

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ომარი ნიკოლავა

ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე საშემდუღებლო
ელექტროდების დანაფარის დამუშავება

სადოქტორო პროგრამა - მასალათმცოდნეობა

შიფრი - 0412

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი-2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი

მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონების

დამუშავების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორ-ემერეტუსი არტურ სულამანიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 -წლის”-----”-----, -----საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და

მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის

სხდომაზე, კორპუსი-----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 69.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

1.თემის აქტუალურობა. საქართველოში მოქმედი მრავალი საწარმო ფართოდ იყენებს ხელით და ნახევარავტომატურ ელექტრორკალურ შედუღებას. ასეთ საწარმოებს მიეკუთვნება: ელმავამშენებლი, ვაგონ-შემკეთებლი, 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 ნავთობგაზსადენზე, 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 ბაზაზე, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს მათ თვითღირებულებას. შესადუღი მასალის ქიმიური შემადგენლობა, მოთხოვნები ნაკერის მექანიკური თვისებების მიმართ და სხვ. განსაზღვრავს გამოშვებული ელექტროდების ნომენკლატურას. საქართველოში შენადუღ კონსტრუქციათა დამზადებისას ძირითადად გამოიყენება დაბალნახშირბადიანი და მცირედლეგირებული ფოლადები, ამიტომ აქტუალურია ამ ფოლადების ხელით შედუღების ელექტროდების შემუშავება და სერიულ წარმოებაში ჩაშვება. აქვე გვინდა აღვნიშნოთ, რომ დღეს გამოიყენება თურქეთიდან და ირანიდან შემოტანილი ძვირადღირებული და საშუალო ხარისხის ელექტროდები, რომლებიც ვერ უზრუნვეყოფს შენადუღი ნაკერის მაღალ ხარისხს, კერძოდ ნაკერის სიმტკიცეს. ჩვენს მიერ ჩატარებული მექანიკური გამოცდების დროს, გაგლეჯა ხდებოდა შენადუღ ნაკერში. პასუხსაგები კონსტრუქციების შედუღებისას ამ ელექტროდების გამოყენება არ არის რეკომენდირებული.

შედულების პროცესის ეფექტურობის გასაზრდელად საქართველოში არსებული რესურსების ბაზაზე ელექტროდის ახალი დანაფარის შემადგენლობის შემუშავება, მისი ტექნოლოგიურ შესაძლებლობათა გამოკვლევა, შენადული ნაკერის მექანიკური მახასიათებლების შესწავლა და ტექნოლოგიური რეკომენდაციების შემუშავება სადღეისოდ წარმოადგენს მეტად აქტუალურ ამოცანას.

2. სამუშაოს მიზანი. სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს:

- საქართველოში არსებული მადნეული რესურსების შესწავლა და მათი ვარგისიანობის დადგენა ელექტროდის დანაფარისათვის ნედლეულად გამოყენების თვალსაზრისით;
- მიღებული შედეგების საფუძველზე, შერჩეული მადნეულის ბაზაზე ხელით ელექტრორკალური შედულების ელექტროდებისათვის ახალი დანაფარის შემადგენლობის შემუშავება, საქართველოში გამოყენებულ ანალოგებთან შედარებით გაუმჯობესებული მახასიათებლებით;
- მაღალი ხარისხის ნაკერის მიღება და შედულების ტექნოლოგიურ შესაძლებლობათა გაფართოება.

3. კვლევის ობიექტი და მეთოდები. სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ობიექტს წარმოადგენს საქართველოს 12 საბადოში არსებული მადნის ნედლეულის შესწავლა და ელექტროდის დანაფარის დასამზადებლად გამოყენების ვარგისიანობის დადგენა. შერჩეული მადნეულის ბაზაზე დამზადებული ხელით ელექტრორკალური შედულების ელექტროდის ახალი დანაფარი გაუმჯობესებული მახასიათებლებით და ამ ელექტროდით შედულებული 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

შედულების პროცესში მიმდინარეობდა დაკვირვება დანაფარის მახასიათებლებზეც.

გამდნარი წიდის სიბლანტის გასაზომად გამოვიყენეთ სტოქსის მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს მცირე ზომის სხეულების სითხეში ვარდნის სიჩქარის გაზომვაში. გრაფიტის ტიგელში დანაფარის კაზმი დნება ინდუქციურ ღუმელში და მიღებულ თხევად გარემოში ვაგდებდით ტიტანისაგან დამზადებულ გარკვეული მოცულობის სფეროს ფორმის სხეულებს და ვანგარიშობთ ვარდნის სიჩქარეს. ვითვალისწინებთ სითხეში სხეულზე მოქმედი სიმძიმის, არქიმედეს და სითხის წინააღმდეგობის ძალების გამოსათვლელ ფორმულებს და სიბლანტეს ვანგარიშობთ შემდეგი ტოლობიდან:

$$6\pi R\eta v = \rho_{\text{სხ}}gV_{\text{სხ}} + \rho_{\text{სითხე}}gV_{\text{სხ}}$$

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 ვმოქმედებთით 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 ღუმელში 100°C-ზე გამოწვის მერე იწონებოდა, და

გარკვეული დროის განმავლობაში ვათავსებდით ჰიდროსტატში, სადაც მიმდინარეობდა მათი დატენიანება. შემდეგ კვლავ იწონებოდა და განვსაზღვრავდით მასის ფარდობით ცვლილებას, რომლითაც შეიძლებოდა მსჯელობა დატენიანების ხარისხზე.

ახალი დანაფარის ელექტროდით განმეორებითი ანთების შეფასება ანალოგებთან შედარებით ხდებოდა შემდეგი კრიტერიუმებით:

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

დანაფარიანი ელექტროდების კვლევისას დანაკარგები ამოწვავზე და გაშხეფებაზე, შედუღებისას აღებული მონაცემების საშუალებით, განისაზღვრებოდა ფორმულით:

$$Y = \frac{Q_{გაფ} - Q_{დაფ}}{Q_{გაფ}} 100\%$$

სადაც $Q_{გაფ}$ - გადნობილი საელექტროდო ლითონია; $Q_{დაფ}$ - დადნობილი საელექტროდო ლითონია.

რკალის სტაბილური ნათება, წიდის ქერქის მოცილება მოწმდებოდა უშუალოდ შედუღების 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. გაჭიმვის დიაგრამები კოორდინატებში „დატვირთვა - დეფორმაცია“ ფიქსირდებოდა თვითმწერზე. მიღებული შედეგების საფუძველზე თეორიულად გავიანგარიშეთ შენადული ნაკერის

ლითონის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მაჩვენებლები: სიმტკიცის ზღვარი, დენადობის ზღვარი. ფარდობითი წაგრძელება.

დარტყმითი სიბლანტე განისაზღვრებოდა სტანდარტული მეთოდით – დარტყმითი ღუნვით ქანქარა ურნალზე.

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

მეცნიერული სიახლე. შემუშავდა დაბალნახშირბადიანი და მცირედლეგირებული ფოლადების ხელით ელექტრორკალური შედუღების რუტილიანი ელექტროდის ახალი დანაფარი, რომლის შემადგენლობაშიც შეყვანილია ისეთი ელემენტები, როგორცაა: 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, უფრო გაადვილდა წიდის ქერქის მოცილება, მნიშვნელოვნად შემცირდა ლითონის გაშხეფება. კალიუმის დამატებითმა შეყვანამ გამოიწვია იონიზაციის პოტენციალის შემცირება, გაიზარდა ელექტროდის ცივ ლითონთან კონტაქტის დროს რკალის განმეორებითი ანთების ალბათობა. შემცირდა ელექტროდების დატენიანების ხარისხი.

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 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.

სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს კომპიუტერზე სტუ-ს მოთხოვნათა შესაბამისად აკრეფილ 124 გვერდს. იგი შედგება შესავლის, ორი თავის, ცხრა ქვეთავისა, დასკვნებისა და 92 გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან. ნაშრომში წარმოდგენილია 38 ცხრილი, 30 ნახაზი და დანართი (სამი ცხრილი და ერთი სურათი).

