

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ოთარი ბარაბაქაძე

შემომგლინავი დგანის სამართულების წარმოება  $350\text{C}_2\text{H}_2\text{DM}\Phi\text{T}$   
ტიპის ბეინიტური თუჯებისაგან

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის  
მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობის და ლითონთა დამუშავების  
დეპარტამენტზე / სამსახელო წარმოებისა და ახალი ტექნოლოგიური  
პროცესების მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრ. პროფ. ვ. კოპალეიშვილი

რეცენზენტები: -----  
-----

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და  
მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს  
სხდომაზე, კორპუსი 2-ე, აუდიტორია -----  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.  
დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს  
ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატის – ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა თანამედროვე ტექნიკა გამოყენებულ მასალებს დიდ მოთხოვნებს უყენებს, ისინი უნდა იყოს მრავალფუნქციური, დამუშავების დროს ტექნოლოგიური, წარმოებისთვის იაფი და ექსპლუატაციაში ხანგამძლე. ამ მხრივ გამონაკლისს არც ბენიტური კლასის თუჯები წარმოადგენს, რომელიც ჩვენი კვლევის საგანია როგორც შემომგლინავი დგანის სამართულების მასალა. როგორც ცნობილია, სამართული წარმოადგენს ამ დგანის ერთ-ერთ ყველაზე საპასუხისმგებლო დეტალს. სამართულს მუშაობა უხდება ძალზე მძიმე პირობებში: ის განიცდის ძლიერ პერიოდულ დატვირთვებს, მაღალი წნევის ზემოქმედებას, ძლიერ ცვეთას და ცვალებად სითბურ დატვირთვებს. ყოველივე ამის გამო მას უნდა ჰქონდეს მაღალი საკონსტრუქციო სიმტკიცე, (მაღალი სიმტკიცის მაჩვენებლები, პლასტიკურობისა და სიბლანტის საკმარის მახასიათებლებთან ერთად, ზედაპირის მაღალი სისაღე და თერმომედეგობა და სხვა. ამასთან მისი ზედაპირი უნდა იყოს სრულიად გლუვი, წინააღმდეგ შემთხვევაში წარმოებული პროდუქციის ზედაპირი სათანადო ხარისხის ვერ მიიღება.

დღეისთვის შემომგლინავი დგანის სამართულები მაღალი სიმტკიცის თუჯისგან მზადდება. ამ მასალამ გასულ საუკუნში თვისობრივად ახალი განვითარება პოვა. ჯერ მიღებული იქნა რუხი თუჯი, შემდეგ სფერულგრაფიტისანი, ხოლო შემდეგ კი ბენიტური თუჯი ე.ი. შეიქმნა საკონსტრუქციო მასალა, რომელსაც მაღალ სიმტკიცესთან ერთად გააჩნია გარკვეული დონის პლასტიკურობა, რომელიც მიღწეული იქნა  $\gamma \rightarrow \alpha$  გარდაქმნის შუალედური ეტაპის დეტალური კვლევის შედეგად. გარდაქმნაზე მალეგირებული ელემენტებისა და ტექნოლოგიური ფაქტორების ზემოქმედების შესწავლამ მძლავრი იმპულსი მისცა რიგი ახალი ტიპის შენადნობების შემუშავებას, რომლებმაც გაზარდეს მანქანა-დანადგარების საიმედოობა და ექსპლუატაციის რესურსი, რამაც ბენიტური სტრუქტურა XX საუკუნის ტექნიკური პროგრესის ერთ-ერთ გვირგვინად აქცია. რომელსაც მაღალ ფიზიკო-მექანიკურ მახასიათებლებთან ერთად გააჩნია უნიკალური ტექნოლოგიური და

საექსპლუატაციო თვისებები, რამაც იგი შეუცვლელ მასალად გახადა განსაკუთრებით რთულ – მაღალტემპერატურულ დარტყმით-კონტაქტურ პირობებში მომუშავე საპასუხისმგებლო დეტალების საწარმოებლად, რომელთა კატეგორიასაც მიეკუთვნება ჩვენი საკვლევი დეტალები – შემომგლინავი დგანების სამართულები.

ბენიტური თუჯების ქვეშ იგულისხმება: 1) იზოთერმულად ნაწრობი, სფერულგრაფიტისანი თუჯი და 2) ბენიტური კლასის სფერულგრაფიტისანი თუჯი. ეკონომიკური თვალსაზრისით პირველის უპირატესობა აშკარაა, თუ სრულყოფილად იქნება გათვალისწინებული სამუშაო პირობების გავლენა. მეორე შემთხვევაში, სხვადასხვა დონის ლეგირებით, თითქმის შეუზღუდავად შესაძლებელი ტექნიკისთვის საჭირო ამოცანების გადაწყვეტა. ბენიტური თუჯის მიმართ წაყენებული მოთხოვნების ზრდა განაპირობებს მისი წარმოებისათვის ახალი მოდიფიკატორების, მოწყობილობების და ტექნოლოგიური პროცესების შემდგომი კომპლექსური სრულყოფის აუცილებლობას. ამ ამოცანის გადაწყვეტა დიდადაა დამოკიდებული იმ ახალი მეთოდების ტექნოლოგიებისა და მოწყობილობის შემუშავებასა და კვლევასთან, რომლებიც მოგვცემს სფერულგრაფიტისანი თუჯის სტაბილური მიღების საშუალებას, რისთვისაც აუცილებელია გვექონდეს:

1) თუჯი სასტარტო შემადგენლობით:  $C=3,0-3,5\%$ ;  $Si=2,0-2,5\%$ ;  $Mn \leq 0,30\%$ ;  $S \leq 0,01\%$ ;  $P \leq 0,01\%$  და სხვა;

2) მოდიფიცირება წარმოებდეს CuMg-ის ლიგატურის გამოყენებით SiCa-სთან ერთად.

ADI-ის წარმოების მეორე ტიპი დაკავშირებულია თერმული დამუშავების რეჟიმების შემუშავებასთან, რაც თავის მხრივ მოითხოვს საკმაოდ რთული საკითხების გადაწყვეტას, რაც გამოიხატება ბენიტზე იზოთერმული წრთობის პარამეტრების ზუსტ დაცვაში, რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ შუალედური გარდაქმნის პროდუქტები: ბენიტური ფერიტი ( $\alpha_F$ ) და ნარჩენი აუსტენიტი ( $\gamma_F$ ), რომლებიც საბოლოო ხარისხის გაუმჯობესებაზე მოახდენენ მრავალფაქტორულ ზემოქმედებას. კერძოდ, სწორად ჩატარებულ

ლი თერმული დამუშავება საშუალებას მოგვცემს ადვილად მივიღოთ ნაკეთობის სიმტკიცის მაჩვენებლები, ძირითადად, ბენიტური ფერიტის წარმოქმნით, ხოლო საჭირო დონის პლასტიკურობის მახასიათებლები მივიღოთ TRIP-(Transformation-Induced PlastiCity)-ეფექტების ხარჯზე, რომელიც ხორციელდება ნარჩენი აუსტენიტის გადასვლით მარტენსიტში ძალის მოქმედებისას:  $\gamma + P_{\text{ძალა}} \rightarrow \alpha$ . თუ სფერულგრაფიტის თუჯის კომპოზიციას ისე შევარჩევთ, რომ მისი ფუძე იქნება საშუალონახშირბადიანი ბენიტური კლასის ფოლადის მსგავსი, მაშინ ბენიტური თუჯის თერმული დამუშავების ოპტიმალური რეჟიმების დადგენის დროს შეიძლება გამოყენებული იქნეს ამ კლასის ფოლადებზე მიღებული შედეგები.

თანამედროვე პერიოდში მაგნიუმით თუჯის მოდიფიცირებით შეიძლება უზრუნველყოფილ იქნეს თუჯის ნამზადში საჭირო სტრუქტურისა და შესაბამისი ფიზიკო-მექანიკური თვისებების მიღება. მაგრამ, მოდიფიცირების ტექნოლოგია საჭიროებს სპეციალურ, ძვირადღირებულ მოწყობილობასა და მალეგირებელ კომპონენტებს და, რაც ყველაზე სავალალოა, ხასიათდება არასტაბილური შედეგებით. ამასთან ერთად საყურადღებოა საკვლევი თუჯების მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების მეორე მიმართულება – იზოთერმული წრთობა, რომლის გამოყენებითაც წარმოებული ნამზადი ჩვეულებრივ და ლეგირებულ რუხ თუჯებთან და ფოლადებთან შედარებით გამოირჩევა წარმოების ეკონომიურობით, სიმტკიცის, სიბლანტის, პლასტიკურობის, ხენჯმედეგობის, დამუშავების სიადვილით, დალილობისადმი მედეგობის და სხვა მექანიკური მახასიათებლების უფრო მაღალი მაჩვენებლებით. ამასთან, ის შეიძლება წარმატებულად იქნეს გამოყენებული საკმაოდ მაღალ ტემპერატურებზე ( $T \leq 400^\circ\text{C}$ ) მძიმე დინამიკურ და კონტაქტურ დატვირთვებზე მომუშავე დეტალების საწარმოებლად.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ამ სახის თუჯების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით, აქტუალურია ისეთი კომპოზიციების, მოდიფიკატორების, ლიგატურებისა და ტექნოლოგიური მოწყობილობის შემუშავება და შემდგომი სრულყოფა, რომლებიც შეიცავენ იაფ, არადეფიციტურ, არა მავნე

და ადვილად განსახორციელებელ კომპონენტებსა და კონსტრუქციულ ელემენტებს, ამასთან, იგი იქნება საერთო ტექნოლოგიური შედეგების სტაბილიზების გარანტი, რის შედეგადაც მიღებული იქნება სასურველი ქიმიური შედგენილობის, სტრუქტურისა და შესაბამისი მექანიკური თვისებების მქონე ნაკეთობა.

**სამუშაოს მიზანი:** შემომგლინავი დგანის სამართულების მედეგობის გაზრდა, რაც ითვალისწინებს შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტას:

1. შემომგლინავი დგანის სამართულის კონსტრუქციის სრულყოფა მისი სამუშაო პირობების გასაუმჯობესებლად;
2. შემომგლინავი დგანების სამართულებისათვის თუჯის ქიმიური შედგენილობის შემუშავება და მისი გამოდნობა-ლეგირება-მოდფიცირება-ჩამოსხმის ტექნოლოგიების სრულყოფა;
3. საკვლევი თუჯების მოწვისა და იზოთერმული წრთობის ტექნოლოგიური რეჟიმების შემუშავება ბენიტური სტრუქტურის სტაბილური მიღების მიზნით;
4. შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოებაში გამოსაყენებელი ლიგატურის ქიმიური შედგენილობისა და გამოდნობის ტექნოლოგიის შემუშავება და კვლევა;
5. შემომგლინავი დგანების სამართულების ჩამოსხმის ტექნოლოგიისა და მისთვის აუცილებელი მოწყობილობის – სამსხმელო ციხვების სრულყოფა;
6. თხევადი თუჯის ტემპერატურის საზომი თერმოწყვილის ხარჯის შემცირება;
7. ინდუქციური და რკალური ღუმელების რემონტისათვის სწრაფი გაცივების მოწყობილობის შექმნა.

**კვლევის ობიექტი:** შემომგლინავი დგანის სამართულების წარმოების ტექნოლოგია, კერძოდ კი – სფერულგრაფიტის ბენიტური თუჯები (350C2H2DMFT, 350C1Ю1H2DMFT, 350C2Ю2H3DMFT, 350C1Ю1); მათი

ფუძე – ბეინიტური ფოლადები (45C1H01; 36F2CM, 40FCMP, 40FCMΦ<sup>(1)</sup>, 40FCMΦ<sup>(2)</sup>, 45FCMΦ, 40FMΦ); სამართულის კონსტრუქცია; ზემოაღნიშნული თუჯების გამოდნობა-მოდინფიცირების, მათგან სამართულების ჩამოსხმის და თერმული დამუშავების ტექნოლოგიები; ამისათვის საჭირო ციხვების თერმოწყვილისა და სამსხმელო ძაბრის კონსტრუქციები; ლიგატურების ქიმიური შედგენილობები და მათი გამოდნობის ტექნოლოგია.

**კვლევის მეთოდები:** ქიმიური და მიკროსტრუქტურული ანალიზები; გამოცდები გაჭიმვასა და დარტყმით სიბლანტეზე; სისალის გაზომვა ბრინელის მეთოდით.

**სტატიკური გამოცდები გაჭიმვაზე** ჩატარებული იქნა ГОСТ1497-84 სტანდარტის მიხედვით ცილინდრულ (ჰანტელის ფორმის) III ტიპის ხუთჯერად ნიმუშებზე მუშა ნაწილის დიამეტრებით 10 (გამჭიმავ მანქანაზე MP-100) და 6 მმ (გამჭიმავ მანქანაზე FPZ-100). გამოსაცდელი ნიმუშების ზომებს გამოცდამდე და მის შემდეგ ვსაზღვრავდით მიკრომეტრითა და შტანგენფარგლით. გაჭიმვის პროცესი ხორციელდებოდა სიჩქარით 3 მმ/წთ გაჭიმვის მრუდის ჩაწერით. ვსაზღვრავდით მექანიკურ თვისებათა შემდეგ მაჩვენებლებს:

- |                                                 |                                                                    |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1. დენადობის პირობითი ( $\sigma_{0,2}$ ) ზღვარი | $\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$ , ნ/მმ <sup>2</sup> ანუ მგპა; |
| 2. სიმტკიცის ზღვარი - დროებითი წინაღობა         | $\sigma_s = \frac{P_{max}}{F_0}$ ნ/მმ <sup>2</sup> ანუ მგპა;       |
| 3. ფარდობითი წაგრძელება                         | $\delta_5\% = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%$                   |

**დარტყმით სიბლანტის** განსაზღვრისათვის ГОСТ 9454-78-ის მიხედვით გამოყენებული იქნა მენაჟეს ტიპის 10 x 10 x 55 მმ ზომებიანი ნიმუშები U-ს მაგვარი 2 მმ-იანი ჩანაჭრით 300 ჯ ენერჯის მქონე ურნალზე. ნიმუშები დამზადებული იყო ნამზადების გაფრეზვით, ყოველი მხრიდან და შემდეგ ხდებოდა გაფრეზილი ზედაპირების გახეხვა. ჩანაჭერი უკეთდებოდა, ამ მიზნით სპეციალურად გადაღესილი და სათანადო ზომებზე დაყვანილი

ფრეზის საშუალებით.

