учебн. пособие.Алма-аты. 2008. 209 Ст. изд. «Казиту Kz».
7. Трущенко Е.А. Сварочные материалы. Учебн. пособие о классификации. Томск, 2010. изд.ТПУ. 143 ст.
8. Зверева И.Н., Картунов А.Д., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емельюшин А.Н. Сварочные электроды для нефтегазового комплекса // Сварочное производство. 2016. № 5. Ст. 36 – 38.
9. Зверева И.Н., Картунов А.Д., Платов С.И., Михайлицын С.В., Шекшеев М.А. Электроды для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2015. Т. 15. № 1. Ст. 92 – 95.
10. Кащенко Д. А.б Брусницын Ю.Д., Баранов А.В., Руссо В.Л., Карпов И.Г. Разработка электродов для сварки магистральных трубопроводов и морской техники из высокопрочных низколегированных хладнотойких сталей. Сварочное производство. №2. 2017. Ст. 21-29
11. Закс И.А. Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справочное пособие. – СПб.: «WELCOME», 1996. – 384 ст.

12. Верхотуров А.Д. Методология создания сварочных материалов: монография / А.Д. Верхотуров, Э.Г. Бабенко, В.М. Макиенко; под ред. чл.-корр. РАН Б.А. Воронова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. 128 ст.
13. Гринберг Н.А., Рогова Е.М. Факторы, влияющие на отделимость шлаковой корки от шва. “Автоматическая сварка”, №2, 2011. Ст. 18-20
14. Ильященко Д.П., Сапожков С.Б. Разбрызгивание при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и способы его снижения. "Сварочное производство", №12, 2007. ст. 28-31.
15. Глинка Н.Л. “Общая химия”, М.: 2003. – 728 ст.
16. Ильященко Д.П., Зернин Е.А. Определение потерь на разбрызгивание металла при использовании различных источников питания, "Св. производство", №6, 2009. Ст. 36-39.
17. Гареев И.С., Собко С.А., Смирнов Ю.Г., Писарев М.С., Лежнев Д.Н., Агеев К.А. Особенности сварных соединений на основе сплава циркония с ниобием. Сварочное производство. №9. 2018. Ст. 3-9
18. Жудра А.П. Кривоносов С.Ю. Петов В.В. Влияние титана на трещиностойкость углеродистого наплавленного металла, “Автоматическая сварка” №10, 2007. Ст.50-52
19. Ватинова Е. Б. Парциальные коэффициенты перехода углерода, марганца и кремния при ручной дуговой сварке. Обработка сплошных слойстых материалов. №1. 2015. Ст. 34-41.
20. Ватинова Е. Б., Шалимов М.П. Взаимосвязь усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке. Вестник южно-уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Т. 15. №1. 2015. Ст. 88-90.
21. Ланкин Ю.Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся Электродом. Международный научно-технический и производственный журнал “Автоматическая сварка”, №1 (693), 2011. с.7-15.
22. Яровинский Л.М. Электроды ЦНИИТМАШ для наплавки и электродуговой сварки стали и чугуна /Л.М. Яровинский, В.В. Баженов, А.Ф. Колосов. – М.: ЦБТИ, 1957. – 19 с.

23. Константы взаимодействия металлов с газами: Справочное издание /Сост.: Я.Д. Коган, Б.А. Колачев, Ю.В. Левинский и др. — М.: Металлургия, 1987. — 368 с
24. Римский С. Т. Управление свойствами металла шва путем урегулирования уровня окисленности сварочной ванны при сварке в защитных газах // Автоматическая сварка. - 2011. - №12. — Ст. 20-23.
25. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. - Харьков: Metallurgizdat, 1961. — ст. 421
26. Подгаецкий В. В. Процессы образования неметаллических и газовых включений в сварных швах: Автореф. дис.... д-ра техн. наук. - Киев, 1969. - 35 ст.
27. Марченко А. Е., Скорина Н.В., Супрун С. П. Водоудерживающая способность щелочных силикатов и влияние на дегидратацию электродных покрытий. Информационные материалы СЕВ. 1987. Вып. 1. Ст.43-60
28. Chew, B. Hydrogen Control of Basic Coated MMA Welding Electrodes —the Relationship Between Coating Moisture and Weld Hydrogen / B. Chew //Metal Construction. 1982. -N 14. P. 373-377.
29. Marshall, A.W. Progress in Moisture Hydrogen Control of Lime-fluorsparand Lime-titania Electrodes / A.W. Marshall, C.M. Farrar J. // 1st International Conference. Birmingham. 13-15 September 1983. — The Welding Institute. — Cambridge, 1984. P. 81-89.
30. Походня И.К. Математическое моделирование абсорбции газов каплей электродного металла /И.К. Походня, О. М. Портнов //Автоматическая сварка. - 2003. - № 6. - Ст.5-8.
31. Пальцевич А.П. Хроматографический способ определения содержания водорода в компонентах электродных покрытий // Автоматическая сварка. - 1999.- №6. — Ст.46-48.
32. Кузьменко В.Г. Особенности плавления и отвердевания флюса при электродуговой сварке // Сварочное производство. — 1999. — №10. — Ст. 16-22.
33. Кузьменко В.Г. К вопросу о процессе электродуговой сварки под флюсом. // Автоматическая сварка. — 2011. — №5. — Ст. 12-18.