შინაარსი

დისერტაციის პირველ განყოფილებაში - ლიტერატურულ მიმოხილვაში წარმოდგენილია ხელით ელექტრორკალურ შედუღებაში გამოყენებულ ელექტროდებთან დაკავშირებულ პრობლემებზე მიძღვნილი ნაშრომების ანალიზი. განხილულია ამ პრობლემათა გადაწყვეტის გზები. აღწერილია საქართველოში შემოტანილი და წარმოებაში ფართოდ გამოყენებული უცხოური (ძირითადად თურქული და ირანული) ელექტროდების ტექნოლოგიური თვისებები. "GK"- ტიპის ელექტროდების გამოყენებისას არსებობს პრობლემები, რომელთა თავიდან აცილება, ისეთი საპასუხის-მგებლო 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.

ამ ელექტროდებით შედუღებისას მიღებული ნაკერის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები. წინასწარ ჩატარებული ცდებით დადგინდა, რომ GK ან LG ელექტროდების გამოყენებით მიღებულ შენადულ ნაკერს გაააჩნია დაბალი სიმტკიცე და მისი გამოყენება პასუხსაგები კონსტრუქციების შედუღებისათვის არ არის რეკომენდირებული. მეორე მხრივ, მათი გამოყენება ვერ უზრუნველყოფს ტექნოლოგიური პროცესის, ისეთი მნიშვნელოვან მახასიათებელს, როგორცაა ეკონომიურობა, რაც დაკავშირებულია იმპორტირებული ელექტროდების მაღალ ფასებთან.

მასიური წარმოების შემთხვევებისათვის დომინანტ გავლენას ნაკერის ჩამოყალიბებაზე ახდენს შედუღების ელექტროდი. მისი თვისებების განმსაზღვრელი ძირითადი ფაქტორებია: 1. საელექტროდო ღეროს შემადგენლობა და დიამეტრი; 2. მისი დანაფარის შემადგენლობა და ხვედრითი წონა.

დანაფარის დანიშნულებაა რკალის სტაბილიზაცია, შედუღების აბაზანის დაცვა და შენადული ნაკერის ლითონის ლეგირება. აღნიშნულთა დასაკმაყოფილებლად საელექტროდო დანაფარებს წაყენებათ შემდეგი ძირითადი მოთხოვნები:

1. რკალის სტაბილური ნათება და ელექტროდის მინიმალური გაშეფებით დნობა;
2. ელექტროდის დნობის დროს წარმოქმნილი წიდა უნდა უზრუნველყოფდეს ნაკერის კარგ ფორმირებასა და ელექტროდის მოსახერხებელ მოძრაობას;
3. ნაკერის ზედაპირიდან გაცივებული წიდის ადვილად მოცილება;
4. წიდებს, აირებსა და ლითონს შორის არ მიმდინარეობდეს ნაკერში ფორების წარმომქმნელ რეაქციები;
5. დანაფარის მასალები ადვილად უნდა წვრილმარცვლოვანდებოდეს, არ რეაგირებდეს თხევად მინასთან, რაც ართულებს მის დამზადებას;
6. გააჩნდეს ისეთი ტექნოლოგიური თვისებები, რომლებიც არ გაართულებს ელექტროდის საწარმოო დამზადების პროცესს;
7. უზრუნველყოფდეს შრომის დამაკმაყოფილებელ სანიტარულ-ჰიგიენურ პირობებს ელექტროდის დამზადებისა და გამოყენებისათვის;
8. შენადული ნაკერის ლეგირება;

ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა, საქართველოში არსებული რესურსების ბაზაზე შეგვემუშავებინა რუტილის დანაფარიანი ელექტროდი გაუმჯობესებული ტექნოლოგიური მაჩვენებლებით.

დისერტაციის მეორე ნაწილში წარმოდგენილია ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების მეთოდოლოგია, ანალიზი და შედეგები.

ჩატარებული იქნა საქართველოში არსებული სხვადასხვა საბადოებში

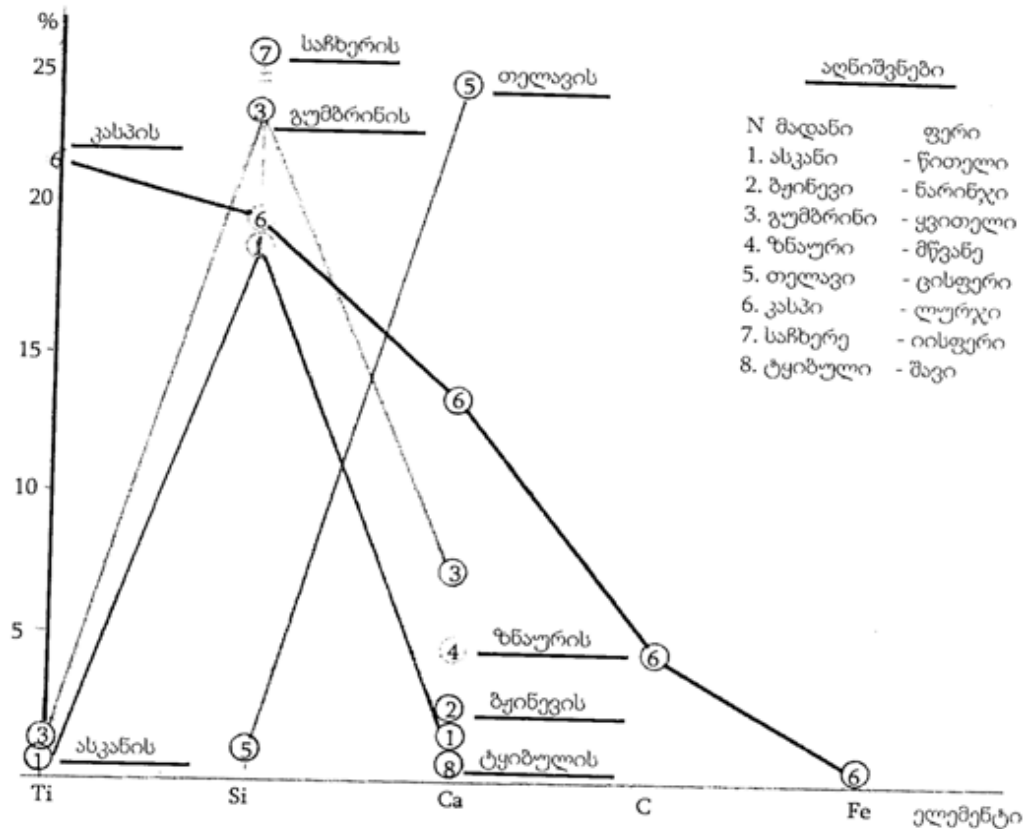
მოპოვებული წილისეულის კვლევა. ამ მიზნით შერჩეულ იქნა ასკანის, ბჟინევის, გუმბრინის, ზნაურის, თელავის, თბილისის, კასპის, საჩხერის, ტყიბულის, ხარაგაულის და ჩრდილოეთ კავკასიის საბადოები. მადანთა ნედლეულის ქიმიური შემადგენლობის შესწავლა წარმოებდა “INNOV-X-SYSTEMS” ტიპის რენტგენოფლუორესცენტული ადა სპექტრული ანალიზატორების გამოყენებით. ცხრილში 1 მოყვანილია ჩვენს მიერ შესწავლის შედეგად, კასპის, ასკანის, გუმბრინის სერპანტინის და ბჟინევის საბადოებში მოპოვებული მადნების ქიმიური შემადგენლობა. ლიტერატურიდან ცნობილი რუტილის დანაფარიანი ელექტროდის დანაფარში შემავალი ძირითადი ქიმიური ელემენტებისა და ცხრილში 1 მოყვანილი მონაცემების შეჯერების შედეგად შევადგინეთ დიაგრამა, რომელიც, საბადოების მიხედვით, გვიჩვენებს საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებულ დანაფარში შემავალი ძირითადი ელემენტების რაოდენობრივ მაჩვენებელს (ნახ.1)

