

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

პროექტის დასახელება:

ნახშირბადის ნანომილაკების, ნანონაწილაკების,
ნანოდაფებისა და ახალი ნანოკომპოზიციების
მიღების ტექნოლოგია და კვლევა

ნომინაცია (სამეცნიერო-თეორიული):

ანგარიში

(აპრილი – დეკემბერი, 2011)

პროექტის ხელმძღვანელი ელგუჯა ქუთელია _____ (ხელმოწერა);

თბილისი – 2011

ბოლო ათწლეულის განმავლობაში მკვეთრად გაიზარდა ექსპერიმენტული და თეორიული გამოკვლევები რომლებიც დაკავშირებულია ისეთი ახალი ნანოსტრუქტურულ ფორმებთან, როგორებიცაა ნანონაწილაკები, ნანო-მილები და ნანო-მაფები. ამის მიზეზი გახდა ნანო-სტრუქტურების უნიკალური თვისებები, რომლებიც მათი ზომებითა და ატომური სტრუქტურით არის განპირობებული. მათი ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გამოყენება ადამიანის მოქმედების სხვადასხვა სფეროში, მიკროელექტრონიკისა და მედიცინის ჩათვლით, მნიშვნელოვან პერსპექტივას წარმოადგენს.

ნახშირბადის ნანო-ნაწილაკების აღმოჩენის შემდეგ, მათი დოპირების შედეგად მიღებულმა ნანო-კომპოზიციურმა მასალებმა დიდი ინტერესი გამოიწვია, როგორც ფუნდამენტური ასევე მათი პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით. ასეთი მასალები საშუალებას იძლევიან უკეთ გავიგოთ მასალების ფიზიკო-მექანიკური და საერთოდ მისი ფუნქციონალური თვისებების ჩამოყალიბებაში განზომილებისა და ზომების ფუნდამენტური როლი. შესაბამისად, ასეთი მასალები წარმოადგენენ მასალების ახალ კლასს, რომელთაც აქვთ გამოყენებების დიდი პოტენციალი.

ბოლო წლებში ინტერესი გაიზარდა ნახშირბადის ფუძეზე შექმნილი ისეთი მასალების ტექნოლოგიის მიმართ, როგორიცაა ნახშირბადის ნანონაწილაკების დოპირება ფერომაგნიტური და არაფერომაგნიტური ატომებითა და მათი კლასტერებით. ამ თვალსაზრისით, ნახშირბადის მაგნიტური ნანონაწილაკები, რომელთაც აქვთ ე.წ. "core-shell" ("ბირთვი-გარსი") ტიპის სტრუქტურა და ნანო-მილები, რომლებიც ამოვსებულია ლითონის ატომებით, იმსახურებს განსაკუთრებულ ყურადღებას. ეს განპირობებულია მათი უნიკალური ფიზიკო-მექანიკური თვისებებით და მათი გამოყენების შესაძლებლობით ახალი ფუნქციონალური მასალების ტექნოლოგიაში.

მაგნიტური კლასტერების თვითდაფარვა ნახშირბადის ნაჭუჭით ის წარმატებული მაგალითია, რომლის გამოყენება შესაძლებელია სხვადასხვა თანამედროვე მასალებისათვის. მაგალითად, ძლიერი მაგნიტებისათვის, ანალიტიკური

ხელსაწყოებისათვის (ბირთვული მაგნიტური ტომოგრაფი) და ნანოსენსორებისათვის. მეტიც, ნახშირბადის ნანონაწილაკების დაბალი ტოქსიკურობის გამო, მიმდინარეობს მათი ტესტირება თერაპიული და მედიკო-დიაგნოსტიკური მიზნებით.

პიროლიზური ნახშირბადის მიღების ამჟამად გამოყენებული ტექნოლოგიები - თერმული დეგრადაციის გზით გახურებულ, ნახშირბადის შემცველ სუბსტრატზე, კარგად არის ცნობილი. მაგრამ ყველა ეს ტექნოლოგია, დანაფარის წარმოქმნის პროცესში, ხასიათდება რამოდენიმე მნიშვნელოვანი უარყოფითი თვისებით: ზრდის დაბალი სიჩქარე, პროცესის მაღალი ტემპერატურა ($\geq 1300^{\circ}\text{C}$), დანაფარის სტრუქტურის არასაკმარისი სრულყოფილება, დოპირების ერთ ციკლში ჩატარების შეუძლებლობა.

შესაბამისად, წარმოდგენილი სამუშაოს მიზანი იყო რკინის ატომების კლასტრებით დოპირებული ნახშირბადის ნანოფხვნილის ნანონაწილაკების შემადგენლობის, მორფოლოგიისა და ზომების კომპლექსური შესწავლა ისეთი თანამედროვე ანალიტიკური მეთოდებით, როგორებიცაა: მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (მემ), ოჟე-ელექტრონული სპექტროსკოპია (ოეს) და ენერგო-დისპერსული რენტგენული სპექტროსკოპია (ედრ).

ექსპერიმენტული დანადგარის დამუშავება და აწყობა ნახშირბადის ნანომილაკების, ნანოძაფებისა და მათი დოპირებული ნანოკომპოზიციების მიღების მიზნით

სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკურ ცენტრში ნახშირბადის ნანოფხვნილებისა და მათი დოპირებული ნანოკომპოზიციების და დანაფარების ახალი ტექნოლოგიური ლაბორატორიის შექმნა მიმდინარეობს. შესაბამისად, ნახშირბადის ნანომილაკების, ნანონაწილაკების, ნანოძაფებისა და მათი დოპირებული ნანოკომპოზიციების მიღების ჩვენს მიერ შემუშავებული მარტივი ტექნოლოგიური ციკლიზე დაფუძნებით დამუშავდა და შეიქმნა ექსპერიმენტული დანადგარი. ტექნოლოგიური ციკლი ხორციელდება ეთილის სპირტის (და სხვა

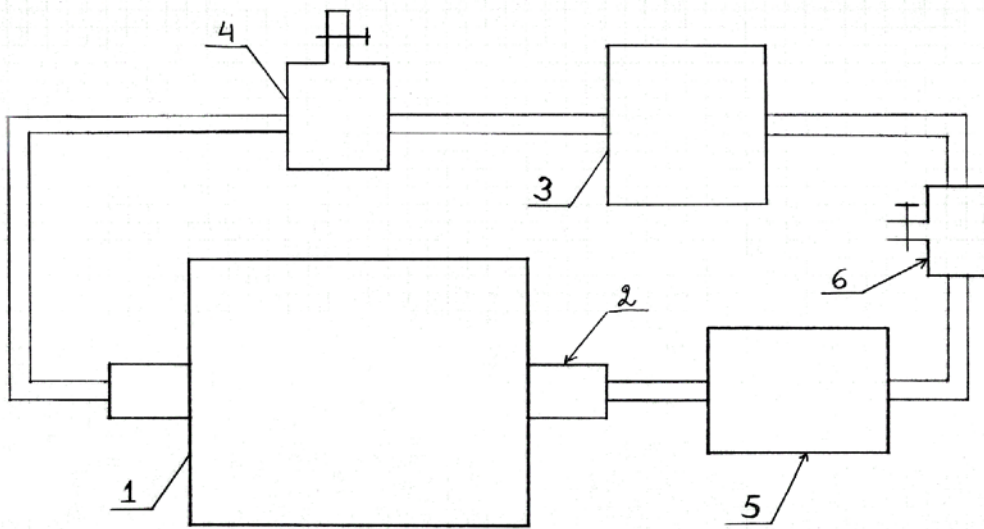
ნახშირბადწყალბადების) ორთქლის პიროლიზისა და CVD – პროცესის კომბინაციით, რეცირკულაციური ჩაკეტილი ციკლის რეჟიმში, კონტროლირებული ტექნოლოგიური პარამეტრების პირობებში.

ნახშირბადის ნანომასალების მისაღები ექსპერიმენტული დანადგარი

დანადგარი შედგება შემდეგი ძირითადი ელემენტებისგან (იხ. გამარტივებული პრინციპული სქემა): 1. სილიტის ღუმელი, 2. რეაქტორი 3.კომპრესორი, 4. ჰერმეტიკი ჭურჭელი, 5. ფილტრი და 6.სარქველი.

1. სილიტის ღუმელი, რომლის დანიშნულებაცაა რეაქტორში საჭირო ტემპერატურის დამყარება. 2. რეაქტორი , რომელიც წარმოადგენს კვარცის ან კერამიკის მილს. მასში მიმდინარეობს ნანომასალების მისაღები ფიზიკო-ქიმიური რეაქციები.

3. კომპრესორის საშუალებით ხდება ჩაკეტილ კონტურში აირების წნევის რეგულირება. 4. ჭურჭლიდან ხდება რეაქტორში სპირტის ორთქლის მიწოდება. სპირტის ორთქლის რაოდენობისა და გადაადგილების სიჩქარის რეგულირება ხორციელდება, როგორც სპირტის სვეტის ცვლილებით, ასევე 3.კომპრესორის სიმძლავრის რეგულირებით.



დანადგარის პრინციპული სქემა

5. ფილტრის დანიშნულებაცაა აირების გასუფთავება ტექნიკური ნახშირბადისაგან რათა არ მოხდეს კომპრესორის დაზიანება.

6. სარქველის დანიშნულება :

- ა) ჭარბი წნევების დროს არ მოხდეს სისტემის ჰერმეტიკულობის დარღვევა
- ბ) წარმოქმნილი აირების ატმოსფეროში გაფრქვევა
- გ) აირების შეგროვება შემდგომი ანალიზისათვის.

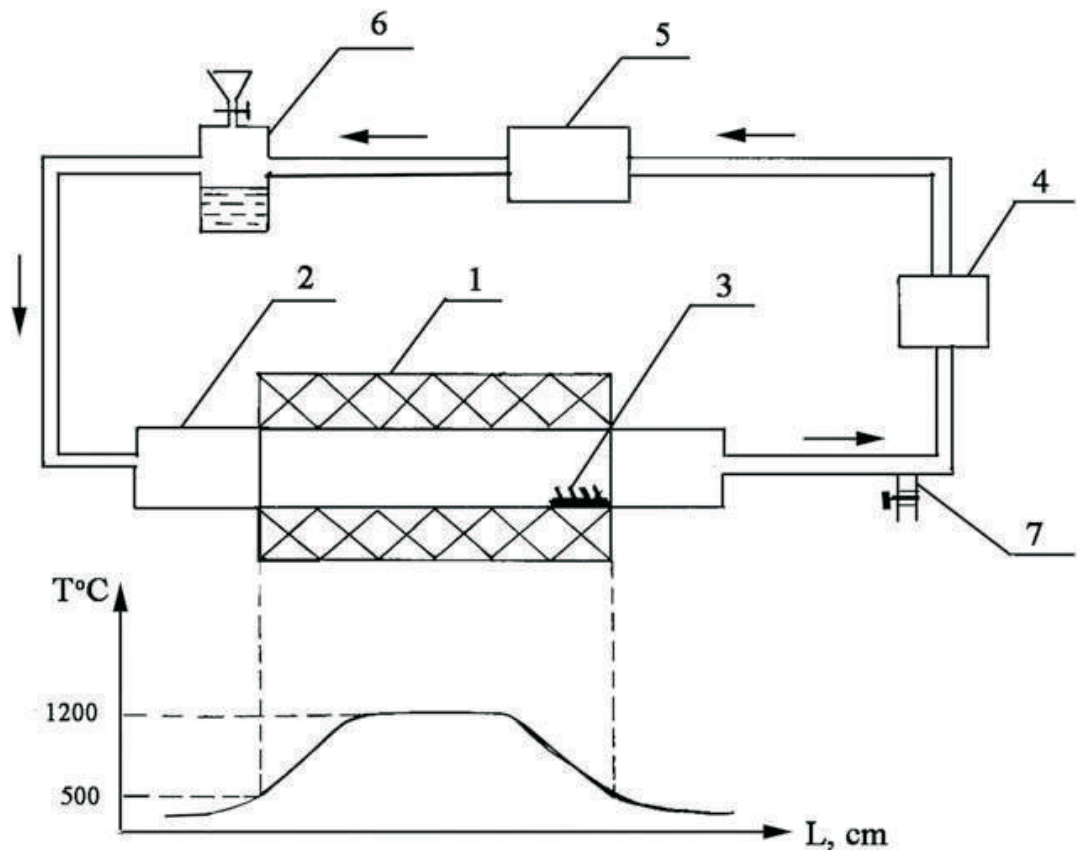
როგორც აღმოჩნდა სპირტის ინჟექციით და გახურებით იცვლება აირებში ჟანგბადის პარციალური წნევა P_{O_2} . P_{O_2} უკუპროპორციულია ტემპერატურისა და 1200°C -ზე $P_{O_2} \approx 10^{-26}$ ატმ. ასეთ პირობებში შესაძლებელია ლითონების ჟანგეულებიდან მივიღოთ სუფთა ლითონები და კარბიდები. მაღალ ტემპერატურებზე რეაქტორის ცენტრალურ ნაწილში სპირტის ორთქლის გარკვეული რაოდენობისა და სიჩქარის პირობებში შესაძლებელია ნახშირბადის ნანომილაკების, ხოლო შედარებით ცივ ზონაში მაგნიტური ნახშირბადის ფორმირება. ნახშირბადის ნანონაწილაკების და ნანო-მიკრო ძაფების მიღებისა და მათი დოპირების ოპტიმალური ტექნოლოგიური პარამეტრების შერჩევა მოხდა მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტების საფუძველზე და დადგენილი იქნა რომ:

ფერომაგნიტური კლასტერებით დოპირებული ნახშირბადის სინთეზი ხდება $500 - 700^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტევალში. ამ დროს მასაში დაიმზირება ნახშირბადის ნანომილაკები. აღმოჩნდა, რომ ფერომაგნიტური კლასტერების ზომა დამოკიდებულია სპირტის ორთქლის მიწოდების სიჩქარესა და რაოდენობაზე. ასევე დადგინდა, რომ კლასტერების ზომები უკუპროპორციულია მათი მაგნიტური თვისებებისა.