34. Волобуев О. С, Потапов Н. Н, Волобуев Ю. С .и др. К вопросу о влиянии температурного коэффициента линейного расширения на отделимость шлаковой корки. Сварочное производство. - 1989.- № 8. – Ст. 37-39.
35. Алексеев А. А, Явдошин И. Р., Войткевич В. Г, Морозов Ю. Д Влияние фосфора на структуру и свойства металла швов при сварке низколегированных сталей. Автоматическая сварка. - 1989. № 4. Ст. 7-10.
36. Явдошин И. Р, Алексеев А. А., Походня И. К., Морозов Ю. Д. Влияние серы на хладостойкость металла швов низкоуглеродистых сталей. Автоматическая сварка. 1987. - № 9. - Ст. 19-22. 78
37. Моравецкий С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (Обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки. Международный научно-технический и производственный журнал “Автоматическая сварка”, №2 (694), 2011. ст. 22-27.
38. <https://weldelec.com/pokrytie-elektrodov/rutilovoe/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 9.03. 2019
39. Головки В. В. Особенности влияния комплексного легирования на формирование структуры и механические свойства сварных швов низколегированных высокопрочных сталей / В. В. Головки, В. А. Костин, Г. М. Григоренко // Автоматическая сварка. – 2011. – №7. – Ст. 13-20.
40. Сошина Т.В., Зисман А.А., Хлусова Е.И. Влияние микролегирования ниобием на рекристаллизационные процессы в аустените низкоуглеродистых легированных сталей. Вопросы материаловедения. – 2013. - №1(73). – Ст. 31-36.
41. Мельников П.В., Михайлов-Смольняков М.С., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Влияние редкоземельных металлов на формирование структуры и свойств низколегированного металла шва. Вопросы материаловедения. – 2011. - №1(65). – Ст.150-161.
42. Майданчук Т. Б., Скорина Н. В. улучшение технологичности изготовления и сварочных свойств электродов для сварки и наплавки оловянных бронз // Автоматическая сварка. – 2014. – №6-7(733). – Ст. 176-182.
43. Херхеулидзе, Панцулая В.В. Горная промышленная энциклопедия. 5-ти томник. IV том. Москва, 1995 .

44. Природные ресурсы Грузинской ССР, том 2, Неметаллические ископаемые, изд. Акад. Наук СССР, М., 1959, 380 стр.
45. სხირტლაძე ნ.ვ. პეტროგრაფია მინერალოგიის საფუძვლები, თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბ., 1984, 328 გვ.
46. მდივნიშვილი ო. მინერალების კვლევის ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდები. თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა. თბილისი, 1985. 80 გვ.
47. Минералы и методы их исследования. Новосибирск, 1989, изд. Мин. нар. образования, 120 ст.
48. Рыбаков В. М., Воцанов К. П. Технология ручной дуговой сварки. Москва. Государственное Научно-Техническое издательство машиностроительной литературы. 1953 г. Ст. 97-111
49. <https://weldelec.com/pokrytie-elektrodiv/rutilovoe/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 9.03. 2019
50. Дмитрик В.В., Гринченко Е.Д., Сыренко Т.О. *Структура участка перегрева ЗТВ сварных соединений из теплоустойчивых перлитных сталей.* Журнал "Сварочное производство" №6, 2010. Ст. 3-6
51. Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Платов С.И., Емелюшин А.Н., Наумов С.В. Исследование вязкости жидких сварочных шлаков и расплавов электродных покрытий. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018 г. Том 61. № 4. Ст. 280 – 287.
52. Зернин Е.А., Соколов П.Д., Сабиров И.Р. Анализ влияния скорости сдвига на динамическую вязкость защитных покрытий, применяемых при дуговой сварке и наплавке // Ремонт, восстановление и модернизация. 2007. № 7. Ст. 38 – 41.
53. Изучение взаимодействия компонентов сварочных материалов с жидким стеклом / В.Т. Калинин, А.И. Николаев, В.В. Рыбин и др. // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 3(55). – Ст.31-40.
54. <http://www.spectrosystems.ru/methods/viskozimetr.shtml> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 6.03. 2019.