ცხრილი 1. კასპის, ასკანის, გუმბრინის და ბჟინევის მადნების ქიმიური შემადგენლობა, %-ში

ქიმიური ელემენტი	კასპი	ასკანი	გუმბრინი	ბჟინევი
TiO ₂	29 - 34,88	0,22	0,33	0,604
VO ₂	0,2 - 0,535	-	-	0,052
MnO ₂	2,0 - 8,65	0,6	0,056	8,58
Fe ₂ O ₃	5,0 - 14,91	1,03	3,628	0,120
ZnO	0,01 - 0,11	0,005	0,005	0,0141
Zr	-	0,01	0,0162	0,0192
CaO	5,0-13,72	0,76	5,353	1,832
NbO	0,001 - 0,009	-	-	-
Co ₂ O ₃	0,0001 - 0,015	-	0,023	0,023
CuO	0,002 - 0,005	-	0,042	0,0066
K ₂ O	3,0 - 9,4	3,47	1,484	7,832
CdO	0,01 - 0,11	0,027	0,085	0,100
Cr ₂ O ₃	0,01 - 0,022	-	0,012	0,016
NiO	0,002 - 0,008	-	0,002	0,006
Al ₂ O ₃	5,0 - 10,95	6,115	4,569	6,994
MgO	0,5 - 1,5	1,813	0,886	2,547
SiO ₂	-	22,5	26,437	24,817

მიღებულ შედეგთა თეორიული ანალიზი მიუთითებს იმაზე, რომ ზემოთჩამოთვლილი დანაფარისადმი წაყენებული მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, წარმოდგენილი საჭირო ელემენტთა თანაფარდობისათვის, ვარგის მასალად შეიძლება ჩაითვალოს მხოლოდ კასპის მადანი.

დანაფარში შემავალი გარდა მთავარი ელემენტებისა (*Ti, Si, Ca*), კასპის საბადოში შემავალი სხვა ელემენტების (*Cr, V, Ni, Ti, N, C, Mn, Si, Al, Cu, Mg, Co, Se, Sb, Sn, Zn, K, Cd, Ca, P*) შეყვანა გავლენას ახდენს შენადული ნაკერის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. კერძოდ:



ნახ. 1. საქართველოს წიაღისეულთა შემადგენლობაში არსებული შედეგების ელექტროდის დანაფარში საჭირო ძირითად ელემენტთა რაოდენობრივი მაჩვენებლები

- ტიტანის ორჟანგი TiO_2 , რომელიც დანაფარის შემადგენლობაში არსებობით უზრუნველყოფს რკალის სტაბილურობას, აუმჯობესებს წიდის წარმოქმნის პროცესს, უზრუნველყოფს ხარისხიანი ნაკერის ფორმირებას, გაშხეფების სიმცირეს და წიდის ადვილად მოცილებას;

- სილიციუმის ორჟანგი SiO_2 - მიეკუთვნება წიდაწარმომქმნელკომპონენტებს, უზრუნველყოფს შენადული ნაკერის კარგ ფორმირებასა და წიდის ადვილად მოცილებას, აუმჯობესებს ნაკერის მექანიკურ თვისებებს და ხარისხს, ზრდის მწარმოებლობას;
- კალციუმის ჟანგი CaO აუმჯობესებს რკალის სტაბილიზაციას, იონიზაციის ხარისხს და ელექტრონების ემისიას კათოდის ზედაპირიდან;
- მანგანუმის ორჟანგი MnO_2 , გამოიყენება ელექტროდის დანაფარში, როგორც კარგი განმჟანგველი, იწვევს სიმტკიცის გაზრდას და ამოიწვება შედუღებისას;
- ალუმინი Al , არის გამჟანგველი და ზრდის ნაკერის ხარისხს;
- სპილენძი Cu , ზრდის ნაკერის კოროზიამედეგობას და სიბლანტეს;
- ნიობიუმი Nb , ცირკონიუმი Zr , ვანადიუმი V იწვევს შენადული ნაკერის ფოლადის წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას და მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას;

ელექტროდის დანაფარის ოპტიმალური შემადგენლობის დასადგენად, ექსპერიმენტების პირველ ეტაპზე დამზადდა დანაფარი, რომელშიც შედიოდა, მხოლოდ კასპის მადანში შემავალი ელემენტები, ყოველგვარი დანამატების გარეშე. ექსპერიმენტებმა მოგვცეს უარყოფითი შედეგი, რაც გამოიხატებოდა რკალის არასტაბილურ ნათებაში, შენადული ნაკერის დაბალ მექანიკურ თვისებებში. ცხადია, რომ დანაფარის შემადგენლობა მოითხოვდა კორექტირებას. შემდეგ, კასპის მადნის ბაზაზე შევიმუშავეთ და დავამზადეთ დანაფარის ხუთი ვარიანტი, რომელთა ქიმიური შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 2.

დამზადებული ხუთი ვარიანტიდან ქიმიური შედგენილობისა და მექანიკური თვისებების მიხედვით ყველაზე კარგი შედეგი აჩვენა მე-4 ვარიანტმა, მაგრამ არასაკმარისი. ჩატარებული კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით, გადაწყვეტილი იქნა საელექტროდო დანაფარის კაზმის გამდიდრება რუტილით 50-55 %-მდე, რომელშიც 25% იყო სუფთა ტიტანი.

ცხრილი 2. 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

ამ გზით მიღებული საელექტროდო დანაფარის შემადგენლობა ნაჩვენებია ცხრილში 3:

ცხრილი 3. 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	-	-	-	-

გაუმჯობესებულმა დანაფარმა დააკმაყოფილა მისდამი წაყენებული ყველა მოთხოვნა.

საელექტროდო დანაფარის მნიშვნელოვანი მახასიათებელია გამდნარი წიდის სიბლანტე. სიბლანტეზეა დამოკიდებული ელექტროდით სხვადასხვა სივრცით მდგომარეობაში შედულების შესაძლებლობა. დანაფარის მინერალოგიური შემადგელობა მნიშვნელოვნად ზემოქმედებს სიბლანტეზე. კერძოდ კი, დადებით ზემოქმედებას ახდენს დანაფარში მანგანუმისა და რკინის ჟანგეულების მომატებული შემცველობა არსებულ ანალოგებთან შედარებით, აგრეთვე კალიუმისა და ნატრიუმის ჟანგეულების არსებობა.

დინამიკური სიბლანტის გასაზომად გამოვიყენეთ სტოქსის მეთოდი გამდნარი წიდის სიბლანტის დნობის ტემპერატურამ შეადგინა დაახლოებით 1220 - 1226°C. გაზომვები ვაწარმოეთ 1350-1600°C-მდე ტემპერატურის ინტერვალში. ზოგადად, გამოთვლის მეთოდი ეფუძნება სხეულზე მოქმედი ძალებისათვის ნიუტონის II კანონის გამოყენებას. სითხეში სხეულზე მოქმედებს სიმძიმის, არქიმედეს და სითხის წინააღმდეგობის ძალები. რომლებიც გამოიანგარიშება შემდეგი ფორმულების საშუალებით::