**სტრუქტურული კვლევები** ჩატარებული იქნა საკვლევი თუჯებისა და კომპოზიციების 350C2H2DMΦT, 350C1Ю1H2DMΦT, 350C2Ю2H3DMΦT, მიკრო- და მაკროაგებულების შესწავლის მიზნით.

**მიკროსტრუქტურა** გამოკვლეული იქნა მეტალოგრაფიული მიკროსკოპით Neophot-21. კვლევებისათვის განკუთვნილი ნიმუშები, წინასწარ ექვემდებარებოდა სპეციალურ მომზადებას. ხდებოდა მათი ამოჭრა შესაბამისი ნამზადიდან. საკვლევი ზედაპირი იხეხებოდა ზუმფარის ქაღალდზე. ხეხვას ვიწყებდით უხეში მარცვლოვანების მქონე ქაღალდიდან და ვამთავრებდით ნულოვანი ქაღალდით (ყოველი გადასვლის დროს იცვლებოდა ხეხვის მიმართულება 90°-ით). გახეხილ ზედაპირს ვაპრიალებდით მაუდგადაკრულ მბრუნავ დისკზე, რომელსაც წინასწარ ვაწვეთებდით ბენზინს და ვუსვამდით ქრომის ჟანგისაგან დამზადებულ სპეციალურ პასტას ("ГОИ").

ამგვარად მომზადებული საკვლევი ნიმუშს მთლიანად ვასუფთავებდით ბენზინით, ხოლო მის გაპრიალებულ ზედაპირს კი დამატებით ვწმენდდით სპირტში დასველებული ბამბის ტამპონით და მხოლოდ ამის შემდეგ ვწამლავდით აზოტმჟავის (HNO<sub>3</sub>) 3-5%-იან სპირტსხნარში დასველებული ბამბის ტამპონით.

კვლევებს ვატარებდით ოპტიკური მიკროსკოპით Neophot-21. საკვლევი ნიმუშების მიკროსტრუქტურების ყველა დამახასიათებელი თავისებურებათა სრული გამოვლენის მიზნით მიკროხეხვებს ვათვალისწინებდით სხვადასხვა გადიდებაზე ყველაზე სახასიათო უბნების ფოტოგრაფირებით.

**ნაშრომის ძირითადი შედეგები:** შემომგლინავი დგანის სამართულეზის მედეგობის სტაბილური გაზრდა (დაახლოებით 2-ჯერ) გამოწვეულია:

- 1) შემომგლინავი დგანის სამართულეზისათვის თუჯის კომპოზიციის – 350C2H2DMΦT და მისი თერმული დამუშავების ხერხის – „დაკომპაქტებული ორმაგი მოწვის“ შემუშავებით და გამოკვლევით;
- 2) თერმული დამუშავების ამ ხერხით განპირობებული საკმარისი სისქის „ხვერდოვანი შრის“ მიღებით, რაც უზრუნველყოფს სიმტკიცისა და



პლასტიკურობის მაჩვენებლების ზრდას;

- 3) სამართულისათვის შემუშავებული თუჯის სტრუქტურის ჰომოგენიზაციით;
- 4) აუსტენიტის მარცვლის ზომის მნიშვნელოვანი შემცირებით;
- 5) საწყისი ეტაპიდანვე სიმტკიცის მაჩვენებლების გაზრდით, რაც განპირობებულ იქნა ორმაგი მოწვის ბოლო ეტაპზე ღუმელთან ერთად გაცივების ნაცვლად სამართულების გაცივებით ღუმლის გამოწეულ ქვედზე ანუ ნორმალიზაციით;
- 6) მიღების შემოგლინვებს შორის დროის შუალედში წყლის ჭავლით სამართულის შეცივებით.

#### **ნაშრომის მეცნიერული სიახლე:**

1. შემომგლინავი დგანების სამართულებისათვის შემუშავებულია ბეინიტური თუჯის ქიმიური შედგენილობა, მის გამოსადნობად საჭირო ლიგატურები და მათი დნობის ტექნოლოგიები;
2. შემუშავებულია ჩამოსასხმელი ციცხვის ოთხი კონსტრუქცია;
3. შემუშავებული და შესწავლილია თუჯის განგოგირდების, მოწვის და იზოთერმული წრთობის რეჟიმები;
4. შემუშავებულია ბეინიტური თუჯის ქიმიური შედგენილობის შერჩევის მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს საშუალონახშირბადიანი ბეინიტური ფოლადების კვლევისას მიღებული შედეგების გამოყენებაში;
5. შემუშავებულია შემომგლინავი დგანების სამართულების გამაცივებელი სისტემა;
6. შემუშავებულია მაცივებელი მოწყობილობა ინდუქციური და რკალური ღუმელების სარემონტო სამუშაოების ჩატარების წინ მათი სწრაფი გაცივებისათვის;
7. შემუშავებულია თერმოწყვილის ახალი კონსტრუქცია.

ზემოთ აღნიშნულზე დაყრდნობით **დაცვაზე გამოგვაქვს სამი ძირითადი დებულება:**

1. ჩამოსასხმული ციცხვების ახალი კონსტრუქციების შემუშავება, რო-

მელთა გამოყენებით გაადვილდება განგოგირდების, მოდიფიცირებისა და სხვა პროცესების ჩატარება მალეგირებელი და მამოდიფიცირებელი დანამატების (პირველ რიგში მაგნიუმის) ეფექტურობის გაძლიერებით. ასეთი ციხვების გამოყენებით იქმნება პირობები შევინარჩუნოთ მოდიფიცირებული ლითონი ჩამოსხმის პროცესების დამთავრებამდე. ეს კი საშუალებას მოგვცემს წარმატებით დასრულდეს საჭირო სხმულის მიღების ტექნოლოგიური პროცესი ბენიტური თუჯისგან.

2. ბენიტური კლასის თუჯების  $350C2H2DM\Phi T$ ,  $350C1\text{Ю}1H2DM\Phi T$ ,  $350C2\text{Ю}2H3DM\Phi T$  ქიმიური შედგენილობების, გამოდნობა-ლეგირება-მოდიფიცირების, ჩამოსხმის, დაკრისტალების, თერმული დამუშავების ტექნოლოგიის შემუშავება. აქედან საწარმოო გამოცდები სრულად გაიარა დადებითი შედეგებით პირველმა კომპოზიციამ  $350C2H2DM\Phi T$ , რომელიც გადაეცა წარმოებას. რაც შეეხება  $350C1\text{Ю}1H2DM\Phi T$ ,  $350C2\text{Ю}2H3DM\Phi T$  კომპოზიციებს, მათზე ჩატარებულია წინასწარი ექსპერიმენტები, რომლებიც თხოულობს დაზუსტებას. აღნიშნული დაკავშირებულია რკინაზე გრაფიტისატორების – სილიციუმის და ალუმინის, შესაბამისად, შემკუმშავ ( $0,13\text{\AA}$ ) და გამაფართოებელ ( $0,38\text{\AA}$ ) ერთდროულ ზემოქმედებასთან, რომელთა გავლენით (გათვლებით) უფრო დიდ ხანს იქნება შენარჩუნებული რკინა პასიურ მდგომარეობაში და, ამასთან ერთად, კოვალენტური ბმები ნაკლებად შეამცირებს რკინის პლასტიკურობის მაჩვენებლებს.

3. სპილენძ-მაგნიუმისა ( $88\% \text{Cu}$ ,  $12\% \text{Mg}$ ) და სპილენძ-მაგნიუმ-სილიციუმ-კულციუმ-ალუმინ-ნიკელის ( $65\% \text{Cu}$ ;  $12\% \text{Mg}$ ;  $6,5\% \text{Si}$ ;  $6,5\% \text{Ca}$ ;  $5\% \text{Al}$ ;  $5\% \text{Ni}$ .) ლიგატურების ქიმიურ შედგენილობებსა და მათი გამოდნობის ტექნოლოგიას, რაც უზრუნველყოფს გამოსადნობი თუჯის ქიმიური შედგენილობისა და მასში გრაფიტის ჩანართების სფერული ფორმის გაიოლებულ, სტაბილურ მიღებას პიროეფექტის გარეშე.

**შედეგების გამოყენების სფერო:** მასალათმცოდნეობა და მეტალურგია, კერძოდ, მილსაგლინავი აგრეგატის შემომგლინავი დგანისათვის გაზრდილი შედეგობის სამართულების წარმოება მაღალმტკიცე ბენიტური თუჯე-

ბისაგან. შემომგლინავი დგანების სამართულების დამზადების შემუშავებულ სრული ტექნოლოგიური ციკლი ითვალისწინებს: ახალი ქიმიური შედგენილობების ორი ლიგატურის გამოდნობას; ჩამოსასხმელი ციცხვების ოთხ ახალ კონსტრუქციას; ნადნობის ღუმელგარე დამუშავების ახალ ტექნოლოგიას; განგოგირდების, ჩამოსხმის, მოწვისა და წრთობის ახალ ტექნოლოგიებს; მეთოდსა და მოწყობილობას ერთჯერადი თერმოწყვილების ორჯერ და მეტად გამოყენებისათვის; ინდუქციური და რკალური სადნობი ღუმელების სწრაფად გამაცივებელ მოწყობილობას.

ეს სიახლეები აპრობირებულია შპს „რუსთავის ფოლადში“ სადაც გამოდნობილი და ჩამოსხმული იქნა შემომგლინავი დგანის სხვადასხვა ზომის სამართულები საერთო რაოდენობით 247 ცალი, რომელთა მალალი ფიზიკო-მექანიკური, ტექნოლოგიური და საექსპლუატაციო თვისებები და მახასიათებლები სრულად აკმაყოფილებს თანამედროვე მოთხოვნებს.

**ცნობები დისერტაციის მოცულობისა და სტრუქტურის შესახებ:** დისერტაცია წარმოდგენილია 159 გვერდზე, შეიცავს 19 ცხრილს, 32 სურათს, გამოყენებული ლიტერატურის 132 დასახელებისგან შედგენილ ნუსხას, შედგება შესავლის, სამი თავის (1. ლიტერატურის მიმოხილვა; 2. შედეგები და მათი განსჯა; 3. ექსპერიმენტული ნაწილი) და დასკვნისაგან.

დისერტაციის სტრუქტურას ქმნის ერთმანეთის თანმიმდევრულად განლაგებული ტიტულის გვერდი-თავფურცელი, ხელმოწერების გვერდი – დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში დისერტაციის განხილვის რეკომენდაცია, საავტორო უფლების გვერდი, რეზიუმე ქართულ ენაზე, რეზიუმე ინგლისურ ენაზე, შინაარსი, ცხრილების ნუსხა, ნახაზების ნუსხა, შესავლის, ლიტერატურის მიმოხილვის, შედეგებისა და მათი განსჯის, ექსპერიმენტული ნაწილისა და დასკვნისაგან შედგენილი ძირითადი ტექსტი და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა.

**პუბლიკაციები:** სადისერტაციო თემაზე გამოქვეყნებულია 1 პატენტი, 3 სტატია, ადგილობრივი და საერთაშორისო კონფერენციების 4 თეზისი.

## **დისერტაციის ძირითადი შედეგები თავების მიხედვით**

**პირველი თავი** მოიცავს ლიტერატურის მიმოხილვას. აქ წარმოდგენილია შემომგლინავი დგანისა და მისი სამართულის, ბენიტის აგებულების, ბენიტური გარდაქმნის კინეტიკისა და მექანიზმის, ბენიტური თუჯების, მათი მოდიფიცირების, ამისათვის საჭირო ლიგატურების, ციცხვების, თერმული დამუშავების – მაგრაფიტიზებული მოწვისა და იზოთერმული წრთობის რეჟიმების შესახებ მოძიებული და გაანალიზებული ინფორმაცია.

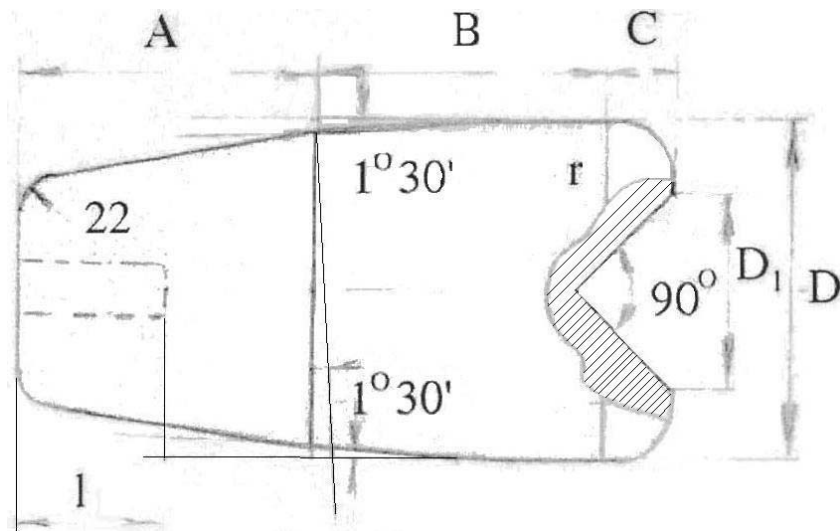
ამ თავში ძირითადი შედეგია ის, რომ ბენიტური სფერულგრაფიტიანი თუჯები ხასიათდებიან მექანიკური და საექსპლოატაციო თვისებების უნიკალურად მაღალი მახასიათებლებით, მაგრამ მათი ფართომასშტაბური გამოყენება მაინც შეზღუდულია ქიმიური შედგენილობის, თერმული დამუშავების და მოდიფიცირების მეთოდებისა და რეჟიმების ოპტიმალური პარამეტრების სიმცირის, მექანიკური თვისებების განმეორებადობის მიუღწევლობის გამო. ამასთან, ჯერ კიდევ არ არის გამოვლენილი, შესწავლილი და, მით უმეტეს, ამოწურული აღნიშნული მასალის თვისებების შემდგომი გაუმჯობესების ყველა შესაძლებლობა და ამის გათვალისწინებით დასახულია შემდგომი კვლევის მიზანი.