55. Беляев В.В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов. Успехи физических наук. 2001. Т. 171.№3. ст.267-298
56. Шлепаков В.Н., Нумейко С.М. Расчет вязкости многокомпонентных шлаковых систем порошковых проволок. Автоматическая сварка. 2003. №5. Ст. 33-36
57. Физико-химические исследования оксидов и шлаковых систем / Б.Р. Гельчинский, Э.В. Дюльдина, В.Н. Селиванов, Д.К. Белашенко. – М.: Изд-во ООО «Физматлит», 2016. – 136 ст.
58. Власов А.Ф. Особенности нагрева и плавления электродов экзотермической смесью в покрытий. Сварочное производство. №9. 2015. Ст. 12-18
59. Ширшов В.С. *Исследование влияния параметров подготовки поверхности металлоконструкций на прочность сцепления покрытия с основой.* Журнал "Сварочное производство" №7, 2012. Ст.23-26
60. Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A., Mazur I.P., Platov S.I., Sychkov A.B. The research on surfaceproperties of welding slags and electrode coatings . Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. P. 724 – 730.
61. Николаев А.И., Печенюк С.И., Семушина Ю.П., Семушин В.В., Кузьмич Л.Ф., Рогачев Д.Л., Михайлова Н.Л., Брусницын Ю.Д., Рыбин В.В. - *Взаимодействие компонентов электродных покрытий с жидким стеклом при нагревании.* Журнал "Сварочное Производство" №11, 2009. Ст. 13-17
62. Макаров С.В. Термическая обработка сварочных электродов. Технические науки – от теории к практике: материалы XII Международной заочной научно-практической конференции: Новосибирск: Изд-во «Сибирская ассоциация консультантов», 2012. – ст. 44-50.
63. Makarov S.V., Sopochnikov S.B. Use of Complex Nanopowder (Al_2O_3 , Si, Ni, Ti, W) in Production of Electrodes for manual arc welding. // World Applied Science Journal 2013, 22, pp 87-90.
64. http://www.spetselectrode.ru/download/stst37_1.htm-Эволюция производства сварочных электродов. უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 7.03. 2019