$$F_{სიძ} = \rho_{სს} g V_{სს}$$

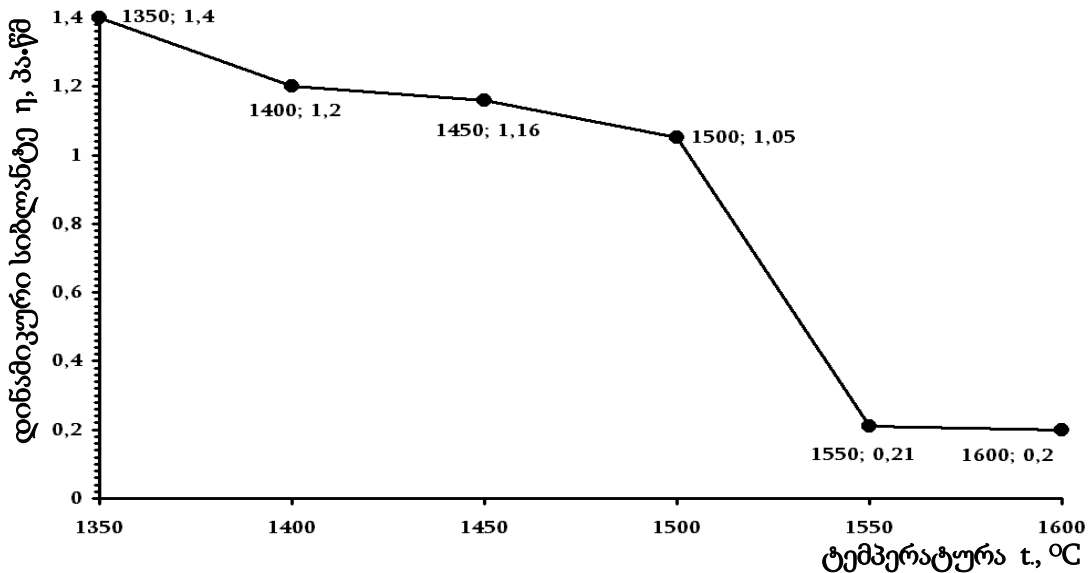
$$F_{ა} = \rho_{სით} g V_{სს}$$

$$F_{წიბ} = 6\pi R\eta v$$

სადაც η - სიბლანტეა, ხოლო v - ვარდნის საშუალო სიჩქარეა. სიბლანტე იანგარიშება შემდეგი ტოლობიდან:

$$6\pi R\eta v = \rho_{სს} g V_{სს} - \rho_{სით} g V_{სს}$$

$$\eta = \frac{g V_{სს} (\rho_{სს} - \rho_{სით})}{6\pi R v}$$



ნახ. 3. დინამიკური სიბლანტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ნახ. 3-ზე გამოსახულია დინამიკური სიბლანტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. მოყვანილი დამოკიდებულებიდან ნათლად ჩანს, რომ სიბლანტის ნახტომისებურად იზრდება 1550-1450°C ინტერვალში, რაც დამახასიათებელია რუტილიანი ელექტროდების თხევადი წიდისათვის.

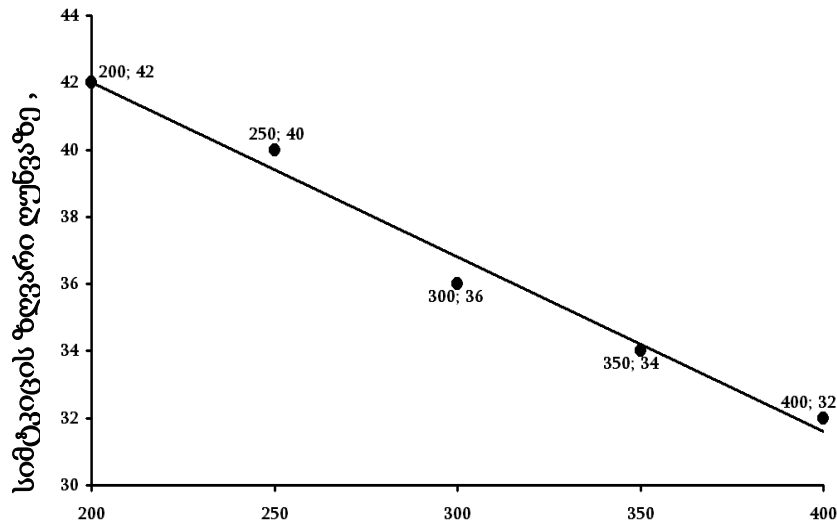
ერთ-ერთი ძირითადი მოთხოვნა დანაფარდებიანი ელექტროდების მიმართ არის, ის რომ დამზადებული ელექტროდები იყოს მკვრივი, მტკიცე, გამონაბერების, ფორების, კოჟრების და ბზარების გარეშე. დანაფარის მექანიკური სიმტკიცის შემოწმებას ვაწარმოებდით ორი გზით:

1. დამზადებული ელექტროდების ფოლადის ფილაზე 0.5 მ, 1 მ და 1,5 მ სიმალიდან ბრტყლად ვარდნისას მიღებული შედეგების მიხედვით;
2. დანაფარის კაზმისაგან დამზადებული ცილინდრული ფორმის ნიმუშების მექანიკური სიმტკიცის განსაზღვრით სტანდარტული 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.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგინდა, რომ ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარდებიანი ელექტროდისა და “GK”- ტიპის ელექტროდების სიმტკიცეები თითქმის არ განსხვავდება ერთმანეთისაგან. ხოლო შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ გამოწვის ტემპერატურის მატება იწვევს სიმტკიცის შემცირებას (ნახ. 4) დაახლოებით 24%-ით. გამოწვის ოპტიმალურ ტემპერატურას შეადგენს 200-250°C.

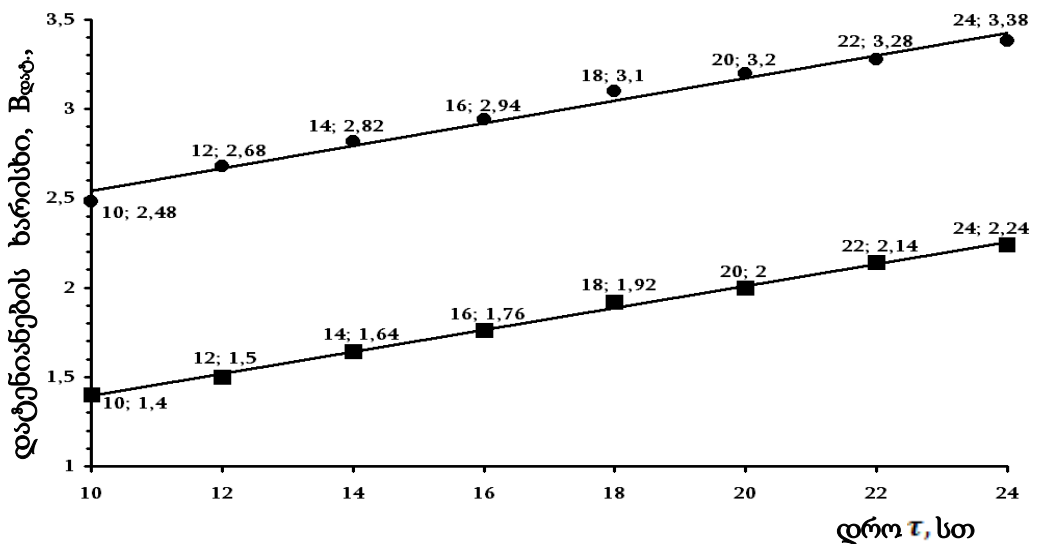
დანაფარის მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს მისი ჰიგროსკოპულობა, ანუ ატმოსფეროდან წყალბადის შთანთქმის უნარი. ელექტროდები იწონებოდა დატენიანებამდე და დატენიანების შემდეგ. მასის ფარდობითი ცვლილება განსაზღვრავდა დატენიანების ხარისხს:

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



გამოწვის ტემპერატურა $t_{\text{გამოწ.}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$
ნახ.4. დანაფარის ღუნვაზე სიმტკიცის ზღვრის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

ჩვენს შემთხვევაში დატენიანების ხარისხი დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით. ეს შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ჩვენს მიერ შემაკავშირებლად გამოყენებული გვაქვს ნატრიუმის თხევადი მინა ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$). დადგენილია, რომ დანაფარები, რომლებშიც გამოყენებულია ნატრიუმის თხევადი



ნახ. 5. დატენიანების ხარისხის დამოკიდებულება დატენიანების დროზე

მინა გაცილებით მდგრადია დატენიანობისადმი, ვიდრე დანაფარები, სადაც გამოყენებულია კალიუმის თხევადი მინა. ნახ. 5-ზე ნაჩვენებია დატენიანების ხარისხის დამოკიდებულება დატენიანების დროზე,