ახალი, სინთეზირებული მასალების, რკინის ატომების კლასტერებით დოპირებული ნახშირბადის ნანონაწილაკების, მორფოლოგიურ-სტრუქტურულმა გამოკვლევამ აჩვენა, რომ ნახშირბადის მაგნიტური ნანოფხვნილი წარმოადგენს ნანოკომპოზიტს, რომელიც შედგება ნახშირბადის სფერული ნანონაწილაკებისაგან და ნანომილებისაგან. გამოკვლევები ჩატარებული იყო მასკანირებელი ელექტრონული, მიკროსკოპის, ენერგოდისპერსული რენტგენული სპექტროსკოპიისა და ოჟე-სპექტროსკოპიის გამოყენებით. ნახშირბადის სფერული ფორმის ნანონაწილაკების დაახლოებით 200 ნანომეტრის (ნმ) ტოლი დიამეტრი აქვთ, ხოლო ნანომილებს

≤ 200 ნმ დიამეტრი და საშუალოდ 1μ ტოლი სიგრძე. ნახშირბადის ნანონაწილაკებს აქვთ "core-shell" ტიპის სფერული სტრუქტურა, რომლის გულს სუფთა რკინის ატომთა კლასტერები ქმნიან. ნახშირბადის ნანომილების შემთხვევაში კი რკინის ატომებისაგან შედგენილი კლასტერები ძირითადად მილის ერთ ბოლოში არიან კონცენტრირებული, ზუსტად მილის შესასვლელთან. რკინის კონცენტრაცია ნახშირბადის ნანოფხვნილებში უდრის 2.1ატ%.

რკინის ატომების კლასტერებით დოპირებული მაგნიტური ნახშირბადის ნანოფხვნილის სინთეზი ხორციელდებოდა მექანიკურად პოლირებული რკინის საფენის ზედაპირზე, რომელიც მოთავსებული იყო ექსპერიმენტული დანადგარის ჰორიზონტულ, უწყვეტ რეაქტორში 700°C ტემპერატურაზე. სინთეზი მიმდინარეობდა ძირითადი რეაგენტების რეცირკულაციის რეჟიმში, რომლებიც ეთანოლის პიროლიზის პროდუტებს წარმოადგენენ.

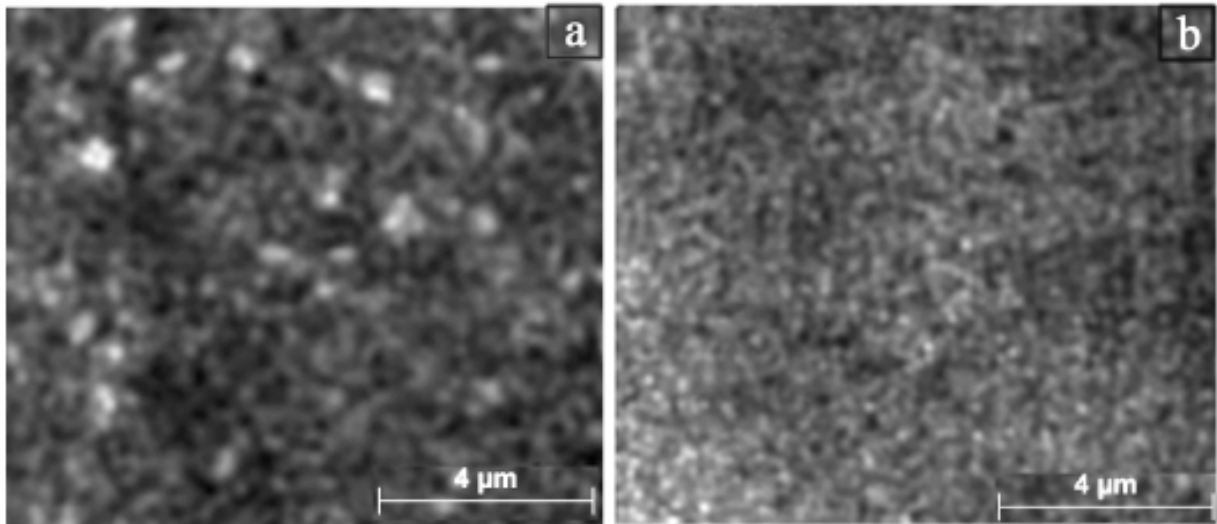


ნახ. 1. მაგნიტური ნანოფხვნილების მიღების ტექნოლოგიური სქემა. 1-ჰორიზონტული მილისებრი ღუმელი. 2-რეაქტორი. 3-რკინის ან კობალტის

ბრტყელი, ფირფიტისებრი კატალიზატორი. 4-კომპრესორი. 5-ჟანგბადის ტუმბო მანომეტრით. 6-ეთანოლის კონტეინერი. 7-სარქველი.

ნახ.1-ზე ქვედა ნაწილში ნაჩვენებია რეაქტორში ტემპერატურის განაწილების სქემა.

სინთეზის განსახორციელებელი დანადგარი ჩაკეტილ კვანძს წარმოადგენს, რომლის ნიმუშების ანალიზმა მასკანირებელ ელექტრონულ მიკროსკოპში (მემ) აჩვენა, რომ ნანოფხვნილი წარმოადგენს ორი სხვადასხვა ტიპის ნანონაწილაკების ნარევს. კერძოდ, ნანო ზომის გრანულებისა და ნანომილების ნარევს. ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია გრანულირებული ნანონაწილაკების ფრაქცია მაგნიტური ნხშირბადის ნანოფხვნილში.

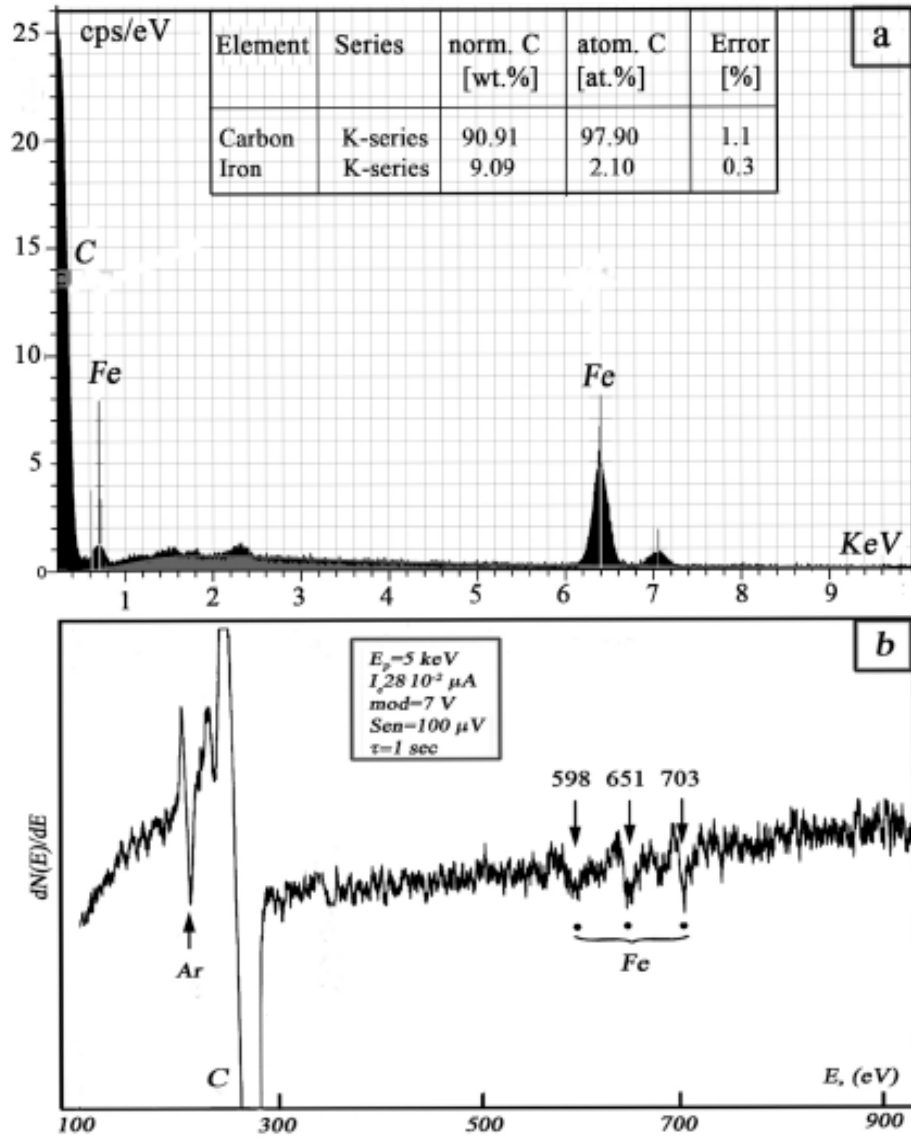


ნახ. 2. მემ გამოსახულებები გრანულირებული ნანონაწილაკების ფრაქციისა მაგნიტური ნხშირბადის ნანოფხვნილში, რომელიც დოპირებულია რკინის ატომების კლასტერებით და სინთეზირებულია 700°C ტემპერატურაზე. a) გამოსახულება მიღებულია ეთდროულად რკინისა და ნახშირბადის $K\alpha$ გამოსხივებაში.

b) გამოსახულება მიღებულია მხოლოდ ნახშირბადის $K\alpha$ გამოსხივებაში.

სინთეზირებული ნიმუშების შემადგენლობა, ქიმიური ბმის ტიპი ლითონის ატომთან და ნანონაწილაკებზე წარმოქმნილი ფენის სისქე განისაზღვრა ენერგო-დისპერსული რენტგენული (ედრ) და დიფერენციალური ოჟე-ელექტრონული (ოე) სპექტრების საშუალებით. ფენობრივი ანალიზი ტარდებოდა 1KeV ენერგიის არგონის ატომებით ბომბარდირების საშუალებით, რაც განაპირობებდა 10Å სისქის ატომური ფენების მოხსნას 1 წუთის განმავლობაში. ნახ. 3. ა)-ზე მოცემულია 700°C ტემპერატურაზე

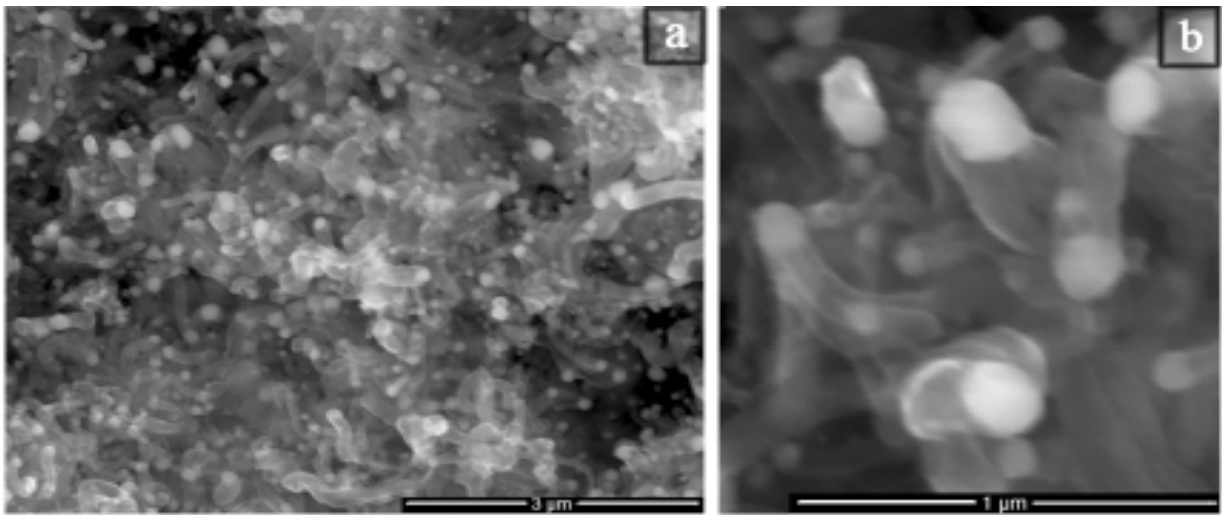
დოპირებული მაგნიტური ნანო-ფხვნილის ედრ-სპექტრი. ჩანს მხოლოდ ნახშირბადისა და რკინის შესაბამისი პიკები.



ნახ. 3. a) ედრ-სპექტრი ნაჩვენებია ნიმუშის შემადგენლობის ქიმიური ანალიზის რეზულტატებთან ერთად. b) რკინის ატომების კლასტერებით დოპირებული 700°C ტემპერატურაზე სინთეზირებული მაგნიტური ნახშირბადის ფხვნილის ოქე-სპექტრი.