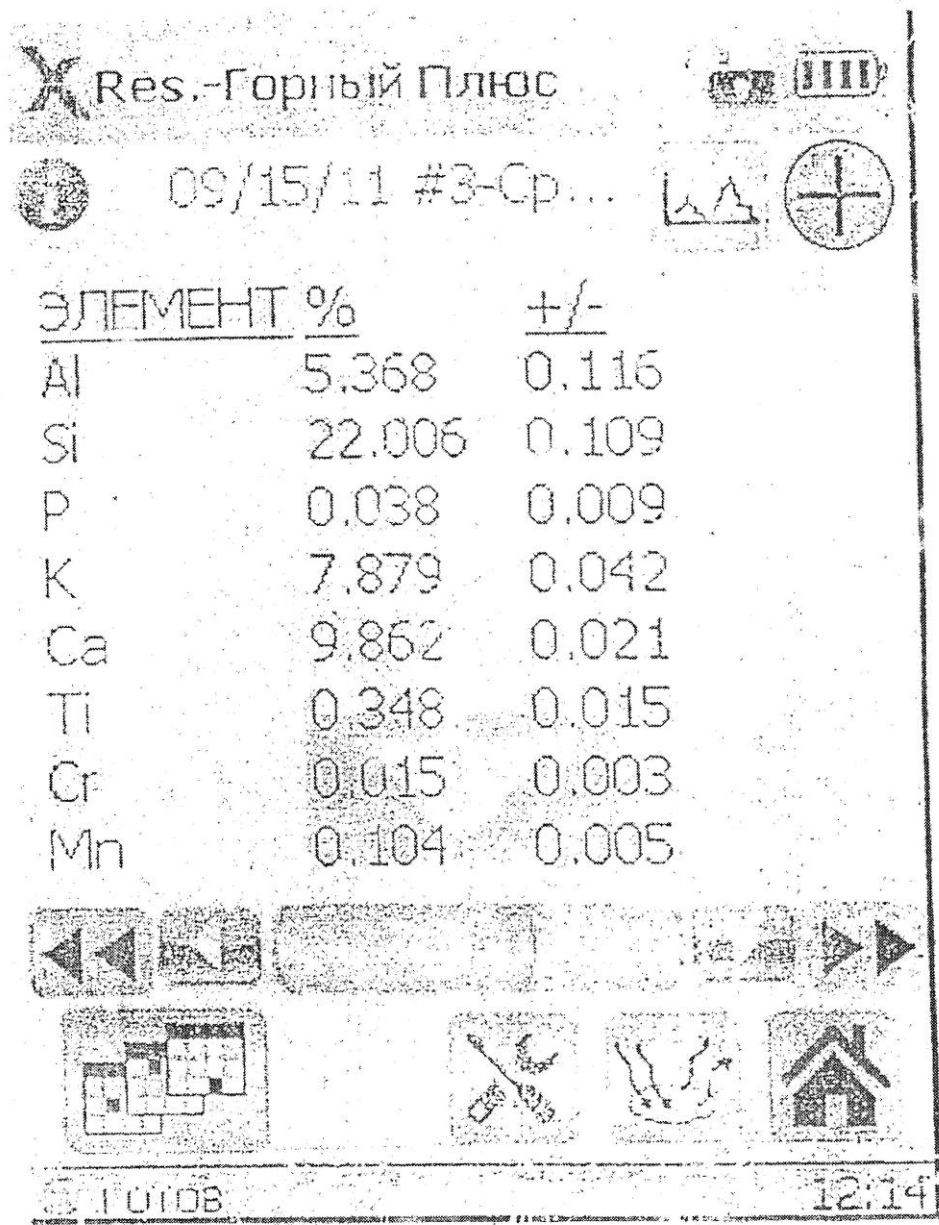
65. Ершов А. В., Ершов А. А. Сварочно-технологические свойства сварочных электродов, используемых для сварки строительных металлических конструкций // Сварка и диагностика. – 2013. – № 3. – Ст. 56–60.
66. Марченко А. Е., Гнатенко М. Ф., Чалыков А. И. и др. Сравнительная оценка технологических свойств обмазочных масс Руен, Витоша и УОНИ-13, полученная с помощью капиллярного и конического пластомеров Информ. материалы СЭВ. – Киев: Наук. думка, 1983. – Вып. 1/23. – Ст. 69–74.
67. ხუციშვილი მ.გ., სულამანიძე ა.კ., დადიანიძე გ.ა., ნიკოლაშვილი ო. ი. ხელით რკალური შედუღების ახალი საელექტროდო დანაფარისანი ელექტროდის ზოგიერთი ტექნოლოგიური მახასიათებელი. საქართველოს საინჟინერო სახელეწი. – 2014. - №4. გვ. 39-43.
68. Белов Ю.М. Ранцев А.А. О Выборе путей улучшения повторного зажигания дуги. Электродное производства на пороге нового тысячелетия: сб. Матер. Науч. – техн. семинара АО “Электрод”. 2000. ст. 106-110.
69. Булат А.В. Оценка качества электродов. "Сварочное производство", №11 2000. ст. 45-49.
70. Летягин И.Ю. Оценка повторного зажигания дуги для покрытых электродов. Пермский государственный технический университет. 2010. 80 ст.
71. Летягин И.Ю., Беленкий В. Я., Язовских В. М., Шумяков В.И. Способ исследования покрытых электродов: пат. Российская Федерация. №2366549. Заявл. 12.11.2007. опубл. 10.09. 2009. Бюл.№25. 5 ст.
72. Неровный В.М. Теория сварочных процессов. Москва. Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана. 2007. Ст.270-273
73. Власов В.М. Закономерности изнашивания гетерогенных структур высокопрочных покрытий/ В.М. Власов, Л.М. Нечаев, Н.Б. Фомичева // металловедение и термич. Обработка металлов. – 1996. ст. 21- 34.
74. Арцыбашева Н.Н., Белецкая О.М. Влияние структурного фактора на усталостное разрушение сварных швов // Труды Одесского политехнического университета, 2008г. вып. 2(30).ст. 52-55
75. Винокуров В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности– Москва. Машиностроение, 1996. 546 ст.