ხშირად დაფარული ელექტროდებით გართულებულია ელექტრული რკალის განმეორებითი ანთება. ამ საკითხის შესასწავლად ტარდებოდა შედარებითი კვლევები. შედარებისათვის გამოვიყენეთ რუტილის დანაფარიანი ელექტროდები MP-3 ГОСТ 9466-75. შეფასება ხდებოდა შემდეგი კრიტერიუმებით:

- მილისებური დანაფარის გამონაშვრის 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 განმეორებითი ანთებას ენიჭებათ შემდეგი ბალები: „ანალოგზე უკეთესი“ -3; „ანალოგის დონეზე“ - 2; „ანალოგზე უარესი“ - 1; „ანალოგზე გაცილებით უარესი“ - 0. ამ მეთოდიკით მოხდა 3 და 4მმ დიამეტრის ახალი დანაფარიანი ელექტროდების შედარება ანალოგთან. გამოყენებულ იქნა პირველ და მეორე კრიტერიუმებისათვის ათ-ათი განმეორებითი (სულ 80) ანთება. შედარებისას რკალზე მოდებული ელექტრული პარამეტრები იყო მუდმივი 3 და 4მმ დიამეტრის ელექტროდების შესაბამისად. ასევე იყო დაახლოებით თანაბარი მეორადი ანთებისას ახალი და ანალოგიური ელექტროდის სიგრძე. აქვე უნდა აღინიშნოს, 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 განმეორებითი ანთების შეფასება მოვახდინეთ, ასევე გაუმდნარი დანაფარის მილისებური გამონაშვრის ტორსისა და ლითონის ფირფიტას შორის საკონტაქტო წინააღმდეგობის საანგარიშო მნიშვნელობით (MP-3 ელექტროდებისათვის 52, 23 მომ, ხოლო ახალი დანაფარიანი ელექტროდებისათვის 48, 16 მომ). დადგინდა, რომ ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექ-

ტროდების გაუმდნარი დანაფარისაგან მილისებური გამონაშვერი დენ-გამტარია, რაც აადვილებს რკალის განმეორებად ანთებას. ამრიგად, დად-გინდა, რომ მეორადი ანთება ანალოგთან შედარებით საიმედოა, დანაფარი თანაბრად დნება მეტისმეტი გაშხეფვის გარეშე და არ ხდება ნაჭრების ჩამოშლა.

მნიშვნელოვანია ახალ დანაფარიანი ელექტროდების გამოყენებისას დანაკარგები ამოწვასა და გაშხეფებაზე, რომელიც იანგარიშება ფორმულით:

$$y = \frac{Q_{გაღ} - Q_{დაღ}}{Q_{გაღ}} \quad (1)$$

სადაც, $Q_{გაღ}$ - გადნობილი საელექტროდო ლითონია, გ-ში; $Q_{დაღ}$ - დადნობილი საელექტროდო ლითონია, გ-ში.

ინტერესს წარმოადგენს ელექტროდების გადნობის კოეფიციენტი:

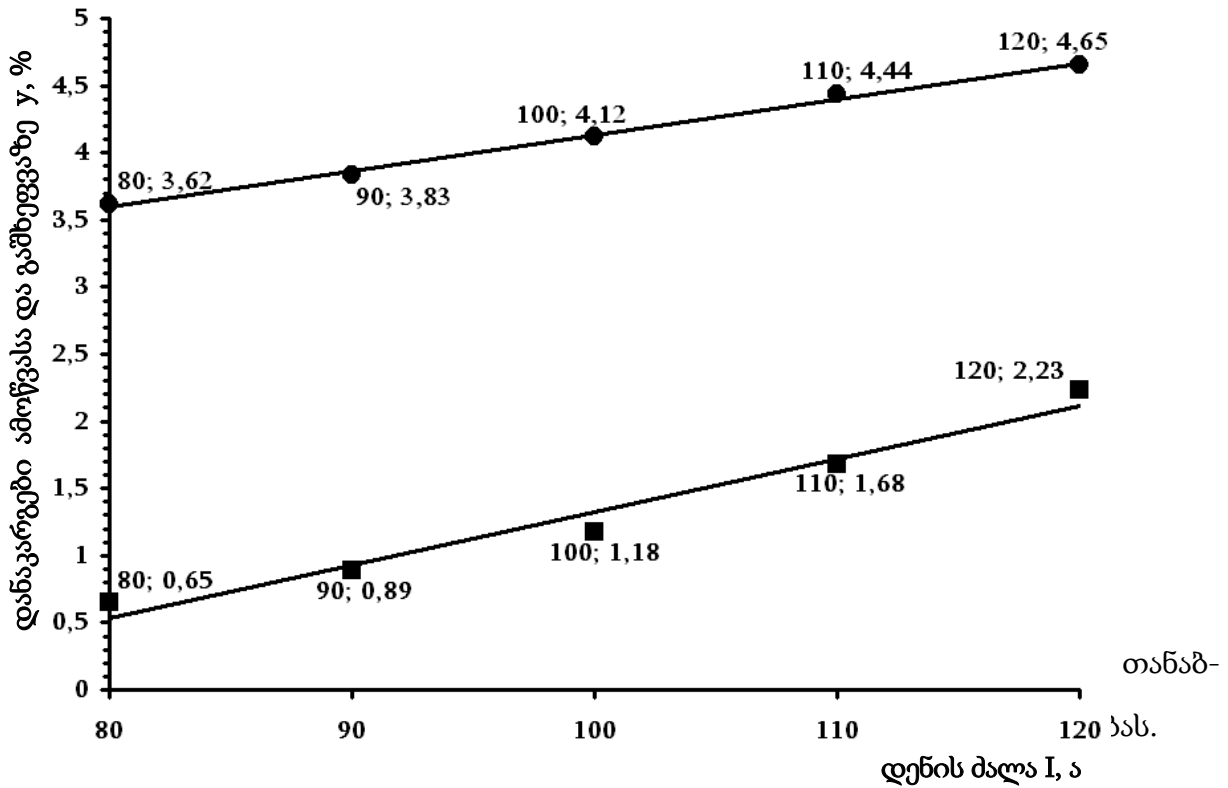
$$\alpha_{გაღ} = \frac{Q_{გაღ}}{It} \quad (\text{გ/ა.სთ}), \quad (2)$$

სადაც $Q_{გაღ}$ - რკალის ნათების t დროში გადნობილი ლითონის მასაა, გ-ში; I - შედულების დენია, ამპერებში. გადნობის კოეფიციენტმა შეადგინა $\alpha_{გაღ} = 11$ გ/ა.სთ.

ცდები ტარდებოდა დენის ძალის მნიშვნელობებისათვის 80 – 120 ა დიაპაზონში. ნახ. 6-ზე მოყვანილია ამოწვასა და გაშხეფებაზე დანაკარგების დამოკიდებულება შედულების დენზე

დანაფარიანი ელექტროდების ტექნოლოგიური თვისებების შესწავლისას, გამოკვლეული იქნა წარმოქმნილი წიდის ქერქის მოცილების სირთულე შენადული ნაკერიდან. ცნობილია, რომ გამდნარი წიდა უნდა ხასიათდებოდეს მცირე სიბლანტით და კუთრი წონით, მაღალი ძვრადობით და ზედაპირული დაჭიმულობის არც თუ დიდი მნიშვნელობით. თუ წიდა აკმაყოფილებს ამ პირობებს, მაშინ ის ადვილად ურთიერთქმედებს გამდნარ ლითონთან, განუანგავს და იწვევს მის დეგაზაციას. ასევე, იოლად ამოტივტივდება ლითონის ზედაპირზე, თანაბრად განეფინება მის ზედაპირზე და ხელს უწყობს ნაკერის ფორმირებას. შედულების პროცესის დასრულების შემდეგ, ადვილად ხდება მისი მოცილება. ექსპერიმენტმა აჩვენა

ნეს, რომ შედუღების შემდგომ წიდის ქერქის მოცილება არ წარმოადგენდა სირთულეს.