ნიმუშების ქიმიურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ ნახშირბადის დოპირებული ნანო-ნაწილაკები შეიცავენ 2.1 ატ% რკინას. ედრ-სპექტრების ანალიზის საშუალებით

დადგინდა, რომ ნანონაწილაკებში ელემენტები განაწილებულია ე.წ. core-shell ("გული-ნაჭუჭი") სტრუქტურის სახით. იგივე დასტურდება ნიმუშების არგონის ატომებით 60-წუთიანი ბომბარდირების შემდეგ მიღებული ოჟე-სპექტრებითაც (ნახ. 3.ბ). ნიმუშების არგონის ატომებით ბომბარდირებამდე (რომელიც შეიცავდა 3 nm სისქის, ატმოსფეროდან ადსორბირებულ, ფენას) მიღებული სპექტრი შეიცავდა მხოლოდ ნახშირბადის ატომებში $K L_{2,3} L_{2,3}$ ოჟე-გადასვლის პიკებს და ძალიან დაბალი ინტენსივობის, ჟანგბადისა და ატმოსფეროდან ადსორბირებული სხვა აირების ატომების შესაბამის პიკებს. დაახლოებით 60 nm სისქის ფენის მოხსნის შემდეგ მიღებული ოჟე-სპექტრი იგივე ნიმუშიდან, შეიცავს მხოლოდ რკინის ატომში სამმაგი L_{3VV} ოჟე-გადასვლის პიკებს ნახშირბადის ატომის შესაბამის პიკებთან ერთად. ეს მიუთითებს იმას, რომ ნახშირბადის ნანო-ნაწილაკების "გულები" და ნანო-მილების ბოლოები (ნახ. 4) წარმოადგენენ დაუჟანგავი რკინის ატომების კლასტერებს.



ნახ. 4. 700°C ტემპერატურაზე, რკინის კლასტერებით დოპირებული ნახშირბადის ნანოფხვნილის, ნანომილების ფრაქციის მემ გამოსახულებები სხვადასხვა გადიდებით.

ამგვარად, ზემოთაღნიშნული შემადგენლობის ნახშირბადის დოპირებული ნანოფხვნილის ნანონაწილაკების ფორმირების მექანიზმი თანხვედრაშია იმ ზოგად მოდელთან, რომელიც დადგენილია ლითონური კატალიზატორის თანხლებით ორთქლის თერმულ-ქიმიური ტრანსპორტის პირობებში ნახშირბადის ნანონაწილაკებისა და ნანო-მილაკების ფორმირებისათვის.

პერსპექტიულობის თვალსაზრისით, ნახშირბადის ბაზის დოპირებული ნანოკომპოზიციების გამოყენების სფეროებისა და პერსპექტივების კვლევამ აჩვენა, რომ მაგალითად, მაგნიტური ნახშირბადის დამატება პოლიმერულ მასალებში აუმჯობესებს მის ცვეთამდეგობას და ზრდის ექსპლოატაციის დროს.

აღსანიშნავია, რომ ბოლო წლებში დიდი ყურადღებას იპყრობს მაგნიტური კლასტერებით დოპირებული მასალები კოსმოსური საფრენი აპარატების მასალების ტექნოლოგიაში. ეს მასალები განიცდიან დიდი ტემპერატურული გრადიენტის, რადიაციის, ელექტრული განმუხტვებისა და მიკრომეტეოროიდების იმპულსურ ქმედებებს. წამყვანი ქვეყნების სხვადასხვა ლაბორატორიებში (იხ. პროექტის ფარგლებში გამოქვეყნებული ნაშრომი [1]) ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ მაღალი საექსპლოატაციო მახასიათებლიანი კომპოზიციური მასალების შესაქმნელად დიდი პერსპექტივა აქვს, სწორედ ნანოსტრუქტურულ მასალებს და კონკრეტულად კი, ისეთებს, რომლებშიდაც ფორმირდებიან ნანონაწილაკების ჯაჭვები და ბადეები, რაც თავისთავად მნიშვნელოვანი მოთხოვნაა მრავალფუნქციური ნანომასალების წარმოებისათვის. ამგვარად, მაგნიტური ველის გამოყენება ნანომასალების წარმოებისათვის არის ახალი და პერსპექტიული მეთოდი, გამოყენებათა ფართო არეალით.

ახალი ნანოკრისტალური მცირევოლფრამიანი TiC-Ni-Mo-W სალი შენადნობების ნანოფხვნილების მიღება

საყოველთაოდ ცნობილია, რომ სალი შენადნობების მიღება ხორციელდება ფხვნილთა მეტალურგიის მეთოდით. წარმოების ტექნოლოგია ითვალისწინებს კომპონენტთა ფხვნილების მიღებას, სალი შენადნობების კაუმის მომზადებას, ფორმირებას, შეცხოებას და კონტროლს. სალი შენადნობების დამზადების ერთერთი მნიშვნელოვანი ეტაპი ფხვნილის მომზადებაა. ჩვენს მიერ შემუშავებული იქნა ახალი თექნოლოგია სალიშენადნობების ფხვნილის მომზადებისა. მიუხედავად იმისა, რომ მოდიფიცირებული ტექნოლოგია, აერთიანებს რა დაწვრილმარცვლოვნების და პლასტიფიცირების ოპერაციებს, მნიშვნელოვნად ამარტივებს ტექნოლოგიას და იწვევს საბოლოო პროდუქტის თვისებების გაუმჯობესებას, პლასტიფიკატორის თანაბარი განაწილებისა და ფხვნილთა მარცვლების დაჟანგვისაგან დაცვის გამო, იგი მაინც ვერ აღმოფხვრის იმ პრობლემას, რომელიც დაკავშირებულია ფხვნილთა დაწვრილმარცვლოვნება-შერევისთან. როგორც ცნობილია, სალი შენადნობები შესდგება სალი შემადგენელი ნაწილისაგან (კარბიდები, ბორიდები, ნიტრიდები, ოქსიდები და ა.შ.) და შემაკავშირებელი მეტალისგან. სალი შემადგენელი ნაწილი მყიფე მასალებია და ისინი დაწვრილმარცვლოვნებისას, განიცდიან რა მყიფე მსხვრევას, ღებულობენ ნანოზომებს. შემაკავშირებელი მეტალები კი როგორც პლასტიური მასალები, პლასტიური დეფორმაციის შედეგად დაწვრილმარცვლოვნებისას ღებულობენ ფოთლის მაგვარ ფორმებს. მართალია მიღებული ნაწილაკების სისქე ნანოზომებისაა, მაგრამ მათი ორი დანარჩენი ზომა ისევ მიკრონის რიგის რჩება და ცხადია სალ შენადნობთა კომპონენტების შერევისას მათ თანბარ განაწილებაზე ლაპარაკი ზედმეტია.

სალი შენადნობების ნანოკრისტალური ფხვნილების მიღების შემუშავებული ტექნოლოგიის პირველ ეტაპზე მიიღებოდა ფხვნილები ჭარბი თავისუფალი

ნახშირბადით. შენადნობთა მისაღებ საწყის მასალებში ნახშირბადის შემცველობის შემცირება არ იძლეოდა სასურველ შედეგს, ვინაიდან ადგილი ჰქონდა ოპტიმალური სტრუქტურის დარღვევას. წარმოქმნებოდა არასასურველი რთული კარბიდები და ინტერმეტალიდები. მეორეს მხრივ, აღმოჩნდა, რომ ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადი ხელს უშლის მარცვლების ზრდას და ჩვეულებრივი ტექნოლოგიითაც კი შესაძლებელია შეცხოვრილი სალი შენადნობის მიღება ნანოკრისტალური სტრუქტურული მდგომარეობით. ასეთი შენადნობების მახასიათებლები სტანდარტულ შენადნობთა რიგის იყო. ნანოკრისტალურობით გამოწვეულ მახასიათებლების გაზრდას თან სდევდა ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადით გამოწვეული მახასიათებლების შემცირება. ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ შესაძლებელია საწყის კომპონენტებში ნახშირბადის რაოდენობის შემცირება ოპტიმალურამდე და მიუხედავად კაზმში არსებული რთული კარბიდებისა და ინტერმეტალიდებისა, ჩვენს მიერ შემუშავებული ნაპერწკალურ პლაზმური სინთეზის (ნპს) მოწყობილობის გამოყენებით მიიღება ნორმალური სტრუქტურის სალი შენადნობები.

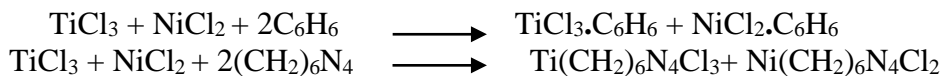
ჩვენს მიერ შემუშავებული ტექნოლოგია და მოწყობილობა ასევე იძლევა პრობლემის გადაწყვეტას ტიტანის კარბიდის ფუძის მქონე სალი შენადნობებისათვის. აქაც საჭიროა საწყის კაზმში ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადის შეყვანა, ვინაიდან სიმცირე იწვევს არასასურველი ფაზების წარმოქმნას. ზედმეტი ნახშირბადი ჩვეულებრივი შეცხოვრისას ხელს უშლის შეცხოვრის პროცესს. არასასურველი ფაზები კი ამცირებს შენადნობთა მახასიათებლებს. ნპს მოწყობილობის გამოყენება იძლევა ოპტიმალურ შენადნობებს (ნახ. 5, 6 და 7). ცხადია ნორმალური სტრუქტურის ნანოფხვნილისგან ნორმალური სტრუქტურის სალი შენადნობი მიიღება (ნახ.8).

ვინაიდან სალი შენადნობების სალი შემადგენელი კომპონენტის დაწვრილმარცვლოვნება შესაძლებელია ნანოზომებამდე, სასურველი შედეგი შესაძლებელია მოგვცეს დაწვრილმარცვლოვნებული ფხვნილის დაფარვამ

შემაკავშირებელი კომპონენტით. თუ კი მოხერხდება ნანოკრისტალური დანაფარების მიღება, მაშინ საშუალება გვექნება მთლიანობაში მივიღოთ ნანოკრისტალური სალი შენადნობების ფხვნილები. დაფარვის ერთ-ერთი გავრცელებული მეთოდია ქიმიური დაფარვა. ამ მეთოდის გამოყენებისას საჭიროა დასაფარ მასალის წინასწარი მომზადება: ზედაპირის გასუფთავება და გააქტიურება. აგრეთვე დაფარვის დროს კატალიზატორის და აღმდგენელი ქიმიური ნაერთის გამოყენება. როგორც გამოკვლევებმა გვიჩვენეს, სალი შენადნობების სალ კომპონენტებს გააჩნიათ კატალიზატორული თვისებები და დამატებით ძვირადღირებული კატალიზატორების გამოყენებას არ საჭიროებენ. არ არის ასევე საჭირო ფხვნილთა დამატებითი გასუფთავება და გააქტიურება. კვლევებისას ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო სხვადასხვა ტიპის აღმდგენელები. სხვადასხვა აღმდგენელების გამოყენებით მიღებული სალი შენადნობის კაზმის ელექტრონული მიკრო-ფოტოგრაფიები. სურათებიდან ვიზუალურად ჩანს, რომ მიიღება საკმაოდ კარგი დანაფარები როგორც ნატრიუმის ჰიპოფოსფიტისა და ჰიპოსულფიტის ასევე გოგირდმჭავა ჰიდრაზინისა და შაქრის გამოყენებით. მიუხედავად იმისა, რომ დაფარვის პროცესის დროს გამოიყენებოდა საკმაოდ დაბალი ტემპერატურები (50-70°C), რიგ შემთხვევებში გამწვანებული იყო ნანოკრისტალური დანაფარების მიღება. როგორც შემდგომმა გამოკვლევებმა გვიჩვენეს, ასეთი კაზმისგან მიღებული შეცხოვნილი სალი შენადნობები არ გამოირჩევიან მაღალი მახასიათებლებით. აღმოჩნდა, რომ დაფარვისას შემაკავშირებელ კომპონენტს თან მისდევდა მინარევები, ძირითადად აღმდგენელისგან, ფოსფორი, გოგირდი, ბორი, ნახშირბადი და სხვა. ეს მინარევები მასიური ნამზადების ზედაპირული დანაფარებისათვის მავნე არ არის, მაგრამ სალი შენადნობებისათვის მიუღებელი აღმოჩნდა. ამრიგად, როგორც ვხედავთ, აღნიშნული ტექნოლოგიები ვერ იძლევა სასურველ შედეგებს. ამ ტექნოლოგიებით მიღებული სალი შენადნობები ხასიათდებიან შედარებით მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურით (რამოდენიმე მიკრონის რიგის) ამიტომ შემუშავებული იქნა ახალი ტექნოლოგია ნანოკრისტალური სალი შენადნობების ფხვნილის მისაღებად. ეს მეთოდი ეფუძვნება თერმოქიმიურ სინთეზს. ცხადია, რომ დისპერსიული სისტემის მიღებისათვის