**მეორე თავი** მოიცავს შედეგებსა და მათ განსჯას. ამ თავის დასაწყისში განხილულია შემომგლინავი დგანის სამართულის მედეგობის გაზრდის გზები.

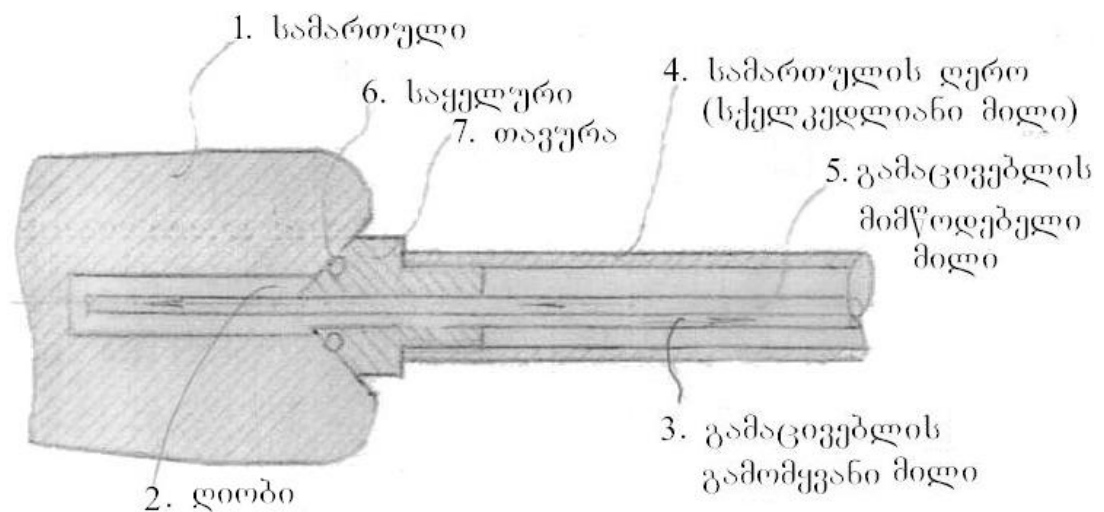
ერთი გზა ეხება სამართულის მუშაობის პირობების გაიოლებას. ვინაიდან შემომგლინავი დგანის სამართულის ნორმალური მუშაობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია მისი სამუშაო ტემპერატურა იყოს 400°C-ზე ნაკლები, თუ ეს პირობა ვერ სრულდება, მაშინ ყოველი მილის გატარების შემდეგ სამართულის იძულებითი გაცივება (მაგალითად, წყლით) აუმჯობესებს მის მედეგობას. ამაზე უკეთესი შედეგის მისაღებად

სამართულის უშუალოდ გლინვის პროცესში უნდა ცივდებოდეს.

სწორედ ამ დასკვნების შედეგად ცნობილ სამართულს ჩაუტარდა რეკონსტრუქცია, რის შედეგადაც შემუშავებული იქნა სამართულის ახალი კონსტრუქცია. წყლით არასაცივებელი სამართულის ნაცვლად (სურ. 1) რეკომენდებულია წყლით საცივებელი სამართული და შესაბამისი სისტემა (სურ. 2).



სურ. 1. აგრეგატ „400“-ის შემომგლინავი დგანის ცნობილი სამართული.



სურ. 2. აგრეგატ „400-ის“ შემომგლინავი დგანის სამართულის შემოთავაზებული კონსტრუქცია.

შემომგლინავი დგანის სამართულების მედეგობის გაზრდის მეორე და ძირითადი გზაა სამართულების მასალის გაუმჯობესება თერმული დამუშავების რეჟიმის შერჩევით. ამისათვის გამოყენებულ იქნა მასალათა თვისებების ლაბორატორიაში (ამჟამად – მასალათა თვისებების სასწავლო-სამეცნიერო-კვლევითი ცენტრი) საშუალონახშირბადიანი ბენიტური ფოლადების შემუშავება-კვლევისას მიღებული შედეგები.

მასალათა თვისებების ლაბორატორიის მრავალწლიანი მუშაობის შედეგად შეიქმნა ორი ახალი ფოლადი – 40ГCMΦ და 40ГMΦ რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდება მხოლოდ სილიციუმის შემცველობით (40ГCMΦ-ში Si=0,50-1,00%, 40ГMΦ-ში Si=0,25-0,40%). სილიციუმის შედარებით მაღალი დონე პირველ ფოლადში, სხვა ეფექტებთან ერთად, განაპირობებს ნარჩენი აუსტენიტის გაზრდილ რაოდენობას ( $\gamma_r \geq 10\%$ ), რომელიც „გაახალგაზრდავების“ შემდეგ ხელს უწყობს მექანიკურ თვისებათა მაჩვენებლების (განსაკუთრებით, პლასტიკურობის) გაუმჯობესებას.

საკუთარი და არსებული ექსპერიმენტული შედეგების სისტემატურმა ანალიზმა მიგვიყვანა შემდეგ მეცნიერულ ჰიპოთეზამდე: დასაბუთებულია, რომ რკინაში და ბენიტური კლასის Fe-C შენადნობებში არსებობს „სილიციუმის ზღურბლი“ (Si>0,50%). ამ ჰიპოთეზის მიხედვით ახლებურად შეიძლება აიხსნეს გრაფიტიზაციის, შედუღება-დადუღების, ფლოკენების წარმოქმნის, ტემპერატურული გამყიფების, მაღალი სიმტკიცის მიღების და სხვა პროცესები. მოვიყვანთ ბენიტურ თუჯებთან დაკავშირებულ მხოლოდ ორ მაგალითს: 1) გრაფიტიზაციის პროცესის ახლებური წარმოდგენა; 2) სიმტკიცის გაზრდის ახლებური გზები.

1) არსებული, დონორ-აქცეპტორული თეორია გარკვეულ დონემდე კარგად ხსნის გრაფიტიზაციის პროცესს. სილიციუმი თავისი  $3S^2p^2$  ელექტრონებით უფრო ადვილად „ახშობს“ რკინის ატომების აქტიურობას  $3d^{(10)}$ -ქვეშრეზე, ვიდრე ნახშირბადი თავისი  $2S^2p^2$  ელექტრონებით. სხვანაირად, სილიციუმის დონორული უნარი გაცილებით აღემატება ნახშირბადისას. იმისათვის, რომ ეს პროცესი წავიდეს სრულად, დიდი რაოდენობითაა საჭი-

რო სილიციუმი, რაც გამოიწვევდა ნახშირბადის მთლიან „გამოთავისუფლებას“ რკინასთან არსებული კავშირებისაგან. მაურერის სტრუქტურული დიაგრამის მიხედვით, როდესაც  $C=1,0\%$ , სრულ გრაფიტიზაციას სჭირდება  $7\%$  Si, ხოლო  $3,5\%$  ნახშირბადის შემცველობისას ფერიტული ფუძის მისაღებად საკმარისია  $2,0\%$  Si. იმავე მიდგომით, ალუმინს თავისი  $3S^1P^2$  ელექტრონებით არ შეუძლია რკინის  $3d^{(10)}$ -ქვეშრეზე არსებული აქტიური სპინების სრული „ჩახშობა“, მაგრამ ის კარგი გრაფიტიზატორია. ჩვენი მეცნიერული ჰიპოთეზით ძირითადია მალეგირებელი ელენემტების გავლენით – შეკუმშვით ( $\Delta_1=2,48\text{Å}_{Fe}-2,35\text{Å}_{Si}=0,13\text{Å}$ ) ან გაფართოებით ( $\Delta_2=2,48\text{Å}_{Fe}-2,86\text{Å}_{Al}=0,38\text{Å}$ ) რკინის ატომების ისეთი დაახლოება, რომ სისტემატურად წარმოიქმნეს კოვალენტური ბუნების მაკავშირებელი ძალები. რომლის დროსაც რკინა პასიური გახდება, ხოლო თავისუფალი ნახშირბადი წარმოქმნის გრაფიტს. ზემოაღნიშნულის დამადასტურებელია, აგრეთვე, სილიციუმისა და ალუმინის გავლენა რკინაზე. როდესაც სილიციუმის შემცველობაა  $2,3\%$ , ხოლო ალუმინისა კი –  $1,5\%$ , რკინა კარგავს ფაზური გარდაქმნის უნარს – ალოტროპიზმს ანუ  $L \rightarrow \delta \rightarrow \gamma \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  გარდაქმნას ცვლის  $L \rightarrow \delta_3 \rightarrow \delta_2$ . ახალი წარმოდგენებით ასევე კარგად იხსნება ნორბურის პოსტულატი: გრაფიტიზაციის პროცესი ჩქარდება მით მეტად, რაც უფრო დიდია სხვაობა მალეგირებელ ელემენტებისა და რკინის ატომების ზომებს შორის.

2) ჩვენი მეცნიერული ჰიპოთეზა კარგად ხსნის ბენიტური გარდაქმნის, ბენიტური კლასის შენადნობების (როგორც ფოლადების, ასევე, თუჯების) ფართო მასშტაბით გამოყენებას. რკინის თანდათანობითი გადაყვანა პასიურ მდგომარეობაში ( $Si \geq 0,50\%$ ) აადვილებს ნახშირბადის გამოთავისუფლებას, რაც თავის მხრივ (შუალედური გარდაქმნის დროს) ხელს უწყობს და აადვილებს მის გადანაწილებას ნახშირბადით ღარიბი და მდიდარი უბნების წარმოქმნით. ნახშირბადით ღარიბი აუსტენიტის უბნები მარტენსიტული მექანიზმით გარდაიქმნება გარკვეულად გადაჯერებულ ფერიტად. ნახშირბადით მდიდარი უბნებიდან (Fe-C შენადნობებში) ჯერ გამოიყოფა კარბიდები, ხოლო შემდეგ კი, უდიფიზიო რეაქციით მიმდინარეობს  $\gamma \rightarrow \alpha$  გარდაქმნა. სი-

ლიციუმის გაზრდილი რაოდენობის დროს ( $Si=0,50-2,5\%$ ), წყალბადთან ერთად, ნახშირბადით მდიდარი აუსტენიტის უბნების გარკვეული ნაწილი (მით მეტი, რაც უფრო მაღალია სილიციუმის შემცველობა) გარდაუქმნელი რჩება, მიიღება ნარჩენი აუსტენიტი  $\gamma_r=10-50\%$ . ბენიტური გარდაქმნის შედეგად ადვილად მიიღება სიმტკიცის მაღალი მაჩვენებლები, ხოლო საჭირო დონის პლასტიკურობის მახასიათებლები მიიღება TRIF-ეფექტების რეალიზაციით  $\gamma_r+P_{\text{ბოს}} \rightarrow \alpha$  გარდაქმნის დროს. სხვანაირად, ჯამურად რეალიზდება „ხელოვნურად“ მიღებულ პლასტიკურობასთან შეხამებული მაღალი სიმტკიცე. ახალმა მიდგომამ შეცვალა და იმავდროულად გაამარტივა საკონსტრუქციო სიმტკიცის გაზრდის გზა, რაც წარმატებით არის რეალიზებული Fe-C-Si შენადნობებში, განსაკუთრებით – ფოლადებში. რაც შეეხება თუჯებს, ღარიბი უბნების  $\alpha$ -ად გარდაქმნის ბოლოს არსებობს მცირე პაუზა, ე. წ. „ფანჯარა“ (ეს არის პერიოდი როცა შუალედური გარდაქმნის დროს წარმოქმნილი ბენიტური ფერიტის რაოდენობა მიაღწევს მაქსიმუმს, რომელსაც მოსდევს კარბიდების გამოყოფის დაწყება ნახშირბადით მდიდარი აუსტენიტის უბნებიდან), როცა შეიძლება გარკვეულად შეუშალო ხელი მდიდარ უბნებში შესაძლებელ არასასურველ გარდაქმნებს. ეს კი ხელმისაწვდომი გახდება მაშინ, როცა ოპტიმიზაციის საკითხების გადაწყვეტაში მეცნიერული მიდგომა იქნება დომინანტი.

ზოგადად შევნიშნავთ, რომ ჩვენი მიდგომის გამოყენება შესაძლებელი იქნება ორივე მიმართულების შემთხვევაში. რაც ახლოს იქნება ფოლადის ქიმიური შედგენილობა თუჯის ფუძესთან, მით უფრო შედეგიანი იქნება (ყველა ასპექტში) გამოყენებულ საშუალონახშირბადიან ბენიტური კლასის ფოლადებზე ( $Si=0,50-2,5\%$ ) არსებული მონაცემები. მაჩვენებლები იცვლება შემდეგ დიაპაზონებში: სიმტკიცის ზღვარი  $\sigma_B=1250-1550^{\text{ფ/მმ}^2}$ ; დენადობის ზღვარი  $\sigma_{\text{დ}}=1060-1290^{\text{ფ/მმ}^2}$ ; ფარდობითი წაგრძელება  $\delta_5=11-16\%$ ; ყელის შევიწროება  $\psi=31,5-58\%$ ; მაკროსისალე HRC=37-43, რაც განპირობებულია კომპოზიციების (ფოლადების) ქიმიური შედგენილობების ცვლილება-განსხვა-



ვებით. თუ დავუშვებთ, რომ ამ მონაცემების გადატანა შეიძლება თუჯებზე, ეს ალბათ საოცნებოა! რეალურად თუჯებში სტრუქტურათა ფორმირებაში თავის ცვლილებებს შეიტანს: 1) სილიციუმის გაზრდილი რაოდენობა,  $Si=1-3\%$ ; 2) გრაფიტის მორფოლოგია, ფორმა და რაოდენობა, თუ მოცულობის რა ნაწილს დაიკავებს გრაფიტის სფერული ფორმის ჩანართები და როგორი იქნება მათი ჯამური გავლენა თვისებებზე.