76. Позняков В.Д., Механические свойства металла шва и сопротивляемость образования холодных трещин в тавровых соединениях стали 13ХГМРБ // Автоматическая сварка№2. 2008. ст. 20-26.
77. ხუციშვილი მ. შენადული კონსტრუქციები და დიაგნოსტიკა. საგამომცემლო სახლი“ტექნიკური უნივერსიტეტი”, 2009. 153 გვ.
78. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке (Обзор). Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки. Международный научно-технический и производственный журнал “Автоматическая сварка”, №2 (694), 2011. ст. 22-27.
79. Гладков Э.А., Малолетков А.В. Управление технологическими параметрами сварочного оборудования при дуговой сварке: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 210 с.
80. სულამანიძე ა.კ., ხუციშვილი მ.გ., კოტიაშვილი ლ. თ., დადიანიძე გ.ა., ნიკოლავა ო.ი.ახალ დანაფარიანი ელექტროდით მიღებულ ნაკერთა მიკროსტრუქტურისა და მექანიკურ თვისებათა ანალიზი. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. 2015. N1.გვ. 99-103
81. Гуляев А.П.Металловедение. М.: Изд: Металлургия, 1986. 647 ст.
82. <https://ismith.ru/welding-equip/rutilovye-elektrody/> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 9.03. 2019
83. https://studopedia.ru/15_57233_tipi-pokritih-elektrodov-dlya-ruchnoy-dugovoy-svarki-konstruksionnih-i-teploustoychivih-staley.html უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 9.03. 2019
84. Чепрасов Д.П. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. Барнаул 2011. 107 ст.
85. სულამანიძე ა.კ., დადიანიძე გ. ა., ნიკოლავა ო. ი. შედუღების ელექტროდთა დანაფარი მასალის გამოკვლევა და დამუშავება. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. 2012. N1. ტ. 62. გვ. 82- 83
86. სულამანიძე ა., დადიანიძე გ., ნიკოლავა ო., ბერიჩიკიძე ა. ელექტროდების დანაფარი. საქართველო. პატენტი P 5989, 01.06.2014 წ. განაცხადი 12991/01. 04. 07. 2013 წ.

87. Негода Е.Н. *Оценка выносливости сварных соединений из стали ВСтЗсп при наличии остаточных напряжений*. Журнал "Сварочное производство" №4. 2008. Ст. 8-11
88. Синкина Е.А., Кривоносова Е.А. Влияние типа покрытия электрода на коррозионную стойкость металлов шва стали 08Х18Н10Т. Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. №2. 2011. Ст. 1-6
89. Патон Б.Е. Технология электрической сварки плавлением. Москва, Государственное Научно-Техническое издательство машиностроительной литературы. 1962 г. Ст. 256-294
90. Донченко Е. А. — *Процесс распространения теплоты при наплавке валика на массивную деталь*. Журнал "Сварочное производство" №7, 2012. Ст. 12-16
91. Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vyshemirskii E.M. Special features of the evaluation of the weldability of low-carbon high-strength pipe steels // *Welding International*. 2011. Vol. 25. No. 10. P. 777 – 783.
92. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Ramus' A.A., Ramus' R.O. Control of softening processes in the heat-affected zone during welding of high-strength steels // *Metal Science and Heat Treatment*. 2016. Vol. 58. No. 7-8. P. 435 – 441.