საჭიროა დაბალტემპერატურული სინთეზის ჩატარება. ასეთი სინთეზი შესაძლებელია განხორციელდეს შესაბამისი ქიმიური ნაერთების მიღებით (ქიმიური სინთეზი) და მათი შემდგომი პიროლიზით (თერმული სინთეზი). კაზმის მიღების ამ ეტაპის შემდეგ სალი შენადნობის მიღების ტექნოლოგიური სქემა ანალოგიურია სტანდარტულისა მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ამ დროს აღარ არის საჭირო კაზმის დამატებითი პლასტიფიცირება, ვინაიდან ნანოკრისტალური შემაკავშირებელი სალი შენადნობისა ხელს უწყობს წნეხადობას. ქიმიური სინთეზი შედარებით მარტივად მიმდინარეობს შესაბამისი ქლორიდების გამოყენებისას. შესაძლებელია ჟანგბადიანი ნახშირწყალბადების გამოყენებაც ტიტანის კარბიდის ფუძის მქონე სალი შენადნობების მიღების გარდა. თუ კი კარბიდული მასალების მათ მისღებ საწყის მასალებს დაუმატებთ სალი შენადნობების შემაკავშირებლის შესაბამის ქიმიურ ნაერთებს, მაშინ კარბიდებთან ერთად მიიღება მეტალური ნაერთებიც და ამრიგად მზად გვექნება სალი შენადნობების ნანოკრისტალური ფხვნილი. ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შესაძლებელია მივიღოთ Ti, Mo, W, Ni მეტალოორგანული და კომპლექსური ნაერთები, შესაბამისი რეაგენტების ხსნარებისა და ნალღობების გამოყენებით. მიღებული ნაერთები რენტგენოამორფულები არიან. ამიტომ ცალსახად მტკიცება ამათუ იმ ნაერთების წარმოშობისა საკმაოდ რთულია. წარმოქმნილი ნაერთის შესახებ ვმსჯელობთ რეაქციის თანმდევი პროცესებისა და ელემენტური ანალიზის მიხედვით. ვიყენებთ აგრეთვე დერევატოგრაფიულ და სპექტრალურ ანალიზს. მიღებული ნაერთების ვარგისიანობის შესახებ უტყუარ პასუხს იძლევა მათი თერმოსინთეზი. სალი შენადნობის კაზმი უნდა შეიცავდეს ვოლფრამის კარბიდის, მოლიბდენის კარბიდის, ტიტანის კარბიდის ან ტიტან-მოლიბდენ-ვოლფრამის რთული კარბიდების და ნიკელის ნანოფხვნილებს. ერთერთი მეთოდი კარბიდების მიღებისა იყო კარბოცენური პოლიმერების (ზოგადი ფორმულა $(-CH_2-CRH-)_n$) გამოყენება. შესაბამის ნახშირწყალბადოვან გამხსნელში გახსნილ პოლიმერს ემატებოდა სალი შენადნობის სალი კომპონენტის შესაბამისი ნაერთი. მაგალითად, ტიტანის კარბიდისათვის $TiCl_3$, $TiCl_4$, $(NH_4)_2TiF_6$, ხოლო ვოლფრამის კარბიდისათვის WCl_6 , მოლიბდენის კარბიდისათვის კი $MoCl_5$. შემდგომ

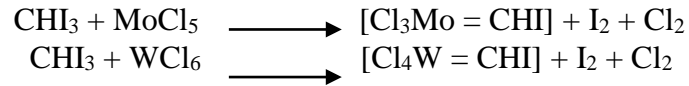
შემაკავშირებლისათვის ემატებოდა NiCl_2 . ასევე წარმატებული აღმოჩნდა მხოლოდ გამხსნელის გამოყენებაც. ვინაიდან ორგანული გამხსნელები, შეიცავენ რა ნახშირბადს საკმაო რაოდენობით, იძლეოდა საშუალებას სრულყოფილი კარბიდის წარმოქმნისა. ხსნარში NiCl_2 , დამატება შემდგომი გამოწვით უკვე ნანოკრისტალურ სალი შენადნობის ფხვნილს იძლევა. ნანოკრისტალური ფხვნილები მიღებული იქნა აგრეთვე აცეტილენ შემცველი ნახშირწყალბადების (ფენილაცეტილენი, მეთილაცეტილენი, პენტინ-1, გექსინ-1) გამოყენებით. ცხადია აქაც სალი შენადნობის ფხვნილის მისაღებად საჭირო იყო სარეაქციო არეში დამატებით ხსნარში NiCl_2 შეყვანა და ამოშრობის შემდეგ მიღებული მასის დაბალტემპერატურული პიროლიზი. ტიტანის და ნიკელის ქლორიდების შესაბამისად ბენზოლთან და უროტროპინთან ურთიერთქმედებით მიღებული კომპლექსური ნაერთების პიროლიზი 800°C ტემპერატურაზე იძლევა საშუალებას TiC-Ni სისტემის სალი შენადნობების ნანო ფხვნილების წარმოქმნისა.



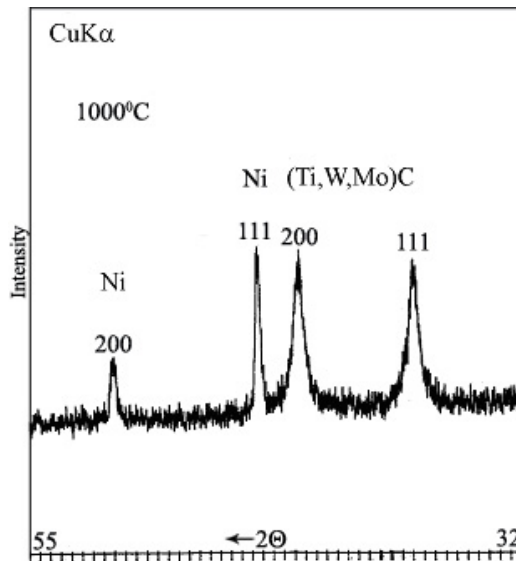
ასევე შესაძლებელია ნანოკრისტალური ფხვნილების მიღება ტიტანის ტეტრაქლორიდის, ნიკელის ქლორიდისა და ამინების ურთიერთქმედებით.



ჩვენს მიერ მიღებული იყო მეტალოორგანული ნაერთები იოდოფორმის ურთიერთქმედებით მოლიბდენის პენტაქლორიდთან და ვოლფრამის ჰექსაქლორიდთან $100-110^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე. ცხადია სარეაქციო არეში ნიკელის, რკინის ან კობალტის ქლორიდის დამატება შესაძლებლობას გვაძლევს მივიღოთ კაზმი სალი შენადნობების ნანოფხვნილების.



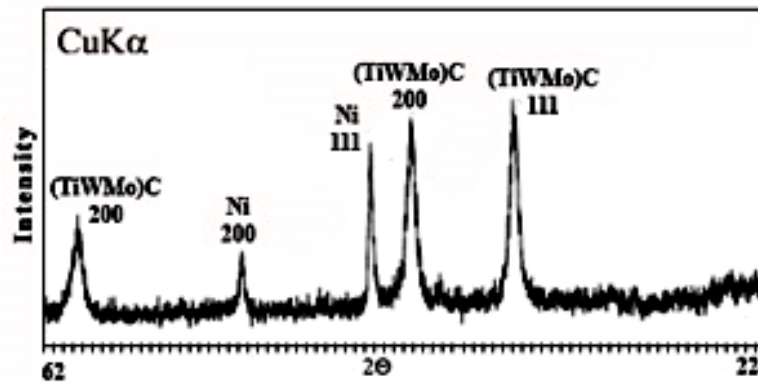
რენტგენოდიფრაქციული კვლევა მიღებული ნანოფხვნილებისა ადასტურებს, რომ რეალურად არის შესაძლებელი, სალი შენადნობის კომპონენტა ჩვენს მიერ ქიმიურად სინთეზირებული კომპლექსური ნაერთების თერმოსინთეზით, სალი შენადნობების ნანოკრისტალური ფხვნილების წარმოქმნა. კომპლექსური ნაერთების ქიმიური სინთეზი შესაძლებელია არა მარტო ხსნარების გამოყენებით არამედ შესაბამისი ნაერთების ნაღობების გამოყენებითაც. ერთერთ საინტერესო შემადგენლობას წარმოადგენს $\text{TiH}_2 - \text{NiCl}_2 - \text{WO}_3 - \text{MoO}_3 - \text{C}$ (საჟა) ნარევი. მისი თერმოსინთეზი იძლევა $(\text{Ti,W,Mo})\text{C-Ni}$ სისტემის სალი შენადნობის ნანოფხვნილს (სურ.1). დიფრაქტოგრამა გვიჩვენებს, რომ წარმოქმნილი ფხვნილი ორფაზიანია.



სურ. 1. ტიტანის კარბიდის ფუძის მქონე ნანოკრისტალური სალი შენადნობის ფხვნილის რენტგენოდიფრაქტოგრამა.

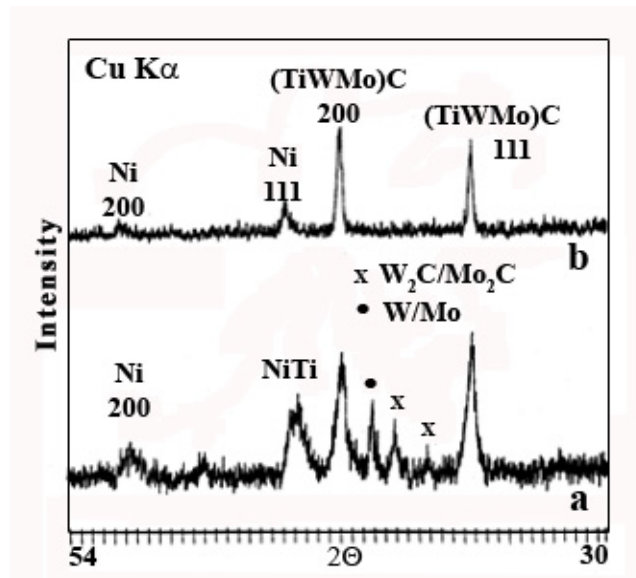
ერთი ფაზა ტიტან-მოლიბდენ-ვოლფრამის რთული კარბიდია, ხოლო მეორე ფაზა კი ნიკელს წარმოადგენს. დიფრაქციული მაქსიმუმების გაგანიერება მიუთითებს ფხვნილის ნანოკრისტალურობაზე. სურ.2-ზე ნაჩვენებია რენტგენოდიფრაქტოგრამა

მექანო-ქიმიური მეთოდით სინთეზირებული სალი შენადნობის ნანოფხვილისა. ბურთულოვანი წისქვილის სარეაქციო არეში მოთავსებული იყო სუფთა მეტალები და საჟა შესაბამისი თანაფარდობით $Ti:W:Mo:C = X:Y:Z:Q$. სინთეზირების პროცესი დასრულებისათვის სჭირო იყო რამოდენიმე ათეული საათი.



სურ.2. რენტგენოდიფრაქტოგრამა მექანო-ქიმიური სინთეზით მიღებული $(Ti,Mo,W)C-Ni$ ტიპის სალი შენადნობის ნანოკრისტალური ფხვილისა.

ნანოკრისტალური სალი შენადნობების ფხვილების მიღებისათვის საჭიროა ოპტიმალური ტექნოლოგიური რეჟიმების დაცვა, წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი



სურ.3. რენტგენოდიფრაქტოგრამები $(Ti,Mo,W)C-Ni$ სალი შენადნობის ნანოკრისტალური ფხვილებისა დარღვეული (a) და ნორმალური სტრუქტურით (b).

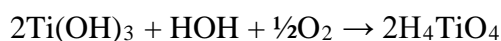
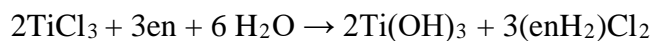
აქვს დამატებითი ფაზების წარმოქმნას, რასაც შენადნობთა მახსითებლების გაუარესებასთან მივყავართ. საილუსტრაციოდ იხილეთ რენტგენული დიფრაქტოგრამები (სურ. 3).

TiC, TiC-TiB₂-TiN, TiC-TiB₂ და TiC-TiN ნანოკრისტალური ფხვნილების მიღება

ცნობილია, რომ სტანდარტული ტექნოლოგია კარბიდული მასალების მიღებისა ითვალისწინებს შესაბამისი მეტალების ან მათი ჟანგეულების ნახშირბადთან ურთიერქმედებას. მაგრამ ეს პროცესი საკმაოდ მაღალ ტემპერატურაზე მიმდინარებს. ამიტომაც, სინთეზირებული მასალები მსხვილკრისტალური არიან. ცხადია, ნანოფხვნილების მისაღებად საჭიროა სინთეზირების დაბალი ტემპერატურების გამოყენება. ასეთი რამე შესაძლებელი იქნება თუ მოვახერხებთ შესაბამისი მეტალების ნახშირბადშემცველ რთული კომპლექსური ნაერთების მიღებას და შემდგომ მათ დაბალტემპერატურულ პირობებში. სტრუქტურულად და მორფოლოგიურად ერთგვაროვანი კარბიდების მისაღებად საჭიროა, რომ მეტალთა და ნახშირბადის ატომები თანაბრად იყოს განაწილებული შიხტაში. ატომთა ძალზე კარგი თანაბარი განაწილება შეიძლება მოვახერხოთ სითხეებში. ამიტომაც, ნანოკრისტალური კარბიდების მიღების ერთერთ მეთოდად შერჩეული იქნა სისტემა მეტალის ქლორიდი-პოლიმერი-გამხსნელი. აქ მთავარი პრობლემაა მოძებნა მეტალის ქლორიდისა და პოლიმერის საერთო გამხსნელისა. ასეთ სისტემის გამოყენების დროს შესაბამისი მეტალის ნაერთი თანაბრად ნაწილდება პოლიმერის ხსნარში და როდესაც მოვახდენთ ხსნარის ამოშრობას, მეტალის ნაერთი მოლეკულარულად მაგრდება პოლიმერის გელში. მიღებული მასის პირობების დროს, 200-900°C ტემპერატურაზე, პოლიმერის აქტიური ატომები შედიან რეაქციაში მეტალთა ქლორიდებთან და შედეგად წარმოქმნება დაბალტემპერატურული კარბიდები. ჩვენ ძირითადად ვიყენებდით კარბოცენურ პოლიმერებს, რომელთა ზოგადი ფორმულა გამოისახებოდა (-CH₂-CRH-)n სახით. გამხსნელებად კი ვიყენებდით დიქლორეთანს,