ნახ. 6. ამოწვასა და გაშხეფვაზე დასაკარგების დამოკიდებულება შედუღების დენის ძალაზე

დანაფარში შემავალი კომპონენტებიდან მნიშვნელოვანია მაიონიზებული ანუ მასტაბილიზებული ელემენტები, რომელთა იონიზაციის პოტენციალი დაბალია. სწორედ ისინი განსაზღვრავენ რკალის ადგენების სირთულეს. რაც ნაკლებია იონიზაციის პოტენციალი, მით უფრო ადვილია რკალის ანთება. ზოგიერთი ელემენტის იონიზაციის პოტენციალის მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 4.

ცხრილი 4. ზოგიერთი ელემენტის იონიზაციის პოტენციალი

ელემენტი	Cs	Rb	K	Na	Ca	Fe	C	H ₂	N ₂	Ar	He
U _n	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

დენობა უზრუნველყოფს რკალის აღზენებას შედარებით დაბალ ძაბვებზე.

ამრიგად, ახალდანაფარიანი ელექტროდები აკმაყოფილებს სტანდარტით წაყენებულ მოთხოვნებს და ხასიათდება კარგი ტექნოლოგიური მახასიათებლებით:

- შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის გამდნარის წიდის სიბლანტე პრაქტიკულად არ განსხვავდება რუტილის დანაფარიანი ელექტროდების გამდნარი წიდის სიბლანტისაგან;
- სიმტკიცე არ განსხვავდება რომ “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარის მექანიკური სიმტკიცისაგან;
- ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტროდების დატენიანების ხარისხი “GK”- ტიპის ელექტროდების დანაფარებთან შედარებით დაბალია საშუალოდ 1,16%-ით;
- ელექტროდების გაუმდნარი დანაფარის მილისებური გამონაშვერი შეხებისას ძირითად ლითონთან ადვილად იკვრება წრედი და აღიზნება რკალი;
- რკალის პირველადი და მეორადი ანთების საიმედოობა;
- შედუღებისას წარმოქმნილი წიდა უზრუნველყოფს ნაკერის ლილვაკის სწორ ფორმირებას და გაცივების დროს ადვილად სცილდება ნაკერის ზედაპირს;
- ამოწვასა და გაშხეფვაზე დანაკარგები შეესაბამება წაყენებულ მოთხოვნებს;

მიუხედავად, მიღებული დამაკმაყოფილებელი შედეგებისა, შედუღების პროცესში შეიმჩნეოდა რკალის არასტაბილური ნათება, რაც ჩვენი აზრით ტიტანის ოქსიდის (რუტილის) არასაკმარისი რაოდენობით აიხსნებოდა, ამიტომ გავზარდეთ მისი რაოდენობა. ამ გზით გაუმჯობესებული დანაფარის საბოლოო ქიმიური შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 5. გაუმჯობესებულმა დანაფარმა დააკმაყოფილა მისდამი წაყენებული ყველა მოთხოვნა.

შენადული შეერთებების და შენადული კონსტრუქციების მუშაობის

ცხრილი 5. გაუმჯობესებული დანაფარის ქიმიური შემადგენლობა %-ში

TiO_2	VO_2	MnO_2	Fe_2O_3	ZrO	CaO	NbO	Co_2O_3	CuO	K_2O
55 %	0,585	6,5	8,0	0,11	8,0	0,009	0,015	0,005	7,4
CdO	Cr_2O_3	NiO	Al_2O_3	MgO	SiO_2	-	-	-	-
0,011	0,022	0.008	7,8	1,5	5,035	-	-	-	-

უნარი უმეტეს წილად განისაზღვრება შენადული ნაკერების ხარისხით: მაკრო და მიკროსტრუქტურის ხასიათით, ქიმიური შემადგენლობის ერთგვაროვნებით, მათში დეფექტების არსებობით, შენადული ნაკერის ფიზიკურ-მექანიკური მაჩვენებლებით.

შენადული ნაკერის მექანიკური თვისებების შესწავლის მიზნით, შედუღდა 10 მმ სისქის დაბალნახშირბადიანი ფოლადები (ფლ. 3). შედარებისათვის შედუღება შესრულდა, როგორც ტიტანის ოქსიდით გამდიდრებული ელექტროდით (ცხრილი 5), ასევე ცხრილში 2 მოყვანილი დანაფარიანი და GK-ტიპის ელექტროდებით.

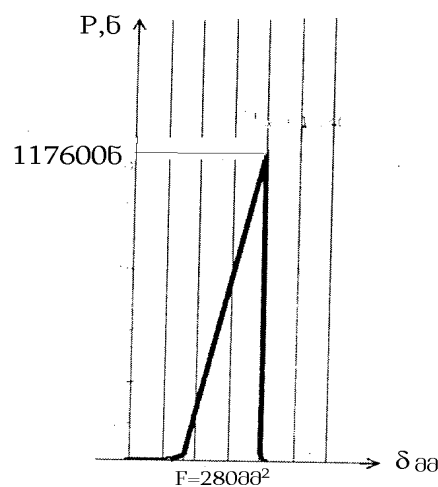
მექანიკურ თვისებათა შესასწავლად მზადდებოდა სტანდარტული ბრტყელი ნიმუშები, რომლებსაც FPZ – 100 ტიპის მანქანაზე ვცდიდით გაჭიმვაზე. ქვემოთ მოგვყავს მხოლოდ ექვსი ნიმუშის გამოცდისას მიღებული შედეგები: ნიმუშები N1, N2 და N6- შედუღებულია “GK” - ტიპის ელექტროდებით, ხოლო ნიმუშები N3, N4 და N5 – 55%-მდე ტიტანის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

სისალის გაზომვა მოხდა TK-2 ტიპის როკველის წნეხზე და ПМТ-3 ტიპის მიკროსისალის მზომ მიკროსკოპზე.

პირველი დიაგრამიდან ჩანს, რომ შენადული ნაკერი არ არის მტკიცე და ნიმუში ინგრევა (ნახ. 7), ასეთივე სურათი არის მეორე ნიმუშზე (ნახ. 8), მესამე დიაგრამიდან ჩანს, რომ გაჭიმვისას დეფორმაციას ღებულობს ძირითადი ლითონი, ყველაფერი ეს ჩანს თვით გაჭიმვის ნიმუშზეც (ნახ. 9).

დრეკადობის უბანი იცვლება პლასტიკური დეფორმაციის უბნით. ამ დროს ხდება ლითონის დეფორმაციული განმტკიცება $P_{MAX} = 117600$ ნ. დატვირთვის მიღწევისას ნიმუშზე ხდება ყელის გაჩენა, ნიმუშის კვეთი ერთ ადგილას მცირდება და გაჭიმვის დიაგრამაზე ჩანს მაფორმირებელი ძალის შემცირება. შენადული ნაკერი იმდენად მტკიცეა, რომ გაჭიმვისას დეფორმაციას დებულობს ძირითადი ლითონი. მსგავსი მდგომარეობაა მე-4 ნიმუშზე (ნახ. 10). მრიგად, როცა შენადული ნაკერის სიმტკიცე საკმაოდ მაღალია ადგილი აქვს ძირითადი ლითონის დეფორმაციას. ხოლო როცა შენადული ნაკერის სიმტკიცე დაბალია მაშინ, მიუხედავად იმისა, რომ შენადულ ნაკერში განიკვეთი 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.7; 8; 12) მხოლოდ დამანგრეველი ძაბვაა: I-110740 ნ; II – 105840 ნ; VI – 32340 ნ. N3, N4 და N5 ნიმუშებში შესაძლებელია გაიზომოს სიმტკიცის ისეთი მახასიათებელი, როგორცაა დენადობის ზღვარი ($\sigma_{ფ5}$; $\sigma_{0,2}$). ნახ. 19; 10; 11-ზე გამოსახული დიაგრამებიდან ჩანს: III – 72520 ნ; IV -65660 ნ; V – 52920 ნ. ასევე შესაძლებელია გაიზომოს ლითონის პლასტიკურობის ისეთი მაჩვენებელი, როგორცაა ფარდობითი წაგრძელება $\delta\%$, მაგრამ ის იქნება არა შენადული ნაკერის, არამედ ძირითადი ლითონის.