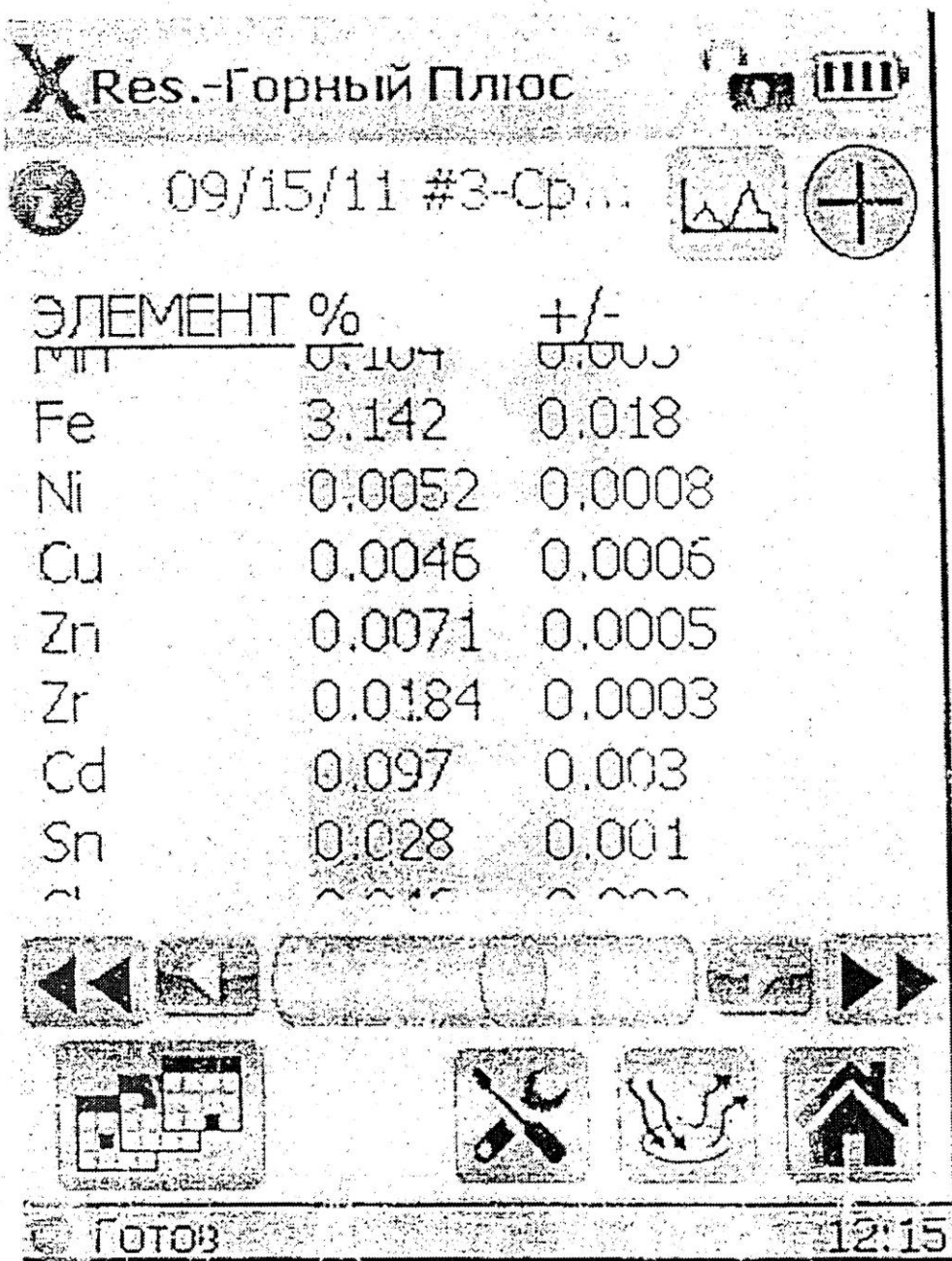
දානාර්ත

რუხი ნატეხები



ცხრილი 1. "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლოუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის რუხი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა

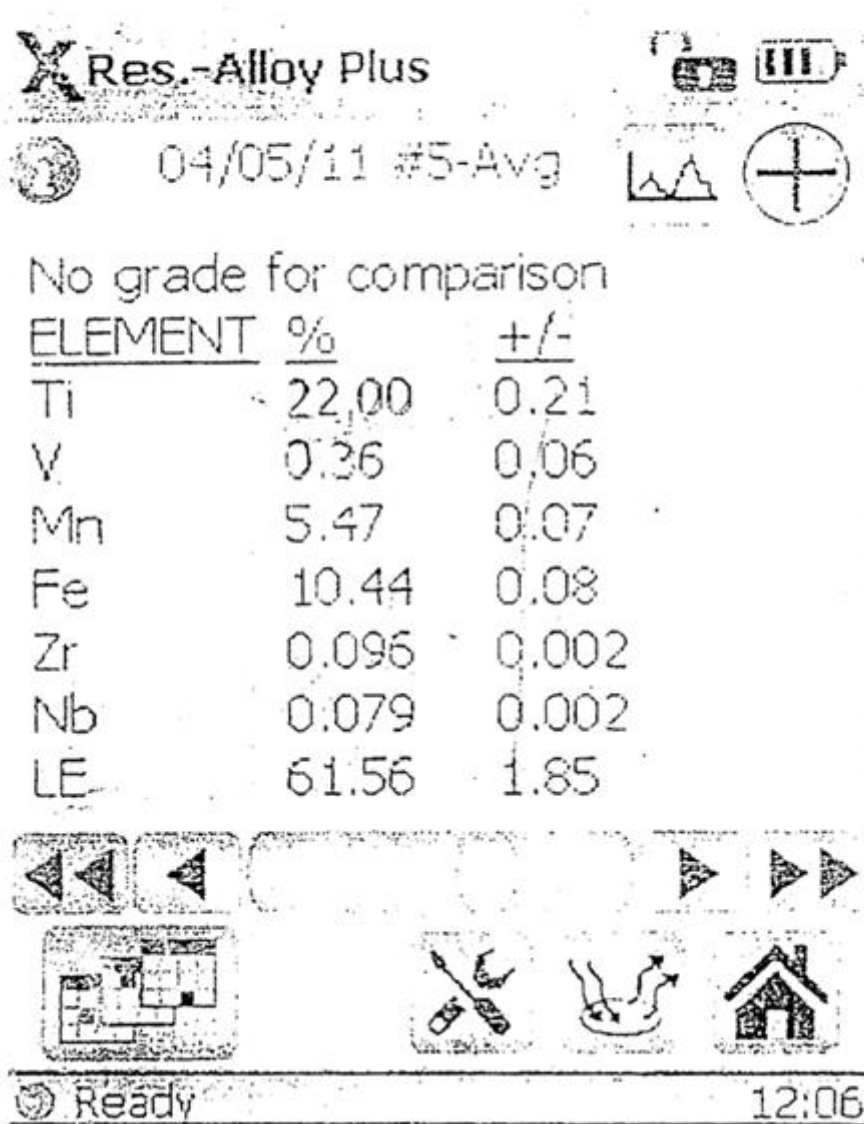
რუხი ნატეხები



ცხრილი 1. -ის გაგრძელება. "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის რუხი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა

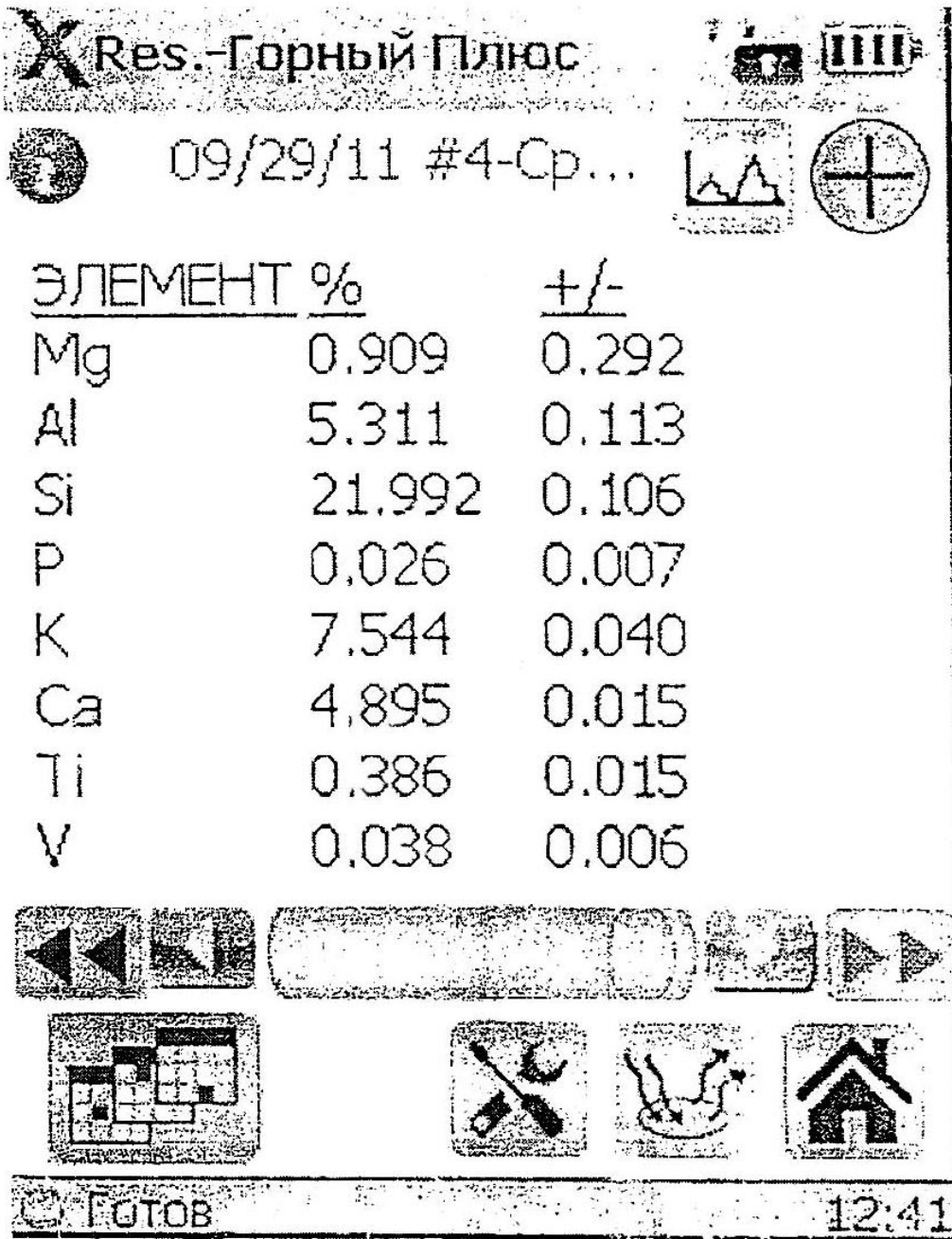
GE P 2013 5989 B

სალათისფერ ნატეხები



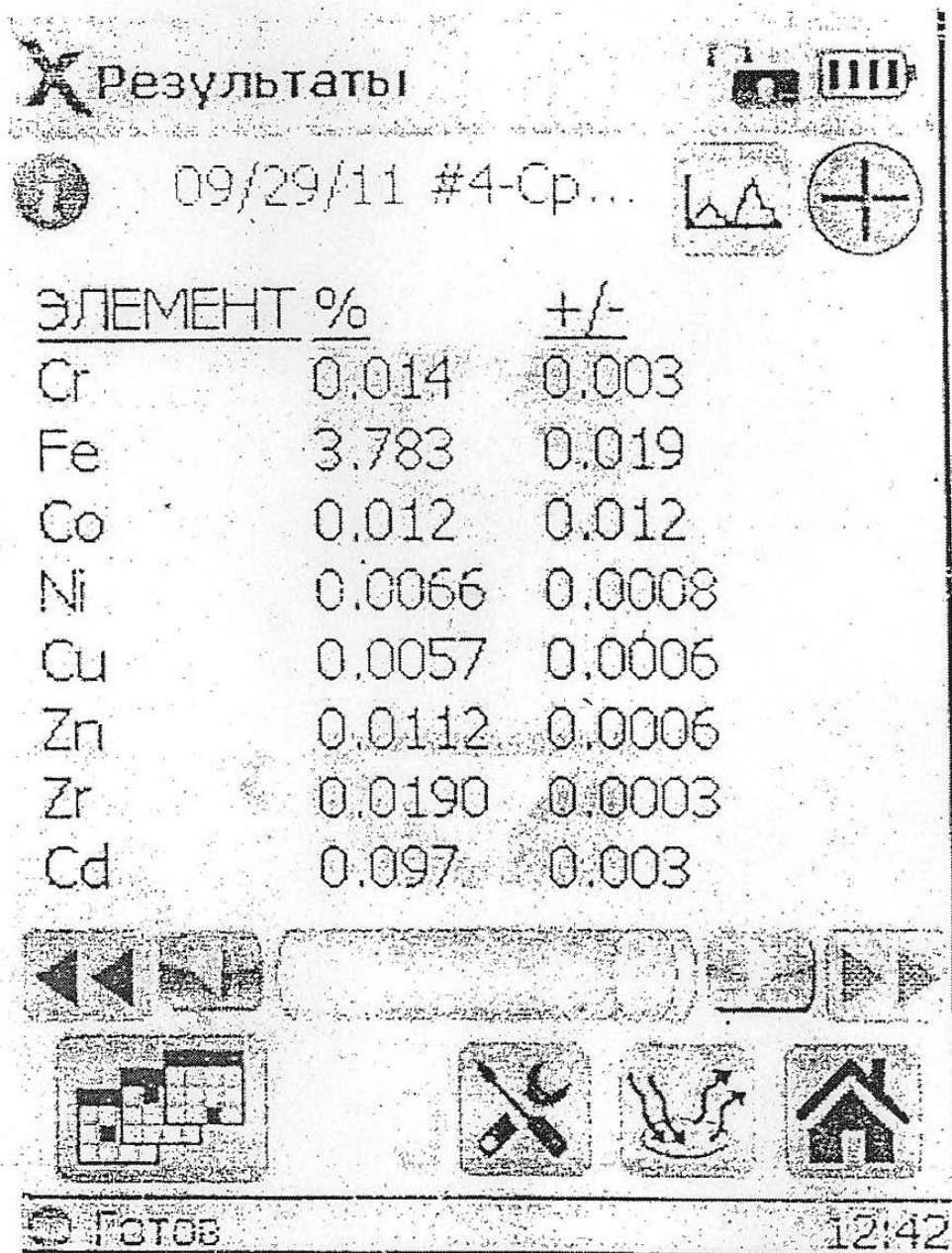
ცხრილი 2. "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის სალათისფერი ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა

თეთრი ფერის ნატეხები



ცხრილი 3. "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის თეთრი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა

თეთრი ფერის ნატეხები



ცხრილი 3.-ის გაგრძელება. "INNOV-X-SYSTEMS" ტიპის რენტგენოფლოუორენსცენტული ანალიზატორით მიღებული კასპის მადნის თეთრი ფერის ნატეხების ქიმიური შემადგენლობა



სურ.1
პატენტი