ყურადსაღებია, აგრეთვე, ძირითადად ფოლადებზე ჩამოყალიბებული ჩვენი კონცეფცია: მყარი ხსნარის ლეგირების ხასიათი (ფოლადის ქიმიური შედგენილობა) და აგებულება – სტრუქტურული მოწესრიგება (განპირობებული თერმული დამუშავებით) ძირითადად განსაზღვრავს სიმტკიცის ზღვრის დონეს, ხოლო მარცვლის სიდიდე, დისპერსულობა, მეორადი ფაზები უფრო მეტ გავლენას ახდენენ დენადობის ზღვარზე. აღნიშნული კონცეფციით ბენიტურ თუჯებზე, საერთოდ არ უნდა გაჭირდეს ფოლადებთან მიახლოებული სიმტკიცის მაჩვენებლების მიღება. რაც შეეხება პლასტიკურობის მახასიათებლებსა ( $\delta_5$ ,  $\Psi$ ) და მექანიკური თვისებების სხვა მაჩვენებლებს: დარტყმით სიბლანტეს  $A_1$ , მდგენელებით –  $A_k + A_b$ ; ზზარმდეგობა  $J_{IC}$ , ბენიტური კლასის ფოლადებზე მოყვანილი ანალიზის მიხედვით, ბენიტურ თუჯებში საჭირო საკონსტრუქციო სიმტკიცის მისაღებად, პრობლემური საკითხები არ უნდა არსებობდეს ან მათ პრობლემური ხასიათი არ უნდა ჰქონდეთ.

რეალურად, ბენიტურ თუჯებში ამ კუთხით არსებული გადასაწყვეტი პრობლემური ამოცანა ასე წარმოგვიდგება: 0,5-3,0% სილიციუმის შემცველობისას, ნახშირბადის მაღალ შემცველობასთან ერთად, შუალედური გარდაქმნის პირობებში თვითორგანიზებადი (სინერგეტიკული) სისტემა ირჩევს გამოსავალს, რასაც მოჰყვება გარკვეული რაოდენობის ბენიტური ფერიტის წარმოქმნა.

როცა ეს პროცესი აღწევს მაქსიმუმს, ნახშირბადით გამდიდრებული აუსტენიტის უბნები დამაბულობას ვერ ინარჩუნებს (ვერ უძლებს), რასაც მოჰყვება რელაქსაციური პროცესების განვითარება (მეორადი ფაზების გა-

მოყოფა, ოთახის ტემპერატურამდე ფაზური გარდაქმნა და სხვა. ეს კი თავის მხრივ ამცირებს (ან მთლიანად სპობს) TRIP-ეფექტების განვითარების შესაძლებლობას ნაკეთობის ექსპლოატაციის დროს. ანდა ძალზე მცირდება პლასტიკურობის „ხელოვნურად“ – არატრადიციულად გაზრდის გზები – საშუალებები (თითქმის ნულამდე დადის საკონსტრუქციო თვისებების ამადლების შესაძლებლობები). თუმცა, ზოგიერთ პირობებში, მაგალითად, ასეთი მასალის (ნაკეთობის) ცვეთაზე მუშაობისას, დარჩენილი (გარდაუქმნელი) აუსტენიტი გადადის მარტენსიტში, რომელიც იწვევს ზედაპირული შრეების სისალის გაზრდას, რაც დადებითად მოქმედებს ნაკეთობის ცვეთამედგობაზე.

თავიდან, მაღალი სიმტკიცის თუჯების წარმოებისას, ნახშირბადისა და სილიციუმის რაოდენობათა შერჩევა წარმოებდა, ძირითადად გრაფიტის პროცესის წასამართავად. ბენიტურ თუჯებში ამ ორმა კომპონენტმა (C, Si) მიიღო ახალი დატვირთვა. სხვანაირად, აუცილებელი ხდება ნახშირბადისა და სილიციუმის რაოდენობათა შერჩევას გათვალისწინებული იქნეს ის პროცესებიც, რომელთაც ადგილი აქვთ ბენიტური გარდაქმნის დროს. რეალურად, მაღალი სიმტკიცის თუჯებში (C=3-4%, Si=2-3%) ირჩევენ ფერიტ-პერლიტურ უბანს – 350C2 (350C2H2DMΦT). ნახშირბადის 3,5%-დან ფუბეში რჩება 0,50%C, ხოლო 3,0% C წარმოდგენილი იქნება გრაფიტის სახით.

თვისებებზე, რა თქმა უნდა, გავლენას ახდენს, როგორც ლითონური, ასევე, გრაფიტული ნაწილი. აღნიშნულის გამო მეორის უარყოფითი გავლენის შესამცირებლად ცდილობენ მიიღონ, რაც შეიძლება კომპაქტური, სფერული ფორმის თანაბრად განაწილებული გრაფიტული ჩანართები. პრობლემურია აგრეთვე, ADI-ის შემთხვევაში, სილიციუმის თანაბარი განაწილების მიღწევაც (მაგალითად, Si=2,0%). ნახშირბადით დარიბი აუსტენიტის უბნებიდან წარმოქმნილი ბენიტური ფერიტის თვისებებზე მოქმედებს ნახშირბადი (0,1%) და სილიციუმი (Si=2,0%). სილიციუმის გავლენით რკინა იქნება ქიმიურად პასიურ მდგომარეობაში, შემცირებული იქნება, აგრეთვე, მისი დარტყმითი სიბლანტე 50-20ჯ/სმ<sup>2</sup>-მდე. ნახშირბადით მდიდარ აუსტე-

ნიტის უბნებში ადგილი ექნება ენერჯის დაგროვებას (ძირითადად, ორი სახის). იზოთერმული წრთობის დროს სახეზეა აუსტენიტის გადაცივებული და ნახშირბადით გადაჯერებული მყარი ხსნარი, რომელსაც ემატება სილიციუმით (სხვა მალეგირებელ ელემენტებთან ერთად) განპირობებული რკინის პასიურობა.

გასათვალისწინებელია ისიც, რომ  $\gamma_{ნარჩ.} = 10-50\%$ . იზოთერმული წრთობის დროს სასურველია დავაფიქსიროთ ის მომენტი, როცა ბენიტური ფერიტის რაოდენობა მიაღწევს მაქსიმუმს, ე. ი.  $\gamma_{დ.} \rightarrow \alpha_{ბ.}$ , მეორადი ფაზების გამოყოფა და გაცივებისას მარტენსიტული გარდაქმნა  $\gamma_{დ.} \rightarrow M$ . ეს უმართავი პროცესები, მნიშვნელოვნად ამცირებენ  $\gamma_{ნარჩ.}$  რაოდენობას, რაც თავის მხრივ ინტენსიურად ამცირებს აუსტენიტის უბნების რაოდენობას, რომლებშიც მოსალოდნელი იყო TRIP-ეფექტების პროცესების განვითარება. ასეთი მასალის (ADI) გაჭიმვის მრუდებზე ფიქსირდება მხოლოდ წრფივი მონაკვეთები დრეკად-პლასტიკური და პლასტიკური დეფორმაციის გარეშე.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, უკეთეს შემთხვევაში, არსებული მასალის ოპტიმიზაციის ჩატარებით შეიძლება ფარდობითი წაგრძელების მნიშვნელობა გაიზარდოს 2-5%-ის ფარგლებამდე, მაგრამ სიბლანტისა და ბზარმდეგობის მახასიათებლების მიღება განუხორციელებელი დარჩება. ამ ჩიხიდან გამოსვლა (ჩატარებულ ანალიზზე დაყრდნობით!) შეიძლება ახალი გრაფიტწარმომქნელების (Al – 2,86Å; Mg – 3,20Å; Y – 3,55Å; Ce – 3,65Å; La – 3,95Å; Ba – 4,30Å) გამოყენებითა და სილიციუმის რაოდენობის შემცირებით ( $Si < 1,0\%$ ;  $Fe + 1\%Si \rightarrow \alpha_{1\%Si}$ ). ჩვენს მიერ (ჯერ-ჯერობით) შერჩეულია ორი გრაფიტზატორი: Al და SiCa, რომელთა გამოყენებითაც შევისწავლით სისტემას C=3,0%-ის გარეშე, ხოლო შემდეგ – სრულად (C=3,5%). საწყის ეტაპზე ყურადღების ცენტრში იქნება გრაფიტის სფერული ფორმის სტაბილური მიღების საკითხები, განხორციელებული ახალი წარმოდგენებით – ფულერენული მოდელით, რომელმაც უნდა გამორიცხოს (ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით გამოთქმული ჩვენი ვარაუდით) მთავარი – უხერხული მოდიფიკატორის (Mg-ის) გამოყენება.

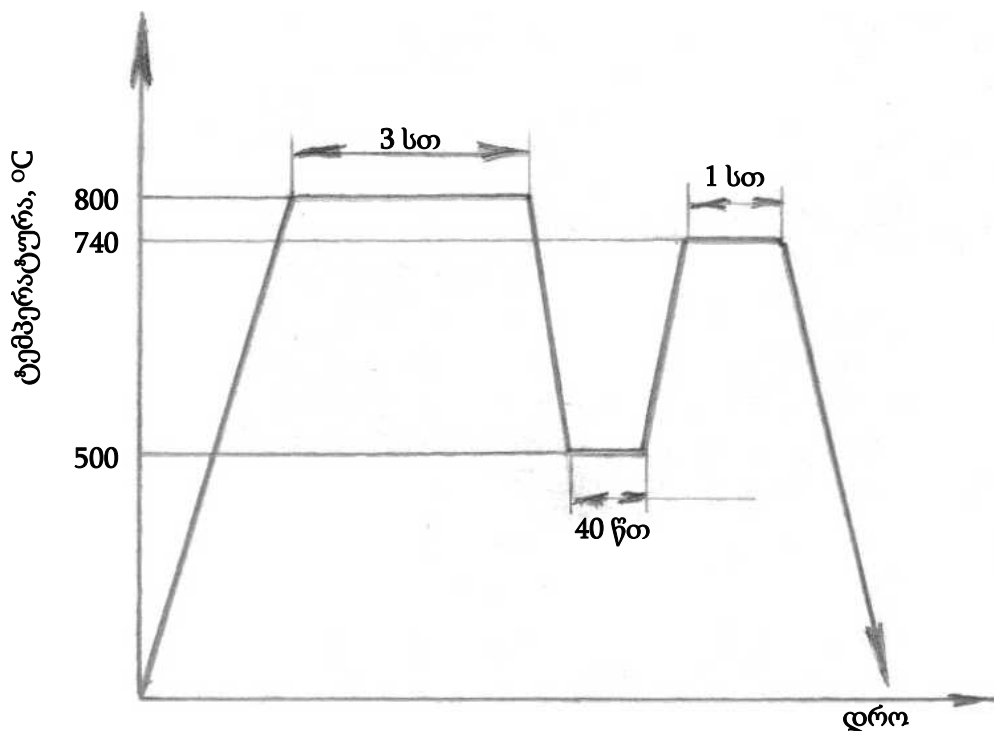
როგორც გვექონდა აღნიშნული შუალედურ გარდაქმნებს, იზოთერმულ პირობებში, საშუალონახშირბადიან, ბენიტური კლასის ფოლადებში და ბენიტურ თუჯებში ერთნაირი ხასიათი აქვთ. პროცესი იწყება ნახშირბადის ( $C\ 0.4-0.6\%$ ) გადანაწილებით, რომელიც მთავრდება ნახშირბადით ღარიბი და მდიდარი უბნების წარმოქმნით. ღარიბი უბნები მარტენსიტული მექანიზმით მაშინვე გარდაიქმნება გარკვეულად გადაჯერებულ ბენიტურ ფერიტად ( $C\approx 0.10-0.15\%$ ), ხოლო ნახშირბადით მდიდარი უბნებიდან ადგილი აქვს კარბიდების გამოყოფას, რომელსაც მოსდევს ფაზური გარდაქმნა ( $\gamma\rightarrow B$ ).

რადგან სილიციუმის შემცველობა თუჯებში იცვლება  $Si\approx 0.50-3.0\%$  დიაპაზონში, ამიტომ ფოლადებისგან განსხვავებით თუჯებში ნარჩენი (გარდაუქმნელი) აუსტენიტის რაოდენობა მეტია, რადგან შუალედური გარდაქმნის დროს რკინისა და მალეგირებელი ელემენტების ატომების გადაადგილება – დიფუზია გამორიცხულია, ამიტომ სილიციუმის გავლენა საერთოდ ბენიტურ თუჯებში, განსაკუთრებით კი – ADI-ში, მნიშვნელოვანია. აღნიშნულის გამო, წარმოდგენილ ნაშრომში მოტანილია ბენიტური კლასის საშუალო-ნახშირბადიან ფოლადებზე მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები, როდესაც სილიციუმი იცვლება  $Si=0.25-1.0\%$ -ის ფარგლებში. ლიტერატურულ მიმოხილვაში დეტალურად არის განხილული ბენიტური ფოლადებისა და თუჯების ლეგირების საკითხები. ახლა კი გავცეთ პასუხი, თუ როგორ მიმდინარეობს ბენიტური გარდაქმნა ფოლადებში იზოთერმულ პირობებში და რა უშლის ხელს, ე. წ. „ფანჯრის“ პოვნას თუჯებში.

როგორც ცნობილია, თუჯებზე ექსპერიმენტის ჩატარება გართულებულია იმიტომ, რომ აუცილებელია სტაბილურად იქნეს მიღებული გრაფიტის კომპაქტური ფორმა მაინც (გაჭირვებისას, ვერმიკულარულიც). სხვანაირად, თუ მოხერხდება შემუშავდეს ტექნოლოგიური პროცესი, რომლის გამოყენებითაც ხელმისაწვდომი იქნება სფერულგრაფიტის თუჯის მიღება, მაშინ სჯობია ექსპერიმენტები ჩატარდეს თუჯზე.

ჩვენს მიერ შემუშავებული ბენიტური სფერულგრაფიტის თუჯისათვის შერჩეული იქნა სამრთულების თერმული დამუშავების ახალი რე-

ქიმი – ეგრეთ წოდებული „დაკომპაქტებული ორმაგი მოწვა“ (სურ. 3).



სურ. 3. სამართლის წინასწარი თერმული დამუშავება „დაკომპაქტებული ორმაგი მოწვა“.