ნახ. 7. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა (I): ნიმუში №1.

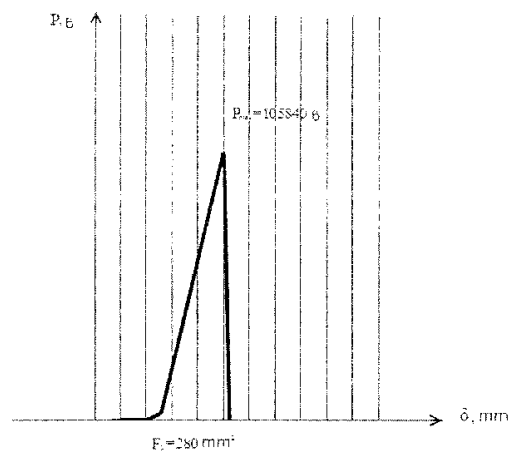
გაჭიმვის დიაგრამებიდან ჩანს, რომ შენადული ნაკერის გამოცდის ნიმუშის წყვეტა ხდება ძირითადი ლითონის უბანში, რაც დასტურია იმისა, რომ შენადული ნაკერის სიმტკიცე აღემატება ძირითადი ლითონის სიმტკიცეს.

N3, N4 და N5 ნიმუშების გაჭიმვის დიაგრამიდან ნათლად ჩანს, რომ დეფორმაციას განიცდის ძირითადი ლითონი (ეს ვიზუალურადაც ჩანს თვით ნიმუშზე). დიაგრამაზე ნათლად ჩანს დრეკადობისა და პლასტიკურობის უბნები. მექანიკური თვისებების მაჩვენებლები შემდეგია:

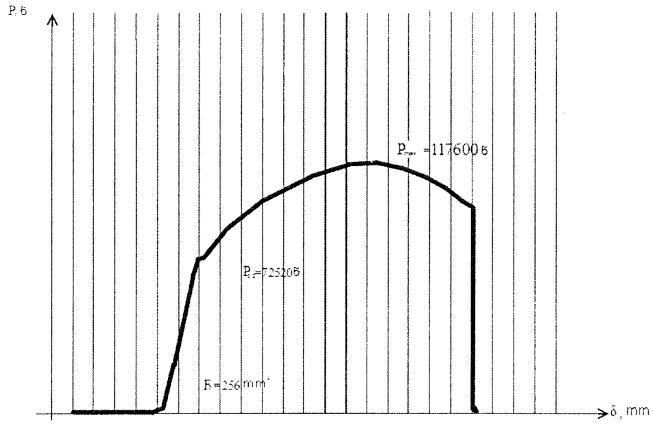
- დენადობის ზღვარი 289 მგპა;
- სიმტკიცის ზღვარი 468 მგპა;
- ფარდობითი წაგრძელება 31%.

რაც მისაღებ ზღვრებშია და შეიძლება დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ ადგილობრივი ნედლეულის ბაზაზე დამუშავებული ელექტრორკალური შედუღების საელექტროდო დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული ნაკერების სიმტკიცე აღემატება იგივე კლასის ანალოგიური ელექტროდებით შედუღებულ ნაკერებს.

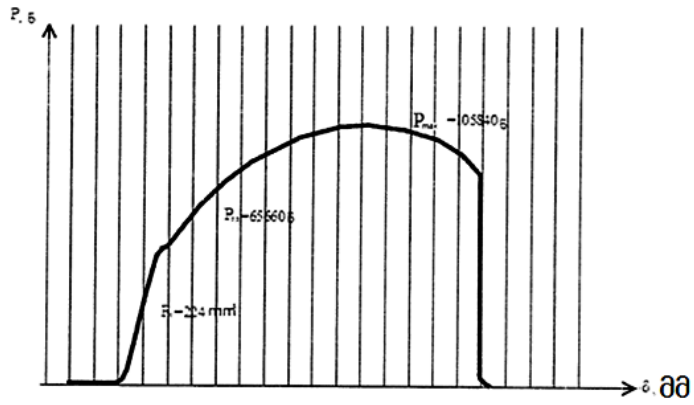
შენადული ნაკერის მნიშვნელოვან დინამიკურ მახასიათებელს წარმოადგენს დარტყმითი სიბლანტე, რომელიც შევისწავლეთ დარტყმითი ლუნვით ქანქარა ურნალზე დანაფარების ყველა ვარიანტისათვის



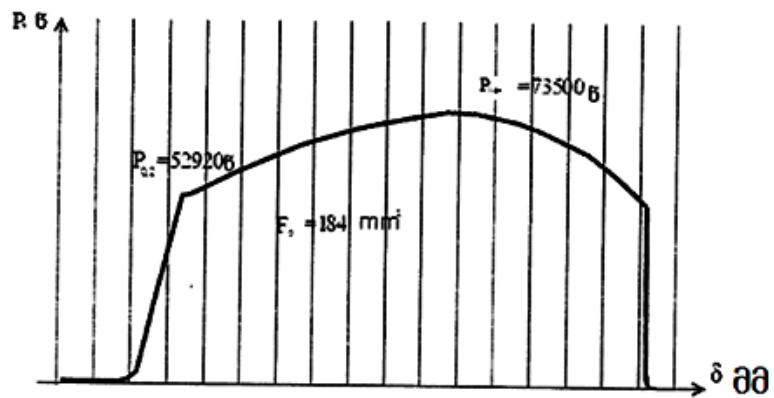
ნახ. 8. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა (II): ნიმუში № 2.



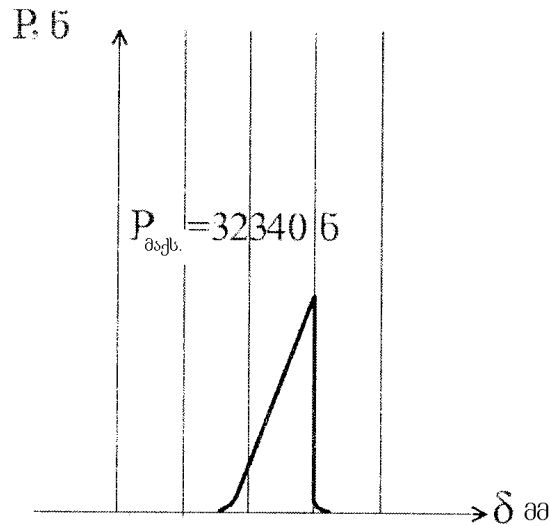
ნახ.9. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა (III): ნიმუში №3.



ნახ. 10. შენადული ნეკერის გაჭიმვის დიაგრამა (IV): ნიმუში №4



ნახ.11. შენადული ნეკერის გაჭიმვის დიაგრამა (V): ნიმუში №5



ნახ. 12. შენადული ნაკერის გაჭიმვის დიაგრამა (VI): ნიმუში №6

ჩვენს მიერ ჩატარებული მექანიკური გამოცდების შედეგები მოყვანილია ქვემოთ (ცხრილი 6). ცხრილის მონაცემებიდან ჩანს, 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. ყველა პარამეტრის შედარება თვალნათლივ აჩვენებს ნაკერის მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას, კერძოდ გაიზარდა შენადული ნაკერის სიმტკიცეც და პლასტიკურობაც.