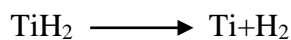
დიოქსანს, ქსილოლს, ბენზოლს, ეთილაცეტატს, დიმეთილფორმამიდს, სპირტს და სხვა. ტიტანის ნაერთებად ექსპერიმენტებში გამოყენებული იქნა ტიტანის ქლორიდები $TiCl_3$, $TiCl_4$ და ამონიუმის ჰექსაფტორიდი $(NH_4)_2TiF_6$. შესწავლილი იქნა აგრეთვე ნანოკრისტალური ტიტანის კარბიდის მიღება $TiCl_3$ 15% კონცენტრაციის წყალხსნარის გამოყენებით. ეს ხსნარი თავიდანვე შეიცავს $Ti-O$ ბმას $[Ti(OH_2)_6]Cl_3$ აკვაკომპლექსის სახით. ამ ნაერთის შიდა საკოორდინაციო სფეროდან წყლის მოლეკულის გამოსაძევებლად ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნა სხვადასხვა უქანგბადო კომპლექსწარმომქმნელი ნაერთები. სახელდობრ ეთილენდიამინი, გუანიდინი, ამინოგუანიდინი, პიპერიდინი და სხვა. აღმოჩნდა, რომ ეთილენდიამინის გამოყენება არ იძლევა კომპლექსური ნაერთის წარმოქმნის საშუალებას, ქიმიური სინთეზის შემდეგ წარმოიქმნება მხოლოდ ორთოტიტანის მჟავა - H_4TiO_4 . დანარჩენი ლიგანდები იძლევა საშუალებას შესაბამისი კომპლექსური ნაერთების წარმოქმნისა: $TiCl_4(OH)_3(CH_6N_3)_4$, $TiCl_3(OH)_4(CH_7N_4)_4 \cdot 5H_2O$, $TiCl_6(OH)(C_5H_{12}N)_4 \cdot 2H_2O$. როგორც ჩატარებულმა კვლევებმა გვიჩვენეს ტუტე, ნეიტრალურ, მჟავე და ძლიერ მჟავე გარემოში შეუძლებელია $Ti-O$ ბმის აცილება. ამიტომ ამ გზით ტიტანის კარბიდის მიღება შეუძლებელია. ჩვენს მიერ საწყის კომპონენტად არჩეული $TiCl_3$ წყალხსნარი არსებობს ჰიდრატული იზომერების სახით: $[Ti(OH_2)_6]Cl_3$ - იასამნისფერი, $[Ti(OH_2)_5Cl]Cl_2 \cdot H_2O$ და $[Ti(OH_2)_4Cl_2]Cl \cdot 2H_2O$ - მწვანე. ეს ნაერთები აპრიორი შეიცავენ $Ti-O$ ბმებს, თანდათანობით განიცდიან ჰიდროლიზს, ხსნარი უფერულდება და გამოიყოფა TiO_2 თეთრი ნალექის სახით. ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ტიტანისქლორიდის ჰექსაჰიდრატში წყლის მოლეკულებს შეიძლება ჩაენაცვლონ როგორც სპირტის მოლეკულები, ასევე Cl^- , OH^- და F^- -ის ანიონები. შიგა საკოორდინაციო სფეროდან წყლის მოლეკულების სრული გამოძევებისათვის ჩვენს მიერ შერჩეული იყო ეთილენდიამინი $NH_2-CH_2-CH_2-NH_2$ (en), რადგანაც იგი წარმოადგენს საუკეთესო ციკლწარმომქმნელ ლიგანდს, რომელიც 3d – გარდამავალ ლითონებთან იძლევა $[M(en)_3]X_2$ შედგენილობის კომპლექსურ ნაერთებს. ამ მიზნით შესწავლილია ეთილენდიამინისა და $TiCl_3 \cdot 6H_2O$ -ს წყალხსნარის ურთიერთქმედება სახვადასხვა pH-ის პირობებში. დადგინდა, რომ M:en მორეაგირე კომპონენტების 2:1,

1:1, 1:2 და 1:3 მოლური თანაფარდობისას და en-ის სიჭარბისას იასამნისფერი ხსნარიდან ხდება ამავე შეფერილობის $Ti(OH)_3$ -ის ნალექის გამოყოფა, რომელიც ჰაერზე დაყოვნებით თეთრ რენტგენულად ამორფულ ორთოტიტანმჟავად (H_4TiO_4) გარდაიქმნება. აღწერილი გარდაქმნების ამსახველი ქიმიური რეაქციების განტოლებები შეიძლება ასე გამოისახოს:

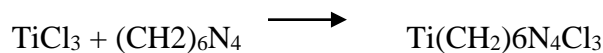


უწყლო $TiCl_3$ სინთეზირებული იქნა TiH_2 და $TiCl_4$ ურთიერთქმედების საშუალებით $650-700^\circ C$ ტემპერატურაზე წყალბადის ნაკადში.

ამ მეთოდის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ტიტანის ჰიდრიდის დაშლისას წარმოიქმნება დისპერსიული ტიტანი, დაუჯანგავი ზედაპირით, რომელიც აქტიურად

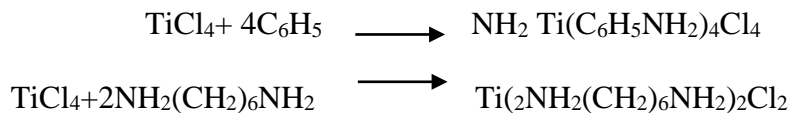


ურთიერთქმედებს ტიტანის ტეტრაქლორიდის ორთქლთან ტიტანის სამქლორიდის წარმოქმნით. ტიტანის სამქლორიდის ურთიერთქმედებით ბენზოლთან ან უროტროპინთან შესაძლებელია შესაბამისი კომპლექსური ნაერთების მიღება:



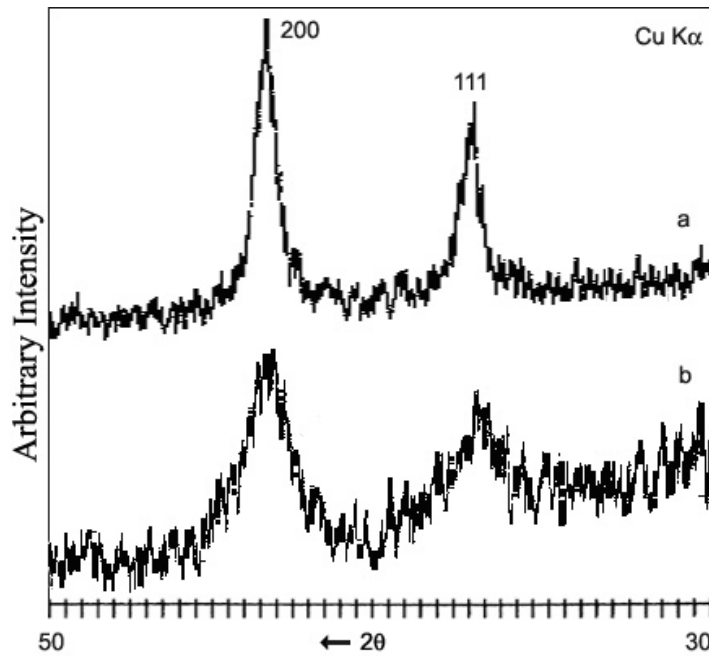
მიღებული კომპლექსური ნაერთების პიროლიზი $300-800^\circ C$ ტემპერატურაზე იძლევა საშუალებას ნანოკრისტალური ტიტანის კარბიდის წარმოქმნისა. ასევე არის

შესაძლებელი მივიღოთ ნანოკრისტალური ტიტანის კარბიდი ტიტანის ტეტრაქლორიდიდან მიღებული კომპლექსური ნაერთებიდან.



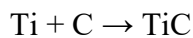
ტიტან-პოლიმერი-გამხსნელი სიტემის კვლევამ გიჩვენა, რომ თერმოქიმიური სინთეზი იძლევა ნანოკრისტალური ტიტანის კარბიდის მიღების საშუალებას. მაგრამ მიღებული კარბიდი აღმოჩნდა დაბინძურებული ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადით. პოლიმერის სახით გამოიყენებოდა: პოლიიზობუთინელი, პოლოსტიროლი, პოლივინილქლორიდი, კაუჩუკი და სხვა. პოლიმერის რაოდენობის შემცირება, როგორც მიზეზისა ჭარბი თავისუფალი ნახშირბადის წარმოქმნისა, სასურველ შედეგს ვერ იძლევა. პოლიმერის რაოდენობის მნიშვნელოვანი სიდიდით შემცირებისას, პოლიმერი ვეღარ მაგრდება გელში და გამოიყოფა თავისუფალი სახით ხსნარში. ამით ირღვევა კარბიდის კომპონენტთა თანაბარი განაწილება და ხშირად თერმოქიმიური სინთეზი იწვევს საბოლოო პროდუქტში ტიტანის ორჟანგის გაჩენას.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, ნანოკრისტალური კარბიდების მისაღებად საჭიროა, ქიმიური სინთეზით მივიღოთ შესაბამისი კომპლექსური ნაერთები, ხოლო შემდგომი თერმოსინთეზით კი თვით ნანოკრისტალური კარბიდები. სურ. 4 ნაჩვენებია რენტგენული დიფრაქციები ნანოკრისტალური ტიტანის კარბიდისა რომლებიც სინთეზირებული იქნა ტემპერატურაზე $\text{Ti}(\text{CH}_2)_6\text{N}_4\text{Cl}_3$ და $\text{TiCl}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_6$ კომპლექსური ნაერთების გამოყენებით. თვით ეს ნაერთები კი შესაბამისად ტიტანის ქლორიდისა უროტროპინთან $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ და ბენზოლთან C_6H_6 ურთიერთქმედების შედეგად იქნა სინთეზირებული. დიფრაქციული პიკების გაგანიერება მიუთითებს მათ აშკარა ნანოკრისტალურობაზე.

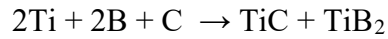


სურ.4. რენტგენოდიფრაქციული სურათი ტიტანის კარბიდისა სინთეზირებული კომპლექსური ნაერთებიდან: a) $\text{Ti}(\text{CH}_2)_6\text{N}_4\text{Cl}_3$, b) $\text{TiCl}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_6$.

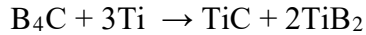
ტიტანის კარბიდის მიღება შესაძლებელია უშუალოდ შემადგენელი კომპონენტების ტიტანის ფხვნილისა და ნახშირბადის ურთიერთქმედებით. მართალია მის მისაღებად ჩვეულებრივი მეთოდით სინთეზირებისას მაღალი ტემპერატურები და საკმაოდ დიდი დროა საჭირო, მაგრამ ჩვენს მიერ შემუშავებული ტექნოლოგიით, ნაპერწკალურ პლაზმურ სინთეზის მეთოდის გამოყენებისას პროცესი საკმაოდ მარტივად ხორციელდება. ვინაიდან პროცესში მხოლოდ შემავალი კომპონენტები ფიგურირებენ ნაერთი საკმაოდ მაღალი სისუფთავისაა. დაბალი საერთო ტემპერატურის გამოყენების გამო მიღებული ფხვნილი ნანოკრისტალურია. ტიტანის კარბიდის მიღების რეაქცია საკმაოდ მარტივად გამოისახება:



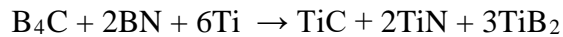
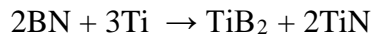
ანალოგიური მეთოდით არის შესაძლებელი მივიღოთ TiC-TiB_2 სისტემის ნანოფხვნილები. პროცესი შემდეგი რეაქციით მიმდინარეობს:



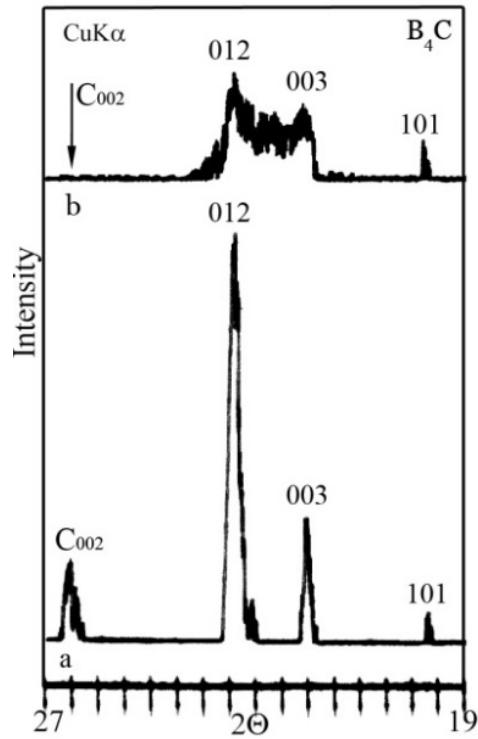
ამ სისტემის ნანოფხვნილების მიღება შესაძლებელია ბორის კარბიდისა და ტიტანის ფხვნილების გამოყენებით:



ბორის კარბიდის ნაცვლად ბორის ნიტრიდის გამოყენება იძლევა საშუალებას ტიტანის დიბორიდთან ერთად მივიღოთ ტიტანის ნიტრიდი, ხოლო ბორის კარბიდისა და ბორის ნიტრიდის ერთობლივი გამოყენება გვაძლევს საშუალებას ტიტანის დიბორიდთან ერთად მივიღოთ ტიტანის კარბიდი და ტიტანის ნიტრიდი. პროცესი შემდეგი რეაქციით მიმდინარეობს:

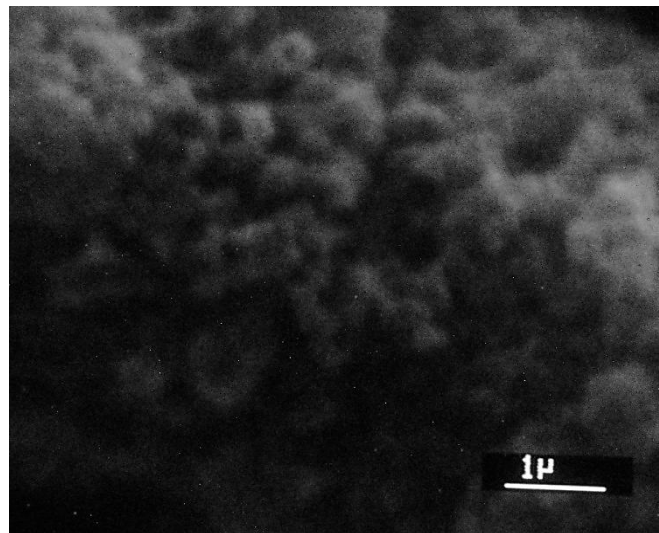


ბორის კარბიდის მიღება სტანდარტული ტექნოლოგიით საკმაოდ პრობლემატურია. იგი მოითხოვს მაღალ ტემპერატურებს და დამუშავების ხანგრძლივ და შრომატევად პროცედურებს. ნანოკრისტალური ბორის კარბიდის ფხვნილი ჩვენს მიერ მიღებული იყო SPS მეთოდის გამოყენებით. საწყის კომპონენტებად აღებული იყო ამორფული ბორის ფხვნილი და მური. სინთეზირების ტემპერატურა შეადგენდა 1600°C , ხოლო დრო კი 10 წუთს. იმისათვის, რომ არ მომხდარიყო მიღებული კარბიდის გამკვრივება და შესაძლებელი ყოფილიყო მისი ადვილად დაქუცმაცება ფხვნილის სახით, გამოყენებული იყო მინიმალური წნევა. დიფრაქციული პიკების გაგანიერება მიუთითებს ფხვნილის ნანოკრისტალურობაზე. სტანდარტული ტექნოლოგიით ბორის კარბიდის მიღებისას მას გარკვეული რაოდენობის თავისუფალი ნახშირბადი მისდევს (სურ. 5.a) და მისი მოცილება დამატებითი სპეციალური ტექნოლოგიით ხორციელდება. ჩვენს მიერ მიღებული ბორის კარბიდი კი თავისუფალ ნახშირბადს არ შეიცავს (სურ.5b).



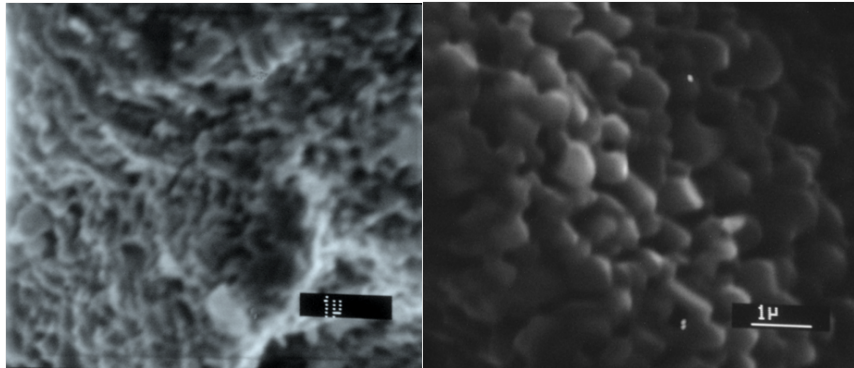
სურ. 5. ბორის კარბიდის ფხვნილის რენტგენოდიფრაქტოგრამები:
 a-სტანდარტული, b-ნანოკრისტალური.

სურ.6-ზე ნაჩვენებია შემუშავებული ტექნოლოგიით მიღებული ნანოკრისტალური ბორის კარბიდის B₄C ელექტრონული მიკროფოტოგრაფია.

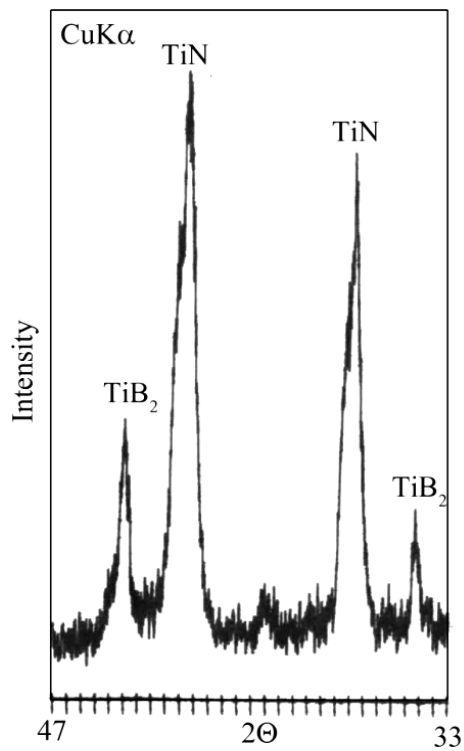


სურ. 6. ნანოკრისტალური ბორის კარბიდის B₄C მემ მიკროფოტოგრაფია.

სურ.7-ზე ნაჩვენებია ბორის ნიტრიდისა და ტიტანის ურთიერთქმედებით მიღებული კომპოზიციური მასალის ელექტრონული მიკროფოტოგრაფიები. ხოლო სურ.8-ზე კი მიღებული პროდუქტის რენტგენული დიფრაქტოგრამა.

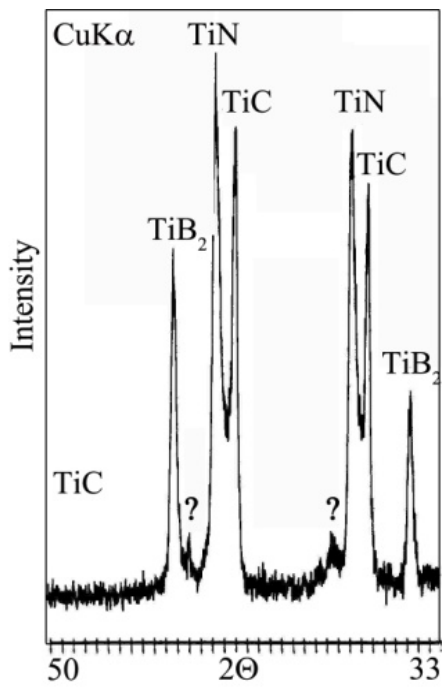


სურ. 7. SPS მეთოდით მიღებული BN-Ti რეაქციით მიღებულ ინანოფხვნილის მემ სურათები: a-SPS სინთეზი 3წთ განმავლობაში, b- SPS სინთეზი 5წთ განმავლობაში.

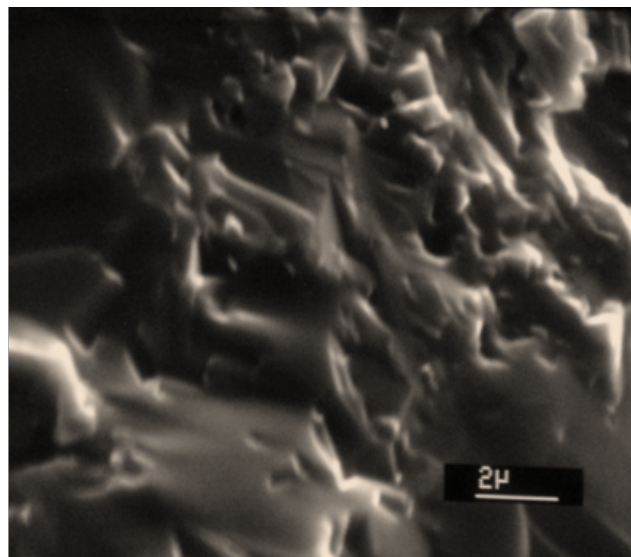


სურ. 8. SPS მეთოდით მიღებული ნანოკრისტალური BN-Ti კომპოზიტის
რენტგენოგრამა

სურ. 9-ზე ნაჩვენებია B_4C -BN-Ti სისტემის სინთეზი SPS მეთოდის გამოყენებით. საბოლოო პროდუქტი წარმოადგენს ტიტანის დიბორიდის, ტიტანის კარბიდისა და ტიტანის ნიტრიდის ერთობლიობას.



a



b

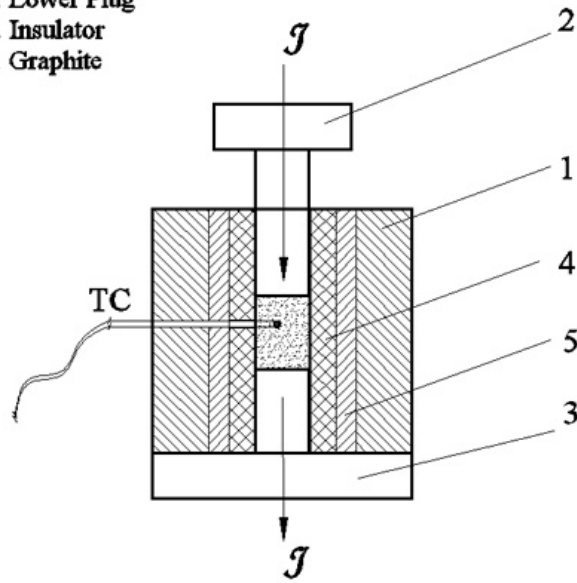
სურ. 9. SPS მეთოდით მიღებული B_4C -BN-Ti კომპოზიტის: a-რენტგენოგრამა,
b-მემ სურათი.

ნანოკრისტალური შეცხოვნილი სალი შენადნობები

სალი შენადნობების ნანოკრისტალური ფხვნილების მიღების შემუშავებული ტექნოლოგიის პირველ ეტაპზე მიიღებოდა ფხვნილები ჭარბი თავისუფალი ნახშირბადით. შენადნობთა მისაღებ საწყის მასალებში ნახშირბადის შემცველობის შემცირება არ იძლეოდა სასურველ შედეგს, ვინაიდან ადგილი ჰქონდა ოპტიმალური სტრუქტურის დარღვევას. წარმიქმნებოდა არასასურველი რთული კარბიდები და ინტერმეტალიდები. მეორეს მხრივ, აღმოჩნდა, რომ ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადი ხელს უშლის მარცვლების ზრდას და ჩვეულებრივი ტექნოლოგიითაც კი შესაძლებელია შეცხოვნილი სალი შენადნობის მიღება ნანოკრისტალური სტრუქტურული მდგომარეობით. ასეთი შენადნობების მახასიათებლები სტანდარტულ შენადნობთა რიგის იყო. ნანოკრისტალურობით გამოწვეულ მახასიათებლების გაზრდას თან სდევდა ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადით გამოწვეული მახასიათებლების შემცირება. ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ შესაძლებელია საწყის კომპონენტებში ნახშირბადის რაოდენობის შემცირება ოპტიმალურამდე და მიუხედავად კაზმში არსებული რთული კარბიდებისა და ინტერმეტალიდებისა, ჩვენს მიერ შემუშავებული ნაპერწკალურ პლაზმური სინთეზის (ნპს) მოწყობილობის გამოყენებით მიიღება ნორმალური სტრუქტურის სალი შენადნობები. სურ. 10 –ზე ნაჩვენებია წნეხ-ყალიბი, რომლის საშუალებითაც მიმდინარეობდა სალ შენადნობთა და კარბიდული მასალების მასიური ნიმუშების მიღება შესაბამისი ნანოფხვნილებიდან.

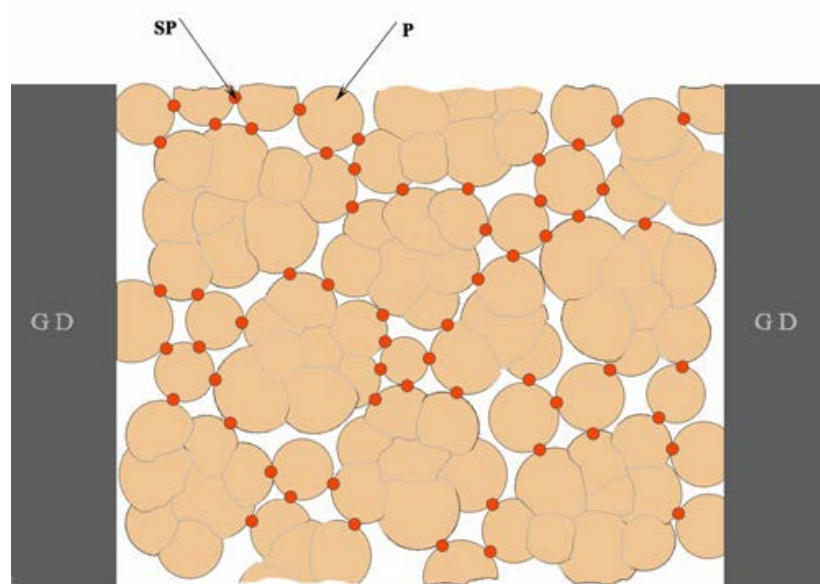
ნაჩვენებ წნეხ-ყალიბში, ნანოფხვნილი იზოლირებულია მატრიცისგან სპეციალური ცილინდრული იზოლატორით. ამიტომ იმპულსური დენი მხოლოდ ფხვნილში გადის პუანსონების საშუალებით და არ იწვევს დამატებით სითბოს მიღებას მატრიციდან. ეს გარემოება კი არ ახდენს ნიმუშის საერთო ტემპერატურის გაზრდას და არ ექმნება საფრთხე ნანომარცვლოვანობის შენარჩუნებას. ნიმუშის ტემპერატურის გასაზომად წნეხ-ყალიბში შეყვანილია თერმოწყვილი.