შერჩეული იქნა ამავე თუჯის მისაღებად საჭირო Mg-იანი ლიგატურაც. მართალია, მასში Mg-ის პროცენტული შემცველობის გაზრდა ერთის მხრივ უზრუნველყოფს ლიგატურის საჭირო რაოდენობის შემცირებას, მაგრამ მეორეს მხრივ, ამ აქტიური რეაგენტის აორთქლება უფრო ინტენსიური ხდება, რასაც თან ახლავს დიდი რაოდენობის თხევადი ლითონის ამოფრქვევა ბოლის გამოყოფით და „პიროფექტით“.

გარდა ამისა, ამ ლიგატურის ქიმიური შედგენილობის შერჩევას პირველ რიგში გათვალისწინებული იქნა თანაფარობა Mg-ისა და Si-ის შემცველობებს შორის, რადგან გრაფიტის სასურველი ფორმის მისაღებად თუჯში Mg-ის ნარჩენი რაოდენობა უნდა იყოს 0,04-0,06%, მეორეს მხრივ, თუჯებში შეზღუდულია Si-ის შემცველობაც, ვინაიდან Si-ის და Mg-ის რაოდენობათა თანაფარდობა უნდა შეადგენდეს 2,6-1,5-ს.

გათვალისწინებული იქნა ისიც, რომ ლიგატურა თხევად თუჯზე უფრო მკვრივი უნდა იყოს, რომ იქიდან არ ამოტივტივდეს. საჭირო სიმკვრივის ლიგატურის მისაღებად ჯერ ვიანგარიშეთ მასში შემავალი ელემენტების საჭირო რაოდენობები და ამის შემდეგ გამოვითვალეთ მისი სავარაუდო სიმკვრივე.  $350C2H2DM\Phi T$  ტიპის ბენიტური თუჯისათვის გვჭირდება ორკომპონენტიანი ლიგატურა რომლის ფუძეც იქნება სპილენძი და საჭიროა შეირჩეს მასში Mg-ის ისეთი შემცველობა, რომ მიღებული ლიგატურის სიმკვრივე აღემატებოდეს თხევადი თუჯისას.

12% Mg-ის შემცველობისას ლიგატურაში 88% იქნება Cu. გამოსადნობი ლიგატურის სავარაუდო სიმკვრივე იანგარიშება შემდეგნაირად:  $\gamma_{Cu+Mg}=f_{Cu}\times\gamma_{Cu}+f_{Mg}\times\gamma_{Mg}=0,88\times8,9+0,12\times1,74=8,036$  გრ/სმ<sup>3</sup>, სადაც  $f_{Cu}$  და  $f_{Mg}$  შესაბამისად არის სპილენძისა და მაგნიუმის პროცენტული შემცველობები, ხოლო  $\gamma_{Cu}$  და  $\gamma_{Mg}$  – მათი სიმკვრივეები. ე. ი. ჩვენს მიერ შერჩეული ლიგატურის სიმკვრივეა 8 გ/სმ<sup>3</sup>, რაც (1,4-0,6) გ/სმ<sup>3</sup>-ით მეტია თხევადი თუჯისაზე (6,8-7,5 გ/სმ<sup>3</sup>). ამის გამო ეს ლიგატურა არ ამოტივტივდება გამდნარი თუჯის ზედაპირზე და მოხდება მისი სრული გახსნა ნადნობში შეყვანისას.

ჩვენს მიერ ასევე იქნა შემუშავებული და გამოდნობილი კომპლექსური ლიგატურა, რომელიც დამატებით გამოიყენება, აგრეთვე, წინასწარი განგოგირდებისათვის. მისი შედგენილობაა: 65% Cu, 12% Mg, 5% Al, 6,5% Ca, 6,5% Si, 5% Ni. ასეთი შედგენილობის ლიგატურის სავარაუდო სიმკვრივეა  $\gamma_{Cu+Mg+Al+Ca+Si+Ni}=0,65\times8,93+0,12\times1,74+0,05\times2,7+0,65\times1,53+0,065\times2,33+0,05\times8,91=5,80+0,209+0,135+0,995+0,151+0,446=7,836$  გ/სმ<sup>3</sup>, რაც, მინიმუმ, 0,336 გ/სმ<sup>3</sup>-ით მეტია გამოსადნობი თუჯისაზე.

ჩვენს მიერ შერჩეული ლიგატურები გამოდნობილი იქნა 400კგ ტევადობის მჟავამონაგიან ინდუქციურ ლუმელში. მასში ჯერ ჩავტვირთეთ სპილენძის ჯართი და მასთან ერთად Ni. ლუმლის ჩართვასა და კაზმის გადნობასთან ერთად მას თანდათან დავუმატეთ 0-25 მმ ფრაქციამდე დაფქული SiCa, შემდეგ დავამატეთ შოთური Mg და ბოლოს, დნობის დაჩქარებისა და ძვირადღირებული მალეგირებელი ელემენტების ამოწვის შემცირების მიზ-

ნით – ალუმინის ბურბუშელა მცირე რაოდენობის გრანულირებულ ალუმინთან ერთად დნობის პროცესის ბოლოს, როდესაც წარმოიქმნება თხევადი მოძრავი წიდა, რაც, როგორც ცნობილია, ლიგატურაში შემავალი ელემენტების საკმაოდ ღრმა აღდგენის დამატებითი ნიშანია. ნადნობი ჩამოვასხით წინასწარ გამზადებულ ბოყვში. სხმული იქიდან სრული გაცივების შემდეგ გამოვადეთ და მას მექანიკურად მოვაცილეთ წიდა.

ხარისხიანი ლიგატურის მიღების მიზნით, მალეგირებელი ელემენტების შეყვანამდე, მოვახდინეთ მისი ქიმიური შედგენილობის კორექტირება. ამასთან, გახურების ტემპერატურა იყო 1340-1380°C. ლიგატურა გამოყენებამდე დამტკრეული იქნა 0-10მმ. ფრაქციამდე ისე რომ მთელი მასის 40%-მდე იყო 1მმ-ზე ნაკლები ზომების.

სასურველია, რომ ეს ლიგატურა თხევად თუჯში გოგირდის საწყისი პროცენტული შემცველობის გათვალისწინებით პროცენტულად შემდეგი რაოდენობებით შევიტანოთ:

- S – თუჯში – 0,04 ლიგატურის ხარჯი-----2,0;
- S – თუჯში – 0,04÷0,06 -----2,3;
- S – თუჯში – 0,06÷0,08-----2,6.

ნადნობში ლიგატურის შესაყვანად სასურველია გამოყენებული იქნეს ჩვენს მიერ შემუშავებული ჩამოსასხმელი ციცხვი, რისთვისაც მისი გახურების შემდეგ ლიგატურის მიმღებში წინასწარ უნდა ჩაიყაროს მაგნიუმის შემცველი ჩვენს მიერ შემუშავებული ქიმიური შედგენილობის ლიგატურა. ამასთან მისი გამოყენების კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით აუცილებელია ციცხვი გაივსოს ბოლომდე, რის შემდეგაც ნადნობი 4÷12 წუთით დავაყოვნოთ დუდილის შეწყვეტამდე, ე. ი. – თუჯში ლიგატურის სრულ გახსნამდე. შემომგლინავი დგანის სამართლებად თუჯის ჩამოსხმის საბოლოო ტემპერატურა უნდა იყოს 1260÷1320°C.

სხვადასხვა ქვეყანაში წარმოებული და ჩვენს მიერ შერჩეული მასფერიდიზებელი ლიგატურების ქიმიური შედგენილობები ჩანს ცხრილში 1.

**ცხრილი 1. სხვადასხვა ქვეყანაში და ჩვენს მიერ წარმოებადი ლიგატურების ქიმიური შედგენილობები მასურ %-ში.**

ქვეყანა	Mg	ი.მ.ლ.	Si	Ca	Ce	Al	Ni	ფუძე
ა.შ.შ.	2,4-8,5	0,6-3,5	41-45	–	0,25-0,35	–	–	Fe
იაპონია	2-31	1-8	40-60	1,5-7	–	–	–	–
ინგლისი	3-10	0,5-1,3	–	0,2-4,0	0,25-1,05	–	–	–
გერმანია	8-32	0,8-5,5	45-55	1-4,5	–	–	–	–
უკრაინა	6,6-7,54	–	51,1-52,6	2,4-3,8	–	1,8-5,4	–	–
საქართველო	4,5	5-17		4-18	–	–	–	–
ჩვენი	12	–	–	–	–	–		Cu
	12	–	6,5	6,5	–	5	5	Cu

გამოყენებული მასალების და ჩვენს მიერ წინასწარ გამოდნობილი თუჯების ქიმიური შედგენილობები, მექანიკური თვისებები და მეტალო-გრაფიული კვლევის შედეგები მოცემულია ცხრილებში 2-5 და სურათებზე 4-5.

**ცხრილი 2. საკაზმე მასალების ქიმიური შედგენილობები.**

დასახელება	ქიმიური შედგენილობა, მასურ %				
	C	Si	Mn	S	P
სამსხმელო თუჯი	4,00	1,2	0,53	0,04	0,08
გადასამუშავებელი თუჯი	4,15	0,95	0,35	0,03	0,04

**ცხრილი 3. კომპლექსური ლიგატურის ქიმიური შედგენილობა მასურ %-ში.**

Si	Ca	Mg	P3M	Al
55-62	3,0-7,0	5,5-6,5	6,0-12	2-6

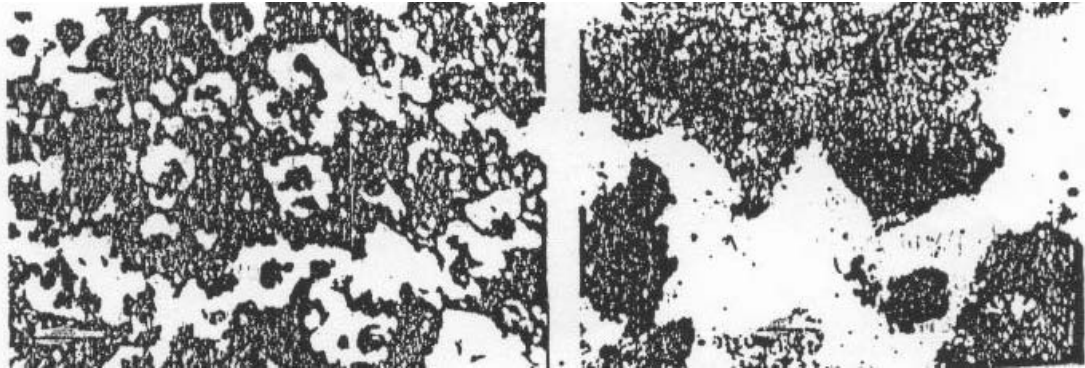
**ცხრილი 4. გამოდნობილი თუჯების ქიმიური შედგენილობები.**

№	ქიმიური შედგენილობა, მასური %					
	C	Si	Mn	Mg	S	P
1.	3,3	1,39	0,59	0,036	0,010	0,110
2.	3,3	2,75	0,48	0,040	0,032	0,110
3.	3,0	3,94	0,55	0,044	0,014	0,061



ცხრილი 5. ბეინიტზე იზოთერმულად ნაწრობი მაღალი სიმტკიცის თუჯის (ADI) მექანიკური თვისებების მახასიათებლები.

№	910°C ტემპერატურაზე აუს-ტენიტის დრო, წთ.	370°C ტემპერატურაზე იზოთერმული წრობის დრო, წთ.	$\sigma_B$ ნ/მმ <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ ნ/მმ <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\psi$ %
1	120	120	864	796	0,5	4,5
2	120	5	890	700	2,8	5,0
		8	850	740	1,2	3,0
		17	850	630	2,8	3,0
		30	850	760	4,8	3,4
		122	880	750	0,7	0,6
3	120	10	688	688	0	0
	120	100	796	671	1,5	5

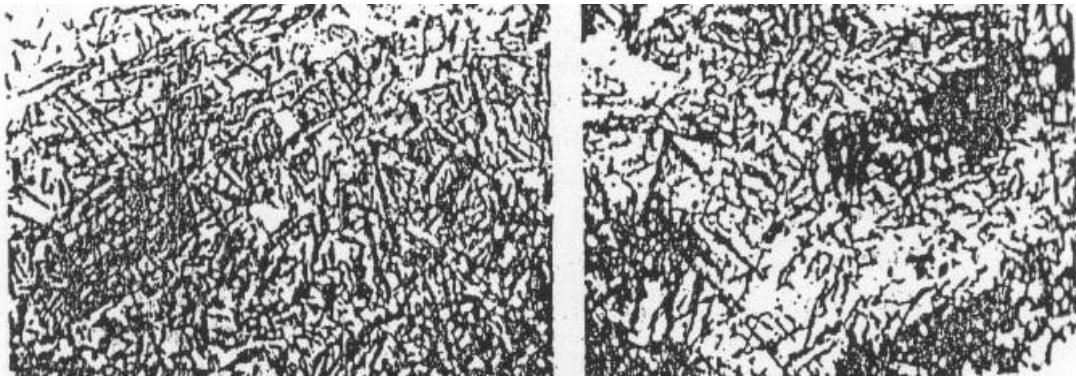


ა) X100

ბ) X400

სურ. 4. თუჯის (C=3,3%; Si=2,75%) საწყისი მიკროსტრუქტურა (სხმული მდგომარეობა).

ა) გადიდება 100; ბ) გადიდება 400.