ცხრილი 6. მექანიკური გამოცდის შედეგები

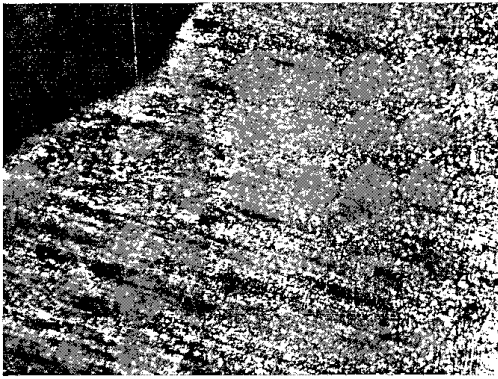
მექანიკური თვისებები	დანაფარის ვარიანტები					დანაფარი TiO ₂ დანამატით	GK
	1	2	3	4	5		
სიმტკიცის ზღვარი, σ _B , მგპა	410	425	450	440	445	468	420
დენადობის ზღვარი, σ _T , მგპა	305	292,5	280	275	280	289	268
ფარდობითი წაგრძელება, δ, %	23,0	24,0	26,0	20,0	25,0	31	20,0
ფარდობითი შევიწროება, φ, %	-	-	-	66,2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

როგორც, ცხრილიდან ჩანს, ტიტანის ოქსიდით გამდიდრებული დანაფარიანი ელექტროდით მიღებული შენადული 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;

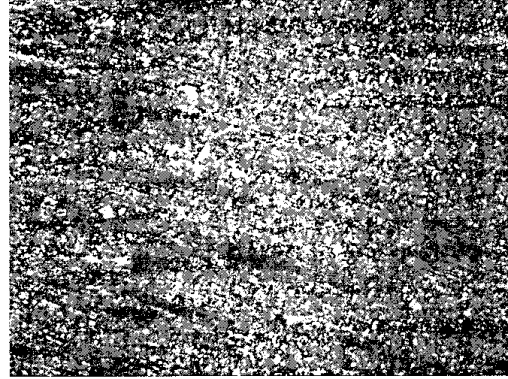
ჩატარდა ნაკერების მიკროსტრუქტურული ანალიზი ოპტიკურ მიკროსკოპ NEOFOT-32-ზე. წინასწარ მომზადდა მიკროხეხები და სტრუქტურის გამოვლენა მოხდა 3%-იანი აზოტმჟავით მოწამვლით. ნახ-13-ზე მოცემულია შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა.

ლითონის მიკროსტრუქტურა (შენადული ნაკერიდან ძირითადი ლითონისკენ) წარმოადგენს წვრილმარცვლოვან ფერიტულ - პერლიტურ სტრუქტურას. შენადული ნაკერის ახლოს, ძირითად ლითონში შეინიშნება თერმული გავლენის ზონა. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა შენარჩუნებულია თერმული გავლენის ზონაში. არ შეინიშნება მოზრდილი ზომის მარცვლები. მიკროხეხზე ჩანს შენადულ ზონებს შორის გადასვლა, რომელიც არის მდორე, სუსტად გამოკვეთილი საზღვრებით. შედუღების პირველი შრიდანვე წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღება შეიძლება აიხსნას დანაფარში ჩვენს მიერ დამატებით შეყვანილი დნობის მაღალი ტემპერატურის მქონე ელემენტების (ცირკონიუმი, ვანადიუმი, ნიობიუმი) ასევე ტიტანის მე-2 ჯგუფის კარბიდების წარმოქმნით, რომლებიც ქმნიან კრისტალიზაციის ცენტრებს და ეწინააღმდეგებიან მარცვლის ზრდას.

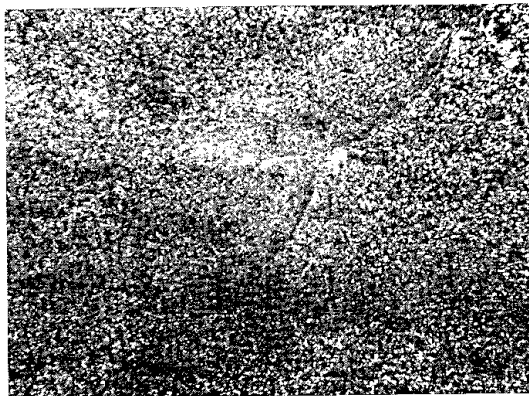
წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა განაპირობებს შენადული შეერთების სიმტკიცეს. წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის წარმოქმნა, ცალსახად მიუთითებს, ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალ დანაფარიანი ელექტროდის უპირატესობაზე.



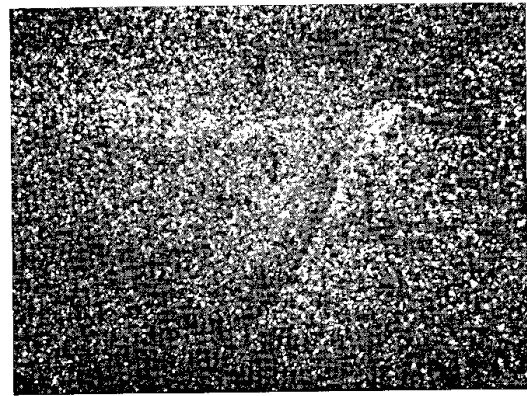
ა) X25



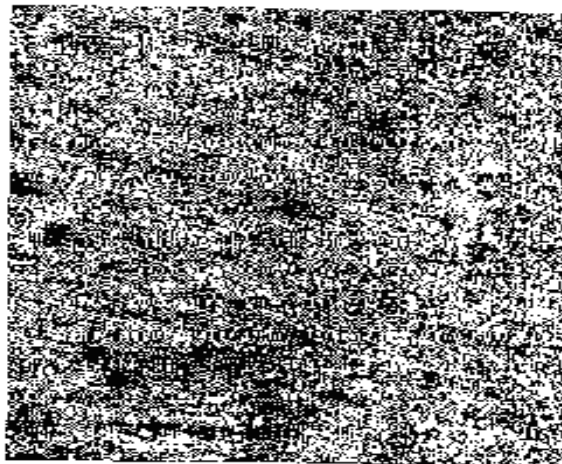
ბ) X100



გ) X25



დ) X100



ე) X25

ნახ. 13. შენადული შეერთებების მიკროსტრუქტურა
ა) კუთხური ნაკერი. შედუღების ზონა X25; ბ) კუთხური ნაკერი. შედუღების ზონა X100; გ) პირაპირა ნაკერი X25; დ) პირაპირა ნაკერი X100; ე) პირაპირა ნაკერი შედუღების ზონა X25;

დასკვნა:

1. საქართველოში არსებული ნედლეულის ბაზაზე შემუშავდა ახალი დანაფარიანი ელექტროდი, რომლის შემადგენლობაში 55 % ტიტანის ოქსიდია. საქართველოში არსებულ 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, ნებისმიერ სივრცით მდგომარეობაში შედუღე-ბისათვის შეიძლება მისი გამოყენება;
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

ტების თანაბარი განაწილებით. ლითონის სტრუქტურა ნაკერის მთელ მონაკვეთში ერთნაირია, არ ჩანს ფორები და შეუდუღებლობა.

კვლევის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგი პუბლიკაციების სახით:

1. ადგილობრივი ნედლეულის გამოყენება საშემდუღებლო მასალად. სტუდენტთა მე-80 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თეზისების კრებული 2012 წელი.
2. 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.
3. სულამანიძე ა., დადიანიძე გ., ნიკოლავა ო., ბერიჩიკიძე ა. შედუღების ელექტროდთა დანაფარი მასალის გამოკვლევა და დამუშავება. საინჟინრო სიახლენი 2012, N 2 გვ. 82-83
4. სულამანიძე ა., დადიანიძე გ., ნიკოლავა ო., ხუციშვილი მ. ხელით რკალური შედუღების ახალი საელექტროდო დანაფარიანი ელექტროდის ზოგიერთი მახასიათებელი. საინჟინრო სიახლენი 2014, N4, გვ. 39-43.
5. სულამანიძე ა., დადიანიძე გ., ნიკოლავა ო., ხუციშვილი მ. ახალ დანაფარიანი ელექტროდით მიღებულ ნაკერთა მიკრო სტრუქტურისა და მექანიკურ თვისებათა ანალიზი. საინჟინრო სიახლენი 2015 წ. N1. გვ. 99-103

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 MnO , 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 Kaspı 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 stabile 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 Kaspı 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.