1. Matrix
2. Upper Plug
3. Lower Plug
4. Insulator
5. Graphite



სურ.10. ნანოკრისტალური სალი შენადნობების შეცხოვის წნებ-ყალიბი. 1-მატრიცა; 2-ზედა პუანსონი; 3- ქვედა პუანსონი; 4-იზოლატორი; 5-გრაფიტი. TC- თერმოწყვილი.

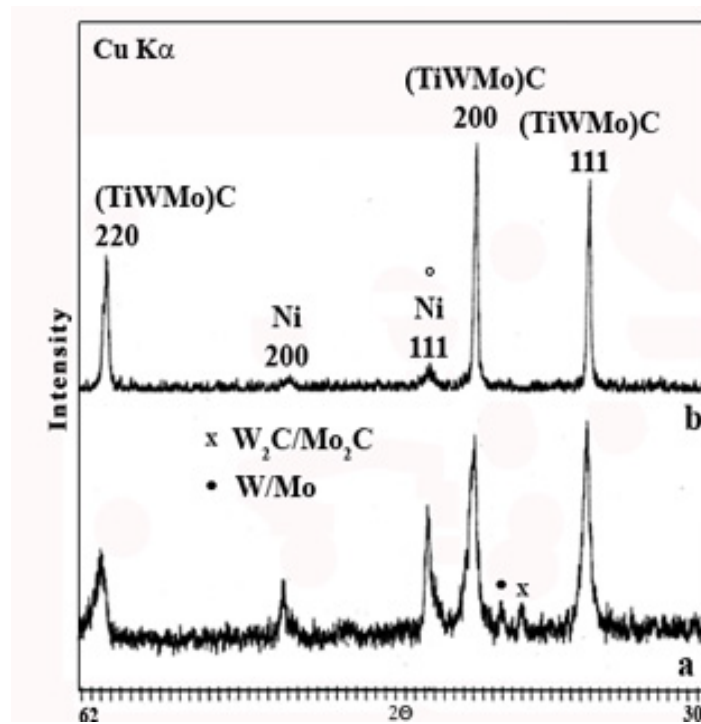
სურ. 11-ზე ნაჩვენებია შეცხოვის მექანიზმი ნპს მოწყობილობის გამოყენებისას. პულსირებადი დენი ფხვნილში გავლისას სითბოს გამოყოფს მარცვალთა კონტაქტის არეში.



სურ. 11. სალ შენადნობებში სტრუქტურის წარმოქმნის მექანიზმი ნპს მოწყობილობის გამოყენებისას. SP-ნაპერწყალი; P- ფხვნილის ნანო-ნაწილაკი.

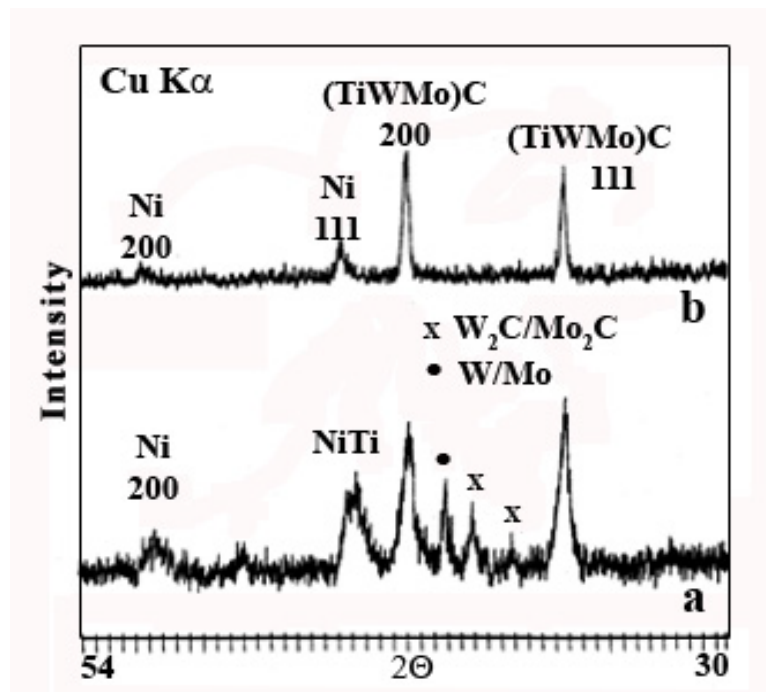
სითბოს გამოყოფის მცირე ხანგრძლივობის გამო, ფხვნილი ვერ ასწრებს სითბოს მთლიან გაწოვას. ამის გამო ტემპერატურა სწრაფად იწყებს მატებას მხოლოდ კონტაქტის არეში, ნიმუშის ტემპერატურა რჩება შედარებით დაბალი და მარცვლების მნიშვნელოვან ზრდას ადგილი არა აქვს.

ჩვენს მიერ შემუშავებული ტექნოლოგია და მოწყობილობა ასევე იძლევა პრობლემის გადაწყვეტას ტიტანის კარბიდის ფუძის მქონე სალი შენადნობებისათვის. აქაც საჭიროა საწყის კაზმში ზედმეტი თავისუფალი ნახშირბადის შეყვანა, ვინაიდან სიმცირე იწვევს არასასურველი ფაზების წარმოქმნას. ზედმეტი ნახშირბადი ჩვეულებრივი შეცხობისას ხელს უშლის შეცხობის პროცესს. არასასურველი ფაზები კი ამცირებს შენადნობთა მახასიათებლებს. ნკს მოწყობილობის გამოყენება იძლევა ოპტიმალურ შენადნობებს (სურ. 12, 13 და 14). ცხადია ნორმალური სტრუქტურის ნანოფხვნილისგან ნორმალური სტრუქტურის სალი შენადნობი მიიღება (სურ.6).

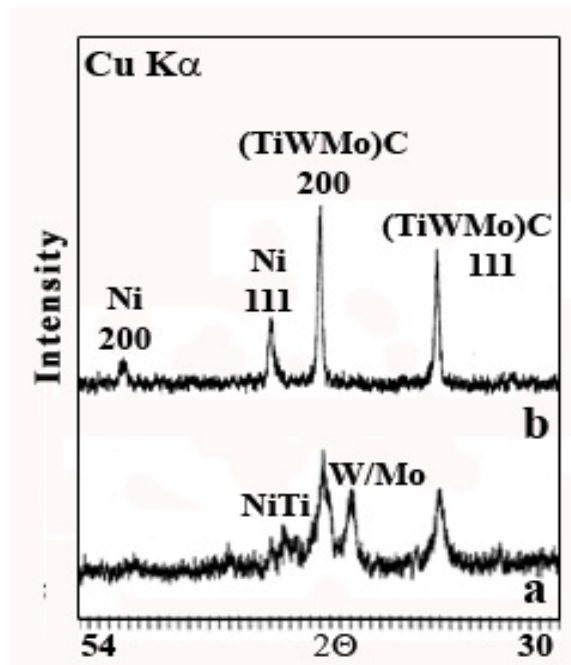


სურ. 12. რენტგენული დიფრაქტოგრამები TiC-Ni-Mo-W ტიპის სალი შენადნობისა:

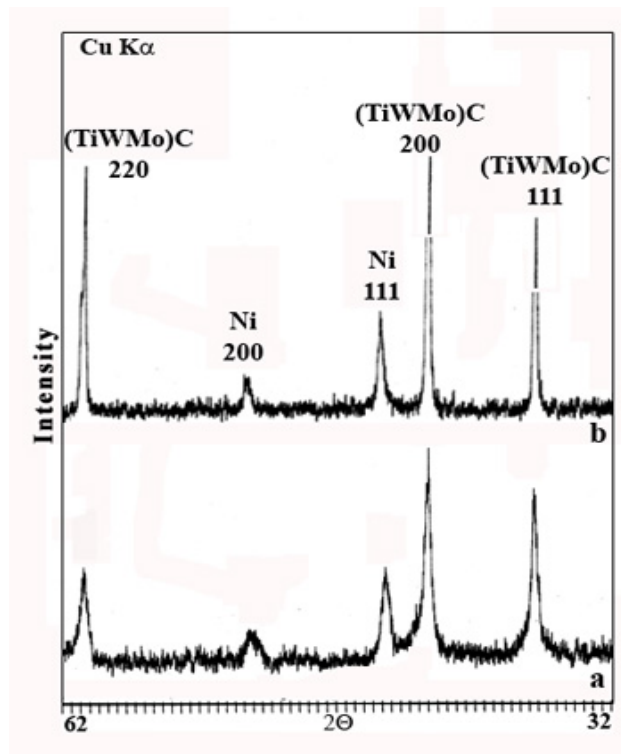
- a- ნანოფხვნილი მცირე სტრუქტურული დარღვევებით (W/Mo, W₂C/Mo₂C),
- b- მისგან შეცხობილი შენადნობი ნორმალური სტრუქტურით.



სურ. 13. რენტგენული დიფრაქტოგრამები TiC-Ni-Mo-W ტიპის სალი შენადნობისა:
 a- ნანოფხვნილი მნიშვნელოვანი სტრუქტურული დარღვევებით (W/Mo, W_2C/Mo_2C , NiTi),
 b- მისგან შეცხობილი შენადნობი ნორმალური სტრუქტურით.



სურ. 14. რენტგენული დიფრაქტოგრამები TiC-Ni-Mo-W ტიპის სალი შენადნობისა:
 a- ნანოფხვნილი მნიშვნელოვანი სტრუქტურული დარღვევებით (W/Mo, NiTi),
 b- მისგან შეცხობილი შენადნობი ნორმალური სტრუქტურით.

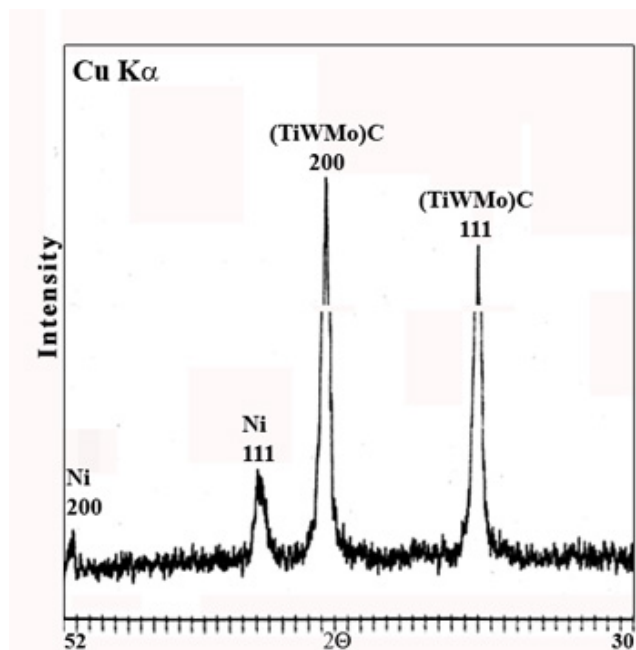


სურ. 15. რენტგენული დიფრაქტოგრამები TiC-Ni-Mo-W ტიპის სალი შენადნობისა:

a- ნანოფხვნილი ნორმალური სტრუქტურით,

b- მისგან შეცხობილი შენადნობი ნორმალური სტრუქტურით.

ჩატარებული იქნა აგრეთვე უნიკალური ექსპერიმენტები სალი შენადნობების მიღებისა პირდაპირ კომპონენტთა შესაბამისი ქიმიური ნაერთებიდან, ნანოფხვნილის მიღების გარეშე, ჩვენს მიერ შემუშავებული ნუს მოწყობილობის გამოყენებით. ტიტანის ჰიდრიდის, ნიკელის ქლორიდის, მოლიბდენისა და ვოლფრამის ოქსიდის და მურის გამოყენებით მიღებული იქნა სრულყოფილად შეცხობილი სალი შენადნობი შემადგენლობით (TiWMo)C-Ni (სურ.16).



სურ. 16. რენტგენული დიფრაქტოგრამა TiC-Ni-Mo-W ტიპის სალი შენადნობისა მიღებული TiH_2 , $NiCl_2$, MoO_3 , WO_3 და C, შემადგენლობის კაზმიდან.

ტიტანის კარბიდისა და მისი ფუძის მქონე სალი შენადნობების ფიზიკო-მექანიკური თვისებები

ტიტანის კარბიდის ფიზიკო-მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვანი მახასიათებლებია, რომლებიც განსაზღვრავენ თვით სალი შენადნობის თვისებებს. როგორც ცნობილია, ძნელადდნობად კარბიდებს ახასიათებს ძალზე მაღალი სისალე და სიმყიფე. ტემპერატურის გაზრდით ჩნდება გარკვეული პლასტიურობაც. კარბიდების ასეთი ქცევა აიხსნება დისლოკაციების თავისებური მოძრაობით. ოთახის ტემპერატურაზე დისლოკაციების მოძრაობა დამუხრუჭებულია პაიერლს-ნაბაროს ძაბვის მაღალი მნიშვნელობით. გარდა ამისა უმნიშვნელოა დისლოკაციათა სიმკვრივე, გამოწვეული ნახშირბადის ატომების SP^3 კონფიგურაციის სტაბილურობის გამო.