ა)

X800

ბ)

სურ. 5. ბეინიტზე იზოთერმულად ნაწრობი თუჯის მიკროსტრუქტურები

ა) C=3,3%; Si=2,75%, Mn=0,48%

ბ) C=3,3%; Si=1,39%, Mn=0,59%

საწყისი მონაცემებიდან გამომდინარე (№1 – C=3,3%; Si=1,39%;  $n_B=714$  ნ/მმ<sup>2</sup>;  $n_{0,2}=492$  ნ/მმ<sup>2</sup>;  $\delta_5=4\%$ ;  $\psi=1,87\%$ ; №2 – C=3,3%; Si=2,75%;  $n_B=580$  ნ/მმ<sup>2</sup>;  $n_{0,2}=390$  ნ/მმ<sup>2</sup>;  $\delta_5=8\%$ ;  $\psi=6,7\%$ ) კვლევები გავაგრძელებთ №2 დნობაზე. მექანიკურ თვისებათა საუკეთესო შეხამებით (ცხრილი 5) დავადგინეთ, რომ იზოთერმული წრთობისას ამ თუჯის დაყოვნების ოპტიმალურ დროა 30 წუთი, რაც უკეთეს მაჩვენებლებს მაშინ უზრუნველყოფს გამოსავალ თუჯთან შედარებით, როდესაც ეს უკანასკნელი არ არის სფერულგრაფიტთანში, რასაც ადასტურებს მიკროანალიზის შედეგები (სურ. 4). აქ საქმე გვაქვს კომპაქტურგრაფიტთან თუჯთან, რომლის სტრუქტურაშიც ასევე მცირე რაოდენობით შეინიშნება ვერმიკულარული გრაფიტი.

საჭირო მოდიფიკატორებიდან Mg ყველაზე ძლიერია, მაგრამ მისი გამოყენება დაკავშირებულია სიძვირესთან (მაგალითად, NiMg) და უსაფრთხოების ნორმების ძნელად განხორციელებასთან. მოყვანილი შრომების ავტორები გვთავაზობენ NiMg-ის ნაცვლად, შედარებით იაფი და ტექნოლოგიური მოდიფიცირების გამოყენებას (მაგალითად SiCa), ხოლო გამოდნობის პროცესი უნდა წარიმართოს შემდეგნაირად: 1) თუჯში მავნე მინარევების შემცველობა უნდა იყოს რაც შეიძლება დაბალ დონეზე ( $S, P \leq 0,012$ ), თხევადი თუჯის ტემპერატურა კი უნდა იყოს ტოლი ან მეტი 1500°C-ზე.

ასეთ პირობებში ლითონში არსებული „ხაზური“ აგებულების მქონე გრაფიტული ჩანართები უნდა დაიშალოს ნახშირბადის ატომებად, რის შემდეგაც ჩამოსხმა ვაწარმოთ კოკილებში. მოლიბდენის შემცველ ( $Mo=0,20\%$ ) სინთეტიკურ თუჯზე ლაბორატორიულ პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტებით ნაჩვენებია იქნა, რომ  $\approx 1550^\circ\text{C}$ -ზე გახურებითა და სამ სხვადასხვა სიჩქარეზე (კოკილი, ლითონის ჯამი და მიწის ყალიბი) ჩამოსხმით მიიღება გრაფიტის სფერული, ვერმიკულარული და ფირფიტოვანი ფორმები. შესაბამისად, მსგავსი შედეგები იქნა მიღებული საქარხნო ექსპერიმენტებითაც.

ჩვენს მიერ ჩატარებული 35 საწარმოო დნობით (ცხრ. 6) ბოლო ორი წლის განმავლობაში ჩამოსხმული იქნა სხვადასხვა ზომის 247 ცალი სამართული საერთო მასით 28046 კგ, რის გამოდნობასაც დასჭირდა 39264 კგ სა-

კაზმე მასალა (ცხრ. 7). სამართულები უძლებდა 60÷71 მილის გაგლინვას.

საცდელი-საწარმოო დნობების ტექნოლოგია წარმოდგენილია ხუთტონიან ელექტრორკალურ ღუმელში ჩატარებული №156 დნობის მაგალითზე. დნობისთვის ღუმელში ჯერ მოთავსდა 100კგ Ni, 50კგ Cu, 40კგ, FeMo, 50კგ, SiCa, 30კგ, ჩვენს მიერ შემუშავებული Cu-Mg-ის ლიგატურა და ჩინური წარმოების 50კგ განმაგოგირდებელი (ცხრ. 8), ხოლო შემდეგ კი ჩაიტვირთა თუჯის 4700 კგ ჯართი.

კაზმის ჩატვირთვის დასრულების შემდეგ. ღუმელი მთელი სიმძლავრით ჩაირთო, რის შედეგადაც კაზმი სრულად გადნა. თხევადი აბაზანის ტემპერატურა გაიზარდა 1550°C-მდე, რაზეც ის დაყოვნებულ იქნა 15 წთ-ის განმავლობაში ნადნობის ტემპერატურის გათანაბრებისათვის. შემდეგ მოხდით იქნა წიდა და აღებული იქნა სინჯი წინასწარი ქიმიური ანალიზის ჩასატარებლად.

როგორც ექსპერიმენტებმა დაასაბუთა, ამ პროცესის დამთავრების შემდეგ შეუძლებელია „შავი წიდის“ სრული მოხდა, თხევადი წიდის ნაწილი ციცხვში გადაედინება ლითონთან ერთად, რითაც რთულდება შემდგომი ტექნოლოგიური ციკლი, კერძოდ – განგოგირდება, ლეგირება და სხვა.

აღნიშნული გართულებების თავიდან აცილების მიზნით შევიმუშავეთ წიდის მოხდის ორიგინალური მეთოდი. წიდის წინასწარი მოხდის შემდეგ ღუმელი გამორთულ მდგომარეობაში იქნა დაყოვნებული 5-10 წუთის განმავლობაში. ამ დროს ნადნობის ტემპერატურა თანდათანობით შემცირდა ჩამოსხმის ტემპერატურამდე, ხოლო ნარჩენი წიდა გაცივდა, წარმოიქმნა მისი მკვრივი ქერქი, რამაც შესაძლებელი გახადა ღუმლიდან ციცხვში ლითონის უწიდოდ გადასხმა და ნადნობი უწიდოდ იქნა გადასხმული ჩვენს მიერ დამზადებულ საჩერიან ციცხვში (სურ. 6), რომელიც წინასწარ იქნა გახურებული და მასში მოთავსებული იქნა ჩვენს მიერ შემუშავებული კომპლექსური ლიგატურა.

ამასთან ერთდროულად მიმდინარეობდა თხევადი ლითონის გაქრევა ციცხვში აზოტით, ხანგრძლივი დაყოვნება ლითონიდან აირების, ჟანგულების, წიდის მოცილების, განგოგირდების, ციცხვის მოცულობაში ტემპერატურის შემცირება-გათანაბრებისათვის და როდესაც მან დაიწია 1350°C-მდე, აღებუ

ცხრილი 6. საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტსა (სტუ) და შპს „რუსთავის ფოლადში“ 2011-2012 წლებში შემომგლინავი დგანების სამართლებებისათვის განკუთვნილი, საცდელად გამოდნობილი თუჯების ქიმიური შედგენილობა.

როგობრივი №	დნობის №	ლუმელი	C	Mn	Si	Ni	Mg	Mo	Cr	V	Ti	Al	Cu	S	P
1	2	3	3,5	0,2	1,48	-	-	0,2	0,009	-	-	0,44	-	0,011	0,11
1	1	სტუ-ს ინდუქციური	3,54	0,59	1,88	0,35	0,01	0,09	0,18	0,025	0,015	0,22	0,35	0,057	0,22
2	74-1	ინდუქციური	3,36	0,59	1,96	0,35	-	0,035	0,18	0,06	0,022	0,035	0,45	0,058	0,19
3	74-2	ინდუქციური	3,41	0,55	5,62	0,98	0,02	0,18	-	0,12	0,027	0,27	0,6	0,11	0,34
4	75	ინდუქციური	3,66	0,82	3,9	0,39	0,06	0,13	-	0,06	0,03	2,2	0,35	0,041	0,33
5	76	ინდუქციური	3,27	0,51	3,08	2,16	0,02	0,13	0,22	0,08	0,017	0,75	0,95	0,017	0,17
6	494	რკალური	3,21	0,56	3,64	1,8	0,06	0,14	0,18	0,12	0,035	0,03	0,6	0,01	0,16
7	485	რკალური	3,48	0,56	3,36	1,1	0,05	0,25	0,22	0,14	0,012	0,5	0,6	0,041	0,14
8	499	ინდუქციური	3,2	0,31	3,58	1,3	0,025	0,15	0,22	0,14	0,01	0,5	0,67	0,02	0,14
9	71	ინდუქციური	3,07	0,13	0,8	-	0,015	-	0,23	0,12	0,015	-	-	0,22	0,096
10	93	რკალური	2,98	3,04	0,81	2,75	0,28	0,02	0,3	0,78	0,014	0,2	0,045	0,023	0,19
11	125	რკალური	2,8	3,4	0,73	2,95	0,25	0,02	0,03	0,85	0,025	0,323	0,05	0,025	0,17
12	129	რკალური	3	0,7	2,3	1,5	0,015	-	0,45	0,15	0,05	1,5	0,7	0,57	-
13	560	ინდუქციური	3,35	0,15	3,26	2,75	0,025	0,5	0,14	0,12	კვალი	-	0,85	0,003	0,13
14	151	ინდუქციური	3,68	0,59	2,54	1,49	0,035	0,45	0,08	0,08	0,04	-	0,8	0,005	0,12
15	152	ინდუქციური	3,74	0,82	2,24	1,26	0,035	0,5	0,1	0,1	კვალი	-	0,85	0,008	0,12
16	153	ინდუქციური	3,3	0,49	3,18	1,5	0,045	0,5	0,1	0,04	0,025	-	0,9	0,01	0,13
17	156	ინდუქციური	3,41	0,57	2,84	3,36	0,045	0,25	0,12	0,15	0,02	-	0,92	0,005	0,18
18	158	ინდუქციური	3,69	0,61	3,36	1,26	0,03	0,35	0,12	0,13	კვალი	-	0,8	0,003	0,11
19	159	ინდუქციური	3,35	0,5	2,84	0,59	0,04	0,55	0,12	0,1	0,015	-	0,88	0,008	0,089
20	160	ინდუქციური	3,38	0,42	3,18	0,79	0,035	0,05	0,1	0,11	0,015	-	0,88	0,008	0,091
21	161	რკალური	3,34	0,35	0,1	1,8	-	-	0,18	-	-	-	0,8	0,03	0,089
22	647	რკალური	3,16	0,24	0,56	1,8	0,03	0,35	-	0,15	0,015	0,75	0,8	0,02	0,1
23	648-1	რკალური													

ცხრილი 6. (გაგრძელება).

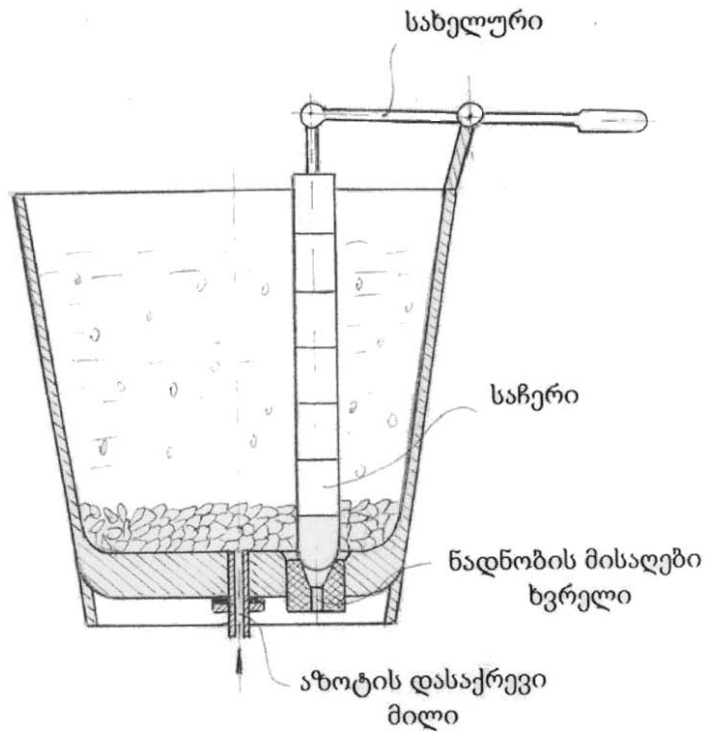
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
24	648-2	რკალური	3,05	0,24	0,56	2,28	0,025	0,04	-	0,17	0,015	0,75	0,7	0,015	0,086
25	734-1	რკალური	3,18	0,78	1,68	1,57	0,03	0,2	0,15	0,08	0,011	0,5	0,65	0,024	0,105
26	734-2	რკალური	3,1	0,73	1,4	1,57	0,025	0,26	0,1	0,08	0,011	0,55	0,64	0,024	0,11
27	198	ინდექციური	3,06	0,65	2,1	2,24	0,035	0,25	-	0,06	0,01	0,5	1	0,025	0,15
28	199	ინდექციური	3,1	0,62	1,42	2,28	0,035	0,15	-	0,05	0,01	0,35	0,5	0,03	0,18
29	200	ინდექციური	3,13	0,79	1,22	1,6	0,03	0,15	0,28	0,06	0,01	0,52	0,5	0,023	0,16
30	201	ინდექციური	2,95	0,76	2,72	2,4	0,45	0,27	0,32	0,07	0,01	0,22	0,9	0,052	0,14
31	202	ინდექციური	2,91	0,61	4,08	1,4	0,035	0,07	0,62	0,1	0,01	0,6	0,84	0,044	0,11
32	203	ინდექციური	3,4	0,67	1,88	1,96	0,035	0,25	-	0,07	0,01	0,35	0,78	0,034	0,12
33	204	ინდექციური	3,38	0,57	3,3	2,87	0,03	0,15	0,5	0,05	0,1	0,5	0,8	0,04	0,123
34	205	ინდექციური	3,27	0,69	2,3	2,67	0,03	0,15	0,9	0,05	0,14	0,8	1,15	0,031	0,13
35	206	ინდექციური	3,55	0,57	2,34	2,28	0,045	0,12	0,35	0,05	0,05	0,5	0,48	0,082	0,11
36	208	ინდექციური	2,85	0,16	2,4	1,6	0,035	0,12	0,35	0,11	0,013	0,4	0,75	0,17	0,075

ცხრილი 7. შპს „რუსთავის ფოლადში“ 2011-2012 წლებში შემომგლინავი დგანისათვის ჩვენი ტექნოლოგიით წარმოებული სამართულების ასორტიმენტი, რაოდენობა და მასა.