სალი შენადნობების ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებს მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს მათი სტრუქტურული მდგომარეობა. რღვევისადმი წინააღმდეგობა

ხშირად დამოკიდებულია შემადგენელი ფაზების მარცვლოვანებაზე. TiC-(Ni Mo) სალ შენადნობებში კარბიდული ფაზეს 0.5-1 მკმ და 1-2 მკმ მარცვლოვანების დროს, რღვევისას ბზარი გადის ფაზათა შორის საზღვარზე, ხოლო 2-4 მკმ და 4-6 მკმ მარცვლოვანებისას კი ბზარი წარმოიშვება და ვრცელდება კარბიდის მარცვლებში.

მიღებული ახალი სალი შენადნობების სტაბილური მახასიათებლებით უზრუნველსაყოფად, ცხადია საჭირო იქნება მათი სტრუქტურისა და ფიზიკო-მექანიკური თვისებების შესწავლა. კვლევის მეთოდების დახვეწა და საჭირო შესაბამისი მოწყობილობების შექმნა. ამით საშუალება იქნება შემადგენლობის მიზანდასახული ვარიანტებისა, ტექნოლოგიური ციკლის იმ პარამეტრების დაზუსტებისა, რომლებიც განაპირობებენ მაღალი და სტაბილური საექსპლოატაციო თვისებების მქონე სალი შენადნობების წარმოებას. მაქსიმალურად მაღალი შედეგები არის შესაძლებელი მივიღოთ ნანოკრისტალური სტრუქტურის მქონე სალი შენადნობების შექმნით. ამიტომ ბოლო დროს საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს სამუშაოები მათ მისაღებად.

(Ti,Mo,W)(C,N) ბაზაზე არსებული კომპოზიციური მასალები წარმოადგენს საკმაოდ საინტერესო მასალას ფართო სპექტრის თვისებების გამო. მაღალი ცვეთამდეგობა, მაღალი ტემპერატურული სისაღე, საუცხოო ქიმიური სტაბილურობა, მხურვალმდეგობა, დაბალი ხახუნის კოეფიციენტი და სხვა. მთელი რიგი კვლევებია მიმდგნილი ამ კომპოზიციის მისაღებად მათ შორის SPS მეთოდით აქტიურად გამოიყენება ნანოკრისტალური შემცხობილი ნიმუშების მისაღებად.

აქტიურად მიდის სამუშაოები ტიტანის კარბონიტრიდის Ti(CN), ასევე საკმაოდ საინტერესო კომპოზიციური მასალის, მისაღებად. მიღებულია ტიტანის კარბიდის ბაზაზე არსებული სხვადასხვა ნანომასალები ალუმინის და ცირკონიუმის ოქსიდების, ასევე რკინა-ნიკელის კომპოზიციებით.

სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდი მოიცავს ნიმუშის აწონვას ჰაერზე, წყალში და მისი მნიშვნელობის გამოთვლას. ასაწონად ვიყენებთ "БЛАО-200" ტიპის სასწორს საწონებითურთ და წყალში ასაწონ მოწყობილობას, რომელიც თავის მხრივ

წარმოადგენს გამოხდილი წყლით სავსე ჭურჭელს და ნიმუშის წყალში მოსათავსებელ 0.2 მმ დიამეტრის პლატინის ძაფს.

მოცულობითი ფორიანობა – η ეს არის ნიმუშში არსებული ფორების მოცულობა – Δv შეფარდებული მის მთლიან მოცულობასთან – v . მის განსაზღვრას ვაწარმოებდით ჰიდროსტატიკური მეთოდით ანალოგიურად სიმკვრივისა.

სტატიკური სიმტკიცის განსაზღვრის დროს ღუნვისას, ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე ნიმუშს ვტვირთავთ საყრდენების შუაში, ვერტიკალურად მოქმედი, შეყურსული ძალის საშუალებით, ნიმუშის სრულ რღვევამდე. გამოცდას ვაწარმოებდით უნივერსალური გამომცდელი მანქანის "P-5" –ის გამოყენებით.

სისალის გაზომვა როკველის მეთოდით (სკალა A) მდგომარეობს ალმასის კონუსის (მომრგვალებული თავით) შეჭრაში გამოსაკვლევ ნიმუშში ორი, წინასწარი და ძირითადი, ძალის გავლენით და ალმასური კონუსის შეჭრის სიღრმის განსაზღვრაში ძირითადი ძალის მოხსნის შემდეგ. სალ შენადნობთა სისალის გასაზომად ვიყენებდით "TK - 2M" ტიპის ხელსაწყოს, რომლის საშუალებით ავტომატურად ხდებოდა ალმასის კონუსის ჩასვლის სიღრმის გაზომვა, ხოლო სისალის მნიშვნელობა HRA აითვლებოდა ისრიანი ინდიკატორის საშუალებით.

სისალე, ვიკერსის მეთოდით, წარმოადგენს მიკროსისალის გაზომვის ერთ–ერთ მეთოდს. იგი ახასიათებს მასალის წინააღმდეგობის უნარს ალმასის პირამიდის შეჭრით გამოწვეულ პლასტიურ დეფორმაციისადმი. მიკროსისალის გაზომვა იძლევა საშუალებას ვიმსჯელოთ ფაზის სიმყიფის შესახებ, ანაბეჭდის დიაგნოზის გაგრძელებაზე ბზარების წარმოშობის მიხედვით. ალმასის პირამიდის ჩასვლის სიღრმე ნიმუშში ანაბეჭდის დიაგნოზის სიგრძის მეშვიდედია $h = d/7$.

ცხელ სისალეს ვუწოდებთ მიკროსისალეს გაზომვის ვიკერსის მეთოდით სხვადასხვა ტემპერატურაზე. მის გაზომვას სალი შენადნობებისათვის ვაწარმოებდით მოწყობილობაზე, რომელიც შექმნილი იყო საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში. იგი აწყობილია ვაკუუმური დანადგარის "HBA 120/2" ბაზაზე. კუთრი ელექტროწინაღობის განსაზღვრის მეთოდი მდგომარეობს ნიმუშში მუდმივი დენის გატარებასა და გარკვეული სიგრძის უბანზე პოტენციალთა სხვაობის

განსაზღვრაში . ნიმუშის ზომები შეადგენდა 5x5x35 მმ. მისი ზედაპირი იხეხებოდა ალმასური ქარგოლით არანაკლებ 0.1 მმ სისქის ფენის მოხსნით და სისუფთავე შეადგენდა $Ra < 1.5$ მკმ. წინააღმდეგობის გაზომვას ვაწარმოებდით "Y 303" ტიპის დანადგარზე.

სალი შენადნობების ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტის განსაზღვრა ხდებოდა ხელსაწყო საშუალებით რომლის მოქმედების პრინციპი დაფუძნებული იყო ურთიერთ ინდუქციაზე. კვარცის ერთი ღერო შეერთებულია ინდუქციურ კოჭასთან და ამოდრავებს მას გახურებისას. მეორე ღერო შეერთებულია მეორე კოჭასთან, მაგრამ მისი სიგრძე ნაკლებია პირველ ღეროსთან შედარებით 25 მმ-ით. ამ 25 მმ ავსებს ნიმუში. გაფართოებისას ნიმუში გადაადგილებს მეორე კოჭას კვარცის ღეროს საშუალებით.

თერმომდგრადობა მასალებისა, ეს არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ახასიათებს უნარს გაუძლოს ტემპერატურის დიდ ცვლილებებს დარღვევის გარეშე. გახურებისას ბრტყელი ფირფიტის ზედაპირი განიცდის მკუმშავ, ხოლო გაცივებისას კი იმავე სიდიდის გაჭიმვის დეფორმაციას. ვინაიდან სალი შენადნობების სიმტკიცე კუმშვისას 4–5 ჯერ მეტია ვიდრე გაჭიმვისას, ამიტომ სითბური დარტყმა უფრო საშიშია გაცივებისას ვიდრე გახურებისას.

აღნიშნული მეთოდიკით განსაზღვრული იქნა ფიზიკო-მექანიკური თვისებები შემუშავებული ტექნოლოგიით მიღებული ნანოკრისტალური სტრუქტურის მქონე სალი შენადნობებისა. ტიტანის კარბიდის ფუძის მქონე სალი შენადნობებიდან აღებული იქნა შენადნობები Ni, Ni-Mo, Ni-Fe, Ni-W და Ni-Mo-W შემაკავშირებლებით. შემაკავშირებლის რაოდენობა 20% ტოლი იყო. ვოლფრამის კარბიდის ფუძიან შენადნობებში შემაკავშირებლად გამოყენებული იყო კობალტი 6% რაოდენობით. შესადარებლად, დამზადებული იქნა ანალოგიური შემადგენლობის სალი შენადნობები სტანდარტული ტექნოლოგიის გამოყენებით.

იმის გამო, რომ სალი შენადნობების ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გამოცდების ქართული სტანდარტები არ არსებობს, გამოცდები ჩატარდა ძველი სტანდარტული მეთოდიკით.

სალი შენადნობების თერმული მდგრადობა და კუთრი ელექტრული წინაღობა განსაზღვრული იყო საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში შემუშავებული მეთოდის მიხედვით. თერმული მდგრადობი გამოცდების შედეგები მოცემულია ცხრილ 1-ში, ხოლო ცხრილ-2-ში ნაჩვენებია სალ შენადნობთა დანარჩენი ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გამოცდის შედეგები.

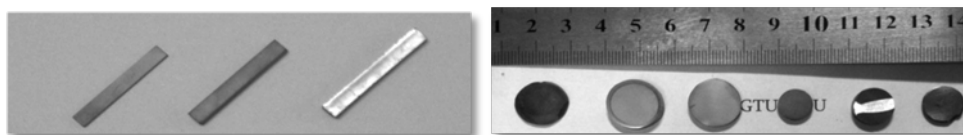
სალ შენადნობთა თერმული მდგრადობა

ცხრილი 1

სალი შენადნობები	გახურების ტემპერატურა	სიმტკიცე ღუნვაზე	
		გაცივება ჰაერზე	გაცივება წყალში
KHT-16	600	100	10
	800	90	0
	1200	70	0
T15K6	600	120	15
	800	115	10
	1200	85	0
BK-8	600	160	140
	800	150	100
	1200	140	0
T20H	600	160	150
	800	155	120
	1200	145	0
TI20	600	180	180
	800	185	190
	1200	180	185

სალი შენადნობის თვისებები	H20 H20 ნანო	H20 ნანო	T20M8 T20M8 ნანო	T20M8 ნანო	T20W8 T20W8 ნანო	T20W8 ნანო	T20H T20H ნანო	T20H ნანო	BK-6 BK-6 ნანო	BK-6 ნანო
სიმკვრივე გრ/სმ ³	5,5	5,55	5,75	5,80	5,9	6	5,85	5,9	15	15
ფორიანობა %	0,30	0,25	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
სისაღე HRA	89	90	90	92	91,5	92,5	91,5	93	90	92
სიმტკიცის ზღვარი ღუნვაზე კგ/მმ ²	120	135	135	150	155	170	160	180	150	170
ცხელი სისაღე Hკგ/მმ ²										
20°C	1450	1540	1550	1680	1650	1720	1760	1800	1550	1670
200°C	1150		1135		1380		1550			
400°C	940		1075		1150		1400			
600°C	770		925		1080		1130			
800°C	470		670		750		780			
1000°C	165		380		480		470			
1200°C	80		190		290		280			
კუთრი ელექტროწინალობა	120	125	110	115	125	130	90	100	23,4	25

ამგვარად ნანოტექნოლოგიის გამოყენებით მიღებული სალი შენადნობების ფიზიკო-მექანიკური თვისებები უმჯობესდება დაახლოებით 15-20%-ით.



სურ. 17. შეცხოვნილი სალი შენადნობების ნიმუშები

პროექტის ფარგლებში გამოქვეყნებული და კონფერენციაზე

მოხსენებული ნაშრომები:

1. Professor, Bakhtiyarov, S. I., US Air Force Safety Center, UNITED STATES; Dr., Rukhadze, L., GTU, GEORGIA; Dr., Kutelia, E. R., GTU, GEORGIA; Dr., Maisuradze, N., GTU, GEORGIA; Dr., Eristavi, B., GTU, GEORGIA
"A NOVEL HIGH TEMPERATURE RESISTANT ELECTROMAGNETIC/RADIATION SHIELDING MATERIAL FOR SPACE EXPLORATION". 5th IAASS Conference, A **Safer Space for a Safer World**. *International Association for the Advancement of Space Safety*. Versailles, Paris, France, 17-19 October, 2011. **ID:2288841**
2. Kutelia E.R., Rukhadze L.N., Maisuradze N.I., Kukava T.G., Tsurtsunia O.O., Eristavi B.G., Dzigrashvili T.A., Kuchalashvili G.V. and Padgurskas J.A. Investigation of magnetic carbon nanopowder doped with iron atom clusters. GEN. #2, 2011, p.p. 84-90.
3. Nikoloz Jalabadze, Lili Nadaraia and Levan Khundadze
"Development a New Technology for Producing Nanocrystalline Composite Materials"
Proceedings of Annual International Conference on Materials Science, Metal & manufacturing (M3 2011), 12-13 December 2011, Singapore. Pages: 59-64;
4. N. Jalabadze, L. Nadaraia, L. Khundadze
"Modified Spark Plasma Sintering (MSPS) Device"
Program of 2nd International Workshop on Spark Plasma Sintering, October 20-21, 2011, Capbreton, France, 2 pp;
5. L. Nadaraia, N. Jalabadze, L. Khundadze
"Obtaining the ceramic scintillators by spark plasma sintering"
Program of 2nd International Workshop on Spark Plasma Sintering, October 20-21, 2011, Capbreton, France, 2 pp.