რი-გობ-რივი №	სამართულის დიამეტრი Ø, მმ	სამართულთა რაოდენობა, ცალი	მასა, კგ			
			ერთი სამართულის	თითოეული სახეობის სამართულების	ყველა სახეობის სამართულთა ჯამური	კაზმის
1	Ø180	27	44	1188	28046	39264
2	Ø200	9	52	468		
3	Ø210	24	75	1800		
4	Ø230	39	86	3354		
5	Ø250	84	94	7896		
6	Ø280	24	130	3120		
7	Ø305	19	192	3648		
8	Ø330	21	212	6572		
		სულ 247				

ცხრილი 8. ჩინური წარმოების განმაგოგირდებელი რეაგენტის ქიმიური შედგენილობა, % მასით

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe	CaO	TiO <sub>2</sub>
4,2	26,6	6,5	1,7	61,0	1,0



სურ. 6. ციცხვი ნადნობის წინასწარი დამუშავების ჩასატარებლად

ლი იქნა სინჯი გოგირდის შემცველობის განსაზღვრისათვის, რომლის შედეგის გათვალისწინებითაც ნადნობი უნდა გადმოსხმულიყო ჩვენს მიერ დამზადებულ ერთ-ერთ რომელიმე ციცხვში.

თუჯის ტემპერატურის დასაყვანად სასურველ დონემდე (1280-1300°C) ნადნობი დაყოვნებულ იქნა 5-15 წთ-ით. შემდეგ ციცხვი გადატანილ იქნა ყალიბებამდე, რომელთა ლითონის მიმღებებში წინასწარვე იყო ჩადგმული ძაბრები, რომელთა გავლითაც ნადნობი ნაწილ-ნაწილ ჩაისხა ყალიბებში. ჩამოსხმული ნამზადები სრული გაცივების შემდეგ იქნენ გამობერტყილნი ყალიბებიდან, გაიწმინდნენ და მექანიკურად დამუშავდნენ სამართულებად, რომლებსაც ჩაუტარდათ თერმული დამუშავება – ე. წ. „დაკომპაქტებული ორმაგი მოწვა“.

ქიმიური შედგენილობის, გაცივების პირობების და იზოთერმული წრთობის გავლენა საკვლევი თუჯების მექანიკურ თვისებებზე წარმოდგენილია ცხრილებში 9 და 10.

ჩატარებული კვლევების შედეგად შერჩეული იქნა შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოებისათვის განკუთვნილი 350C2H2DMFT ტიპის ბეინიტური თუჯის ქიმიური შედგენილობა. ეს თუჯი ქიმიურ ელემენტებს უნდა შეიცავდეს შემდეგ ზღვრებში (მასითი %): C – 3÷4; Si – 2÷3; Mn≤0,30; Cr≤0,30; S≤0,01; P≤0,02; Ni – 2÷3; Cu – 0,7÷1,2; Mo – 0,3÷0,5; V – 0.1÷0,2; Ti – 0,01÷0,02; Mg – 0,04÷0,06; Al – 0,035÷1,0.

გაცვეთილი სამართულების გადაჩარხვითა და შემდგომი თერმული დამუშავებით, კიდევ უფრო გაიზარდა სამართულების მედეგობასამუშაო ხანგამძლეობა. როგორც სამართულების ექსპლოატაციამ აჩვენა, მათი მწყობრიდან გამოსვლა განპირობებული იყო დასკდომითა და დახლეჩით, რისი მიზეზიც იყო სამართულების ლითონის მცირე პლასტიკურობა და სიბლანტე.

**ცხრილი 9. ქიმიური შედგენილობის და გაცივების პირობების გავლენა საცდელ ნადნობთა სხმული თუჯების თვისებებზე.**

დნობის №	ყალიბი	სიმტკიცის ზღვარი, $\sigma_B$	დენადობის პირობითი ზღვარი, $\sigma_T$	ფარდობითი წაგრძელება, $\delta_5$	სისაღე ბრინელის მიხედვით, HB
		მგპა	მგპა	%	
1 – სტუ	ლითონის ჯამი	127	127	0,4	143
74 – 1	მიწის	133	133	0	138
	ლითონის ჯამი	140	124	2	145
	კოკილი	160	148	4	158
74 – 2	მიწის	133	133	0	125
	ლითონის ჯამი	138	121	0,91	140
	კოკილი	145	125	0	153
485	მიწის	82	82	0	147
	კოკილი	95	88	0,8	152
71	მიწის	165	158	2,5	153
	კოკილი	172	153	4	184
125	მიწის	353	234	2	
129	მიწის	274	274	0	178
	კოკილი	345	302	6	192
494	მიწის	120	120	0	148
	კოკილი	160	120	3	193
499	მიწის	107	107	0	135
	კოკილი	232	182	3,8	152
151	მიწის	432,7	388,5	2,5	212
152	მიწის	480,8	405,5	2,2	233
153	მიწის	509,8	422,9	2,3	254
156	მიწის	471	361	7	287
647	მიწის	209	209	0	178
648-1	მიწის	240,4	432,7	0	197
648-2	მიწის	279,15	187,2	3,8	167

**ცხრილი 10. იზოთერმული წრთობის გავლენა სხმული თუჯის მექანიკურ თვისებებზე.**

დნობის №	თერმული დამუშავების რეჟიმი	სიმტკიცის ზღვარი, $\sigma_B$	დენადობის პირობითი ზღვარი, $\sigma_{0,2}$	ფარდობითი წაგრძელება, $\delta_5$
		მგპა	მგპა	%
161	სხმული (თ. დ.-ის გარეშე)	417,1	300,9	4,5
	750°C 30 წთ+400°C 10 წთ	488,6	409,3	4,11
	800°C 30 წთ+400°C 10 წთ	445,8	389,3	4,165
	850°C 30 წთ+400°C 10 წთ	459,8	409,9	3,66



მესამე თავის – ექსპერიმენტული ნაწილის ძირითადი შედეგია ის, რომ შერჩეულია საკვლევი მასალა, მისი თერმული დამუშავების რეჟიმები და ამისათვის საჭირო მოწყობილობა, ამ მასალის კვლევის მეთოდოლოგია, რაც მოიცავს მექანიკური გამოცდების – სისალის გაზომვის, გაჭიმვაზე სტატიკური გამოცდების, დარტყმითი სიბლანტის განსაზღვრის და სტრუქტურული (მათ შორის მიკროსტრუქტურული) კვლევების მეთოდოლოგიას.

## ინფორმაცია ნაშრომის აპრობაციის შესახებ

ნაშრომის მასალები მოხსენებული იქნა:

1. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 77-ე ღია სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონთა დამუშავების სექციაში. ო. ბარბაქაძე. (ხელმძღვანელები – ვ. კოპალეიშვილი, ნ. ხიდაშელი). შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოება 350C2H2DMΦT ტიპის ბენიტური თუჯისაგან. კონფერენციის თეზისების კრებული. თბილისი: საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2009 წ. გვ. 49-50.
2. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 78-ე ღია სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონთა დამუშავების სექციაში. ო. ბარბაქაძე. (ხელმძღვანელი – ვ. კოპალეიშვილი). მილსაგლინავი დგანების ინსტრუმენტების წარმოება ბენიტური თუჯისაგან. კონფერენციის თეზისების კრებული. თბილისი: საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2010 წ. გვ. 52-53.
3. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 79-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონთა დამუშავების სექციაში (საფაკულტეტო I და საუნივერსიტეტო III ადგილები). ო. ბარბაქაძე (ხელმძღვანელი – ვ. კოპალეიშვილი) შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოება ბენიტური თუჯისაგან. კონფერენციის თეზისების კრებული. თბილისი: საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2011 წ. გვ. 110.
4. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა მე-80 ღია საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონთა დამუშავების სექციაში (საფაკულტეტო და საუნივერსიტეტო I ადგილები და ჯილდო). ო. ბარბაქაძე. (ხელმძღვანელი – ვ. კოპალეიშვილი) თუჯების სფეროიდიზაციის ხერხები და მოწყობილობები. კონფერენციის თეზისების კრებული. თბილისი: საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. 2011 წ. გვ. 95.
5. დოქტორანტების პირველ სემინარზე 2010 წლის 29 ოქტომბერს საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტზე. ო. ბარბაქაძე. ბენიტურ თუჯთან დაკავშირებული ამოცანები და მათი გადაწყვეტის პერსპექტივები. შეფასება – 77 ქულა.
6. დოქტორანტების მეორე სემინარზე 2012 წლის 22 დეკემბერს თბილისში, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტზე. ო. ბარბაქაძე. შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოება 350C2H2DMΦT ტიპის ბენიტური თუჯისაგან. შეფასება – 83 ქულა.

## დასკვნა

1. ნაჩვენებია, რომ მიუხედავად დიდი მიღწევებისა, სფერულგრაფიტიანი თუჯების სხმულების ფართომასშტაბული სამრეწველო წარმოება-გამოყენება გარკვეულად შეზღუდულია. აღნიშნულის მიზეზად შეიძლება დავასახელოთ:

- საბაზო სხმულებისადმი წაყენებული ხისტი მოთხოვნები (მაგალითად: ქიმიურ შედგენილობაზე, სტრუქტურაზე, მექანიკური თვისებების მახასიათებლებზე და სხვა);
- მალული დეფექტების სიმრავლე;
- სფეროიდიზაციისა და ბეინიტური სტრუქტურის მიღების სირთულეები და აქედან გამომდინარე – შედეგების არასტაბილურობა. მიზანშეწონილია შემუშავებული იქნეს ახალი ეფექტური ტექნოლოგიური პროცესები, ლიგატურები, მოწყობილობები და სხვა, რომლებიც ხელს შეუწყობს სფერულგრაფიტიანი თუჯის სტაბილურ მიღებასა და მისგან ბეინიტური თუჯის ფართომასშტაბიან წარმოებას.

2. სფერულგრაფიტიანი თუჯის სხმულის სტაბილურად მისაღებად მიზანშეწონილია ლიგატურის (მოდIFIკატორის) მიწოდება განხორციელდეს ლითონის უშუალოდ ყალიბში ჩამოსხმისას, რომლის მოწყობილობისა და ტექნოლოგიის დახვეწას ეძღვნება ჩვენს მიერ შემუშავებული მესამე ციკხვის კონსტრუქცია. ციკხვის (ასევე, ჩვენს მიერ შემუშავებული!) მეოთხე კონსტრუქცია უნივერსალურია და მისი გამოყენება განსაკუთრებით ეფექტურია ლითონებისა და შენადნობების მაგნიუმით მოდიფიცირებისას.

აღნიშნული ციკხვების პრაქტიკაში გამოყენება მნიშვნელოვნად გააადვილებს სფერულგრაფიტიანი თუჯების სტაბილურად მიღებას, ეს წინა პლანზე წამოწევს TRIP-ეფექტების გამოყენების პრობლემას ბეინიტური თუჯის წარმოებისას, რაც თავის მხრივ, ხელს შეუწყობს ფულერენული მიდგომის ფოკუსირებულ გამოყენებას სფერულგრაფიტიანი თუჯის მისაღებად, განსაკუთრებით, – სხმულების წარმოებისას ქარხანაში.

3. დასაბუთებულია, რომ უდავოდ მოითხოვს კორექციას გრაფიტიზაციის პროცესები, რადგან მაურერის სტრუქტურული დიაგრამა (საერთოდ, სტრუქტურული დიაგრამები!) შემუშავებული იყო იმ მოსაზრებით თუ, როგორ შეიძლებოდა, გარკვეულ პირობებში ( $\geq 50\text{მმ}$ ), სტაბილურად მიღებულიყო რუხი თუჯი სხვადასხვა ფუძით (პერლიტი, ფერიტი, პერლიტი+ფერიტი). დღეს ბეინიტმა, ნარჩენ აუსტენიტთან ერთად, შექმნა ახალი საკონსტრუქციო მასალა და, რა თქმა უნდა, საჭიროა, სფერულგრაფიტიანი თუჯის ადვილ მიღებასთან ერთად მოინახოს გზები, რომ მის მიკროსტრუქტურაში სტაბილურად იქნეს შენარჩუნებული ოთახის ტემპერატურამდე საჭირო რაოდენობის, გარდაუქმნელი აუსტენიტის მდგენელები.

ჩვენი პოზიცია ასეთია: საჭიროა სილიციუმის ნაწილი ჩანაცვლებული იქნეს ახალი გრაფიტწარმოქმნელი ელემენტით (-ებით), ხოლო სინთეტიკური თუჯის ( $S \leq 0,01\%$ ;  $P \leq 0,01\%$ ;  $Mn \leq 0,30\%$ ) გადახურებით ( $\approx 1550^\circ\text{C}$ -ზე) და სწრაფი გაცივებით მიღებული იქნეს გრაფიტის სფერული ფორმა (ე.წ. „ფულერენული მოდელის“ გამოყენება). სხვანაირად, ბეინიტურმა თუჯმა აუცილებელი გახადა სერიოზული ცვლილებები იქნეს შეტანილი რუხი თუჯის წარმოების სტრატეგიაში.

4. მოლიბდენის შემცველ ( $Mo=0,20\%$ ) სინთეტიკურ თუჯზე ლაბორატორიულ პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტებით ნაჩვენები იქნა, რომ  $\approx 1550^\circ\text{C}$ -ზე გახურებითა და სამ სხვადასხვა სიჩქარეზე (კოკილი, ლითონის ჯამი და მიწის ყალიბი) ჩამოსხმით მიიღება: გრაფიტის სფერული, ვერმიკულარული და ფირფიტოვანი ფორმები. შესაბამისად, მსგავსი შედეგები იქნა მიღებული საქარხნო ექსპერიმენტებითაც.

ამ შედეგების პრაქტიკაში რეალიზაციას სჭირდება საკითხების ინჟინრული გადაწყვეტა. გადახურებით თხევად თუჯში არსებული გრაფიტის ჩანართები იშლება ნახშირბადის ატომებად, შემდეგი სწრაფი გაცივებით ნახშირბადი ატომების თავმოყრა წარმოქმნის სფერული ფორმის ფულერენებს, რითაც გამოირიცხება წარმოქმნილი კრისტალიზაციის ცენტრების არასფერული ზრდა.

გადასაწყვეტია, გაცივების შედარებით დაბალ სიჩქარეზე მოხერხდეს იგივე პროცესების განვითარება, რომ გრაფიტის სფერული ფორმის მიღების ეს პროცესი გახდეს უნივერსალური.

5.  $\gamma \rightarrow \alpha$  გარდაქმნის დიაგრამების ნაკლებობა ბენიტურ თუჯებში გვიბიბგებს გამოვიყენოთ (გარკვეული წესით) საშუალო ნახშირბადიანი ბენიტური კლასის ფოლადებზე არსებული აუსტენიტის  $\gamma \rightarrow \alpha$  გარდაქმნის კინეტიკური დიაგრამები. თუჯის ფუძის ყველანაირი მიახლოება საშუალონახშირბადიან ბენიტური კლასის ფოლადებთან საშუალებას იძლევა ბენიტური თუჯების წარმოებისას გამოვიყენოთ მრავალი ცნობილი შედეგი (მაგალითად, ბენიტური კლასის ფოლადებზე – 36Г2СМ, 40ГСМР, 40ГСМФ<sup>(1)</sup>, 40ГСМФ<sup>(2)</sup>, 45ГСМФ, 40ГМФ-400°C-ზე იზოთერმული წრთობის შედეგები:  $\sigma_B=1250-1550\text{ნ/მმ}^2$ ;  $\sigma_{\infty}=1060-1290\text{ნ/მმ}^2$ ;  $\delta_5=11-16\%$ ;  $\Psi=31,5-58\%$ ; HRC=37-43), რაც აადვილებს, როგორც სიმტკიცის მაღალი მაჩვენებლების მიღებას, ასევე ამოხსნადი ხდება საჭირო დონის პლასტიკურობის მახასიათებლების მიღწევაც.

აღნიშნულის განსახორციელებლად საჭირო შეიქმნა სილიციუმის შემცირება 1%-მდე (Fe+1%Si განაპირობებს KCV $\approx$ 200ჯ/სმ<sup>2</sup>) და ახალი გრაფიტიზატორის – ალუმინის გამოყენება (Al $\approx$ 1,0%). ამ მიდგომამ საჭირო გახადა ორივე მხარეს (როგორც ფოლადების, ასევე , თუჯების) ჩატარდეს ექსპერიმენტები (ფოლადებში, მაგალითად, 40ГСЮМФТ; თუჯებში – 350С1Ю1Н2ДМФТ). ასეთი ექსპერიმენტები ტარდება თუჯებში და სახეზეა წინასწარი შედეგები.

ორივე მასალაზე მიღებული შედეგების ანალიზი უდავოდ დააჩქარებდა ამ ძალზე მნიშვნელოვანი ამოცანის ამოხსნას. თუჯებზე მიღებული შედეგები გვიპასუხებდა გრაფიტიზაციის პროცესზე, გრაფიტის ფორმის მიღების ჩათვლით. ფოლადებზე მიღებული შედეგები კი მოგვცემდა ზუსტ მონაცემებს თუ როგორ და რამდენად გაუმჯობესდა ფუძის თვისებები, განსაკუთრებით, პლასტიკურობის მახასიათებლები. საბოლოოდ, ორიგინალურმა მიდგომამ წარმოქმნა, მეტად მნიშვნელოვანი, ახალი მი-

მართულება ბეინიტური გარდაქმნების შესასწავლად, მიღებული შედეგების პრაქტიკაში უკეთ რეალიზაციის კუთხით.

6. ჩვენს ხელთ არსებულ მონაცემებზე დაყრდნობით, პერსპექტიულად მიგვაჩნია მუშაობა ვაწარმოოთ ზედა ბეინიტზე, რომელიც არ გამოირიცხავს სამუშაოების ჩატარებას  $A_1-A_3$  შორის გახურების შემდეგ, რაც სტაბილურად იძლევა ბეინიტური თუჯის საკონსტრუქციო სიმტკიცის გაზრდის საშუალებას. მოგვყავს 40ГМФ(Ca) ტიპის ბეინიტური კლასის ფოლადზე ჩატარებული ექსპერიმენტების (გახურება  $740^{\circ}\text{C}$ -ზე, დაყოვნება 5-10 წუთი, გაცივება  $390-410^{\circ}\text{C}$ -ზე 50-120წმ-ის დაყოვნებით) შედეგები:  $\sigma_B=870-950\text{ნ/მმ}^2$ ;  $\sigma_{\text{с}}=580-620\text{ნ/მმ}^2$ ;  $\delta_5=14,7-17,8\%$ ;  $\Psi=25-45\%$ ;  $\text{HRC}=37-43$ .

სრული ანალიზის ჩასატარებლად მიზანშეწონილია ექსპერიმენტები ჩატარდეს შემდეგ მასალებზე: 1)350C1H01 და 45C1H01; 2)350C1H01H2DMΦT და 45ГC1H01MΦT. პირველი ჯგუფი დაახასიათებს ფუძის ლეგირებას თუჯებსა და ფოლადებში ბეინიტზე იზოთერმული წრთობით მიღებული შედეგებით, ხოლო მეორე ჯგუფის შენადნობებზე მიღებული შედეგები გასცემს პასუხს ბეინიტური თუჯის საკონსტრუქციო სიმტკიცეზე.

7. შემომგლინავი დგანის სამართულების მედეგობის გაზრდის მნიშვნელოვან მხარეს წარმოადგენს, ე.წ. „ახალი ფენომენის“ გამოყენება. ორმაგი მოწვის ჩატარება ნორმალიზაციით საშუალებას მოგვცემს ზედაპირული შრე გაჯერებული იყოს Ni, Mo, Cu და სხვა ელემენტებით, რაც გრაფიტთან ერთად, ეფექტურად გაზრდის სამართულების მედეგობას. ამ შრის მკვებავს და საყრდენს წარმოადგენს ფუძე, რომლის საკონსტრუქციო სიმტკიცე დიდხანს იქნება შენარჩუნებული ექსპლოატაციის დროს. აღნიშნულის საფუძველს იძლევა განმადრუებელი და შემომგლინავი დგანების სამართულების მუშა პირობების მსგავსება.
8. შერჩეულია შემომგლინავი დგანების სამართულების წარმოებისათვის განკუთვნილი 350C2H2DMΦT ტიპის ბეინიტური თუჯის ქიმიური შედგენილობა. ეს თუჯი ქიმიურ ელემენტებს უნდა შეიცავდეს შემდეგ

ზღვრებში (მასითი %): C – 3÷4; Si – 2÷3; Mn≤0,30; Cr≤0,30; S≤0,01; P≤0,02; Ni – 2÷3; Cu – 0,7÷1,2; Mo – 0,3÷0,5; V – 0,1÷0,2; Ti – 0,01÷0,02; Mg – 0,04÷0,06; Al – 0,035÷1,0.

**გამოქვეყნებული ნაშრომების, პატენტების და საავტორო მოწმობების სია, რომელთა შინაარსი შეესაბამება დისერტაციის თემატიკას და შედის სადისერტაციო ნაშრომში**

1. Патент СССР. №1802747. МКИ В22D 41/00. Ковш для разливки расплавов / Копалеишвили В. П., Кашакашвили И. Г., Барбакадзе О. Г., Кобалава Г. Ш., Гоголашвили В. С., Иобашвили О.С.; заявитель и патентообладатель Руставский металлургический завод; опубликован 15.03.93. Бюл. №10.
2. კოპალეიშვილი დ., ქაშაკაშვილი ი., კერესელიძე ლ., ხიდაშელი ნ., ბარბაქაძე ო., ბარათაშვილი მ., სვერულგრაფიტიანი თუჯის საკონსტრუქციო სიმტკიცის გაზრდა შედგენილობითა და თერმული დამუშავების სრულყოფით. ტრანსპორტი და მანქანათმშენებლობა. თბილისი. №2(21). 2011. გვ. 28-53.
3. კოპალეიშვილი ვ., ხიდაშელი ნ., კერესელიძე ლ., ბარბაქაძე ო., ბარათაშვილი მ., თაყაძე ო. ბენიტური თუჯის საკონსტრუქციო სიმტკიცის გაზრდის გზები და მიღებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობები შპს „რუსთავის ფოლადის“ პირობებში. ენერჯია. თბილისი №1(61). 2012. გვ. 46-54.
4. ბარბაქაძე ო., კოპალეიშვილი ვ., ბარათაშვილი მ., ლომიძე რ., ბაქრაძე რ., ფუტყარაძე გ. თუჯების სვეროიდიზაციის ხერხები და მოწყობილობები. საქართველოს ნავთობი და გაზი. თბილისი. 2012. №27. გვ. 95-104.

## Abstract

Grey cast iron is very significant among iron alloys. Casting ability, strength, machinability, vibration absorbing good ability, low cost and other features of finished product make grey cast iron widely applied engineering material. Its character is determined by the matrix structure (ferrite, ferrite-perlite, perlite, bainite, etc.) and graphite form (plate, spheroidal, vermicular, flaked).

Some of the engineering problems were solved in the XX century, at the end of which new engineering material – bainitic cast iron was created. This material combines properties of steel and grey cast iron with spheroidal graphite. It was called „XXI century material.“ It (ADI – Austempered Ductile Iron) can be produced by ausforming of Ductile Iron (DI) or from bainitic cast iron (350C2H2ДМ; Our 350C2H2ДМФТ, 350C2Ю2H3ДМФТ). Of course, both cast irons are used. The first one is cheap (350C2; 350C1Ю1, 350C2Ю2) due to lack of alloying elements, but its heat treatment in the bath is complicated and its working temperature is  $\leq 400^\circ\text{C}$ . The second alloy is expensive, but the desirable structure is obtained relatively easily, the working temperature (including recrystallization above  $A_1$ ) slightly affects the structural stability and therefore, durability of the finished product.

Basis of the presented thesis work is the scientific hypothesis about „silicon threshold“, which fundamentally changes the notions of the processes (for example: graphitization, welding-facing, flake formation, cold brittleness, obtaining high strength, etc.). The same hypothesis makes it possible to develop new directions (for example: „Hydrogen accumulating iron-based alloys“). Let's consider graphitization process.

The donor-acceptor theory partly explains graphitization process. After hybridization silicon with its  $3S^2P^2$ -electrons better hinders the four unbalanced electron activity on iron  $3d_{(10)}^6$  subshell than carbon with its hybridized electrons  $2S^2P^2$ . For completing this process a large amount of silicon is needed. According to Maurer's structural diagram, when  $C=3,5\%$ , even  $Si=2,0\%$  is enough for obtaining ferritic grey cast iron. With the same approach, aluminum with its  $3S^1P^2$ -electrons cannot fully hinder the four unbalanced electron activity on iron  $3d_{(10)}^6$  subshell, but it is a good graphitizer.

According to the scientific hypothesis, it is basic to realize such approachment of the iron atoms by compression ( $\Delta_1 = 0,13\text{\AA} = a^{Fe} 2,48\text{\AA} - a^{Si} 2,35\text{\AA}$ ) or expansion ( $\Delta_2 = 0,38\text{\AA} = a^{Al} 2,86\text{\AA} - a^{Fe} 2,48\text{\AA}$ ) to bond unbalanced spins by covalent forces on  $3d_{(10)}^6$  subshell. Iron loses its allotropism and instead of  $L \rightarrow \delta \rightarrow \gamma \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  transformation  $L \rightarrow \delta_{k8}$  is obtained when  $Si=2,3\%$ , but in case of aluminum the same group is obtained, when  $Al=1,5\%$ . In this regard Norbury's hypothesis is actual: the more the difference between the atoms of alloying element and iron, the more the graphitization process is accelerated.

The new approach due to the „Silicon Threshold“ enforced the accurate study of simultaneous action of the two elements (Si, Al). By substituting half of the required silicon amount with aluminum iron is preserved in passive state. In addition, decrease of silicon amount by 1.3% is important with regard of the fracture mechanics,

as iron plasticity is increased. To obtain the necessary strength ( $\sigma_y=600-800\text{N/mm}^2$ ,  $\sigma_t=800-1000\text{N/mm}^2$ ) in both cases (ADI – 350C1Ю1, 350C2Ю2; bainitic cast iron 350C2H2ДМФТ, 350C2Ю2H3ДМФТ) is not difficult.

For heat treatment of DI we need to know: when the transition  $\gamma_p \rightarrow \alpha_B$  of carbon depleted area reaches its maximum and when the separation of carbides begin in carbon-rich austenitic areas, if they will be maintained at room temperature without  $\gamma_r \rightarrow M$  transformation. Their presence at room temperature allows to increase the structural strength of metal product using TRIP-effects (Transformation-induced plasticity –  $\gamma_r + P_f \rightarrow \alpha$ ).

In the present work is mainly considered solution of the tasks for bainitic cast irons. Data for bainitic steels obtained in the „Material Properties Training-Scientific-Research Center“ are used for solving these tasks: qualitative and quantitative levels of alloying, methods enabling to maintain carbon amount in the matrix basis (eg.: heat-treatment between  $A_1-A_3$ ), maintaining dosed ferrite constituent after heat-treatment at the room temperature, working on the upper bainite, etc.

Much attention has been attached to the techniques and technological processes of obtaining desired shape graphite inclusions. The best proof of this is the original design of the ladles, which simplifies solving difficult tasks.

Reality of „fullerene model“ is proved by our experiments (by overheating of desulphurized cast iron at  $1550^\circ\text{C}$  and fast cooling spheroidal graphite is obtained). Manganese containing multi- and two-component copper-based ligatures (CuMg, CuSiCaMg, Mg=10-12%) are developed and mastered in industry. Also SiCa, CaC<sub>2</sub> and other types of standard compounds (materials) were used during experiments.

The experiments were basically carried out in industry: at „Rustavi Steel“-LTD foundry workshop, central laboratory and on the reellers of unit „400“ at the pipe-rolling plant. Melting was carried out in three and five ton electric arc furnaces (400kg induction furnace was also used in the workshop). According to the dissertation topic 28,05 ton bainitic cast iron was melted and 247 of various sizes mandrels of reeller were cast. The mandrels successfully completed production testings. From the developed alloys 350C2H2ДМФТ bainitic cast iron composition was given to industry. Others are being tested.