

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ხატია ანანიაშვილი

სპეციალური დანიშნულების ფუძემდებზე ფუნქციური  
დანაფარების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება

სადოქტორო პროგრამა - მასალათმცოდნეობა

შიფრი - 0412

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

**ავტორეფერატი**

თბილისი

2021 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის, მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონთა დამუშავების დეპარტამენტში, იანკა კუპალას სახელობის გროდნოს სახელმწიფო უნივერსიტეტის ზოგადი ფიზიკის დეპარტამენტსა და ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტში

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ., პროფესორი მიხეილ ოქროსაშვილი

რეცენზენტები: -----

-----

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკისა და მასალათმცოდნეობის საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია ----- მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

## თემის აქტუალობა

თანამედროვე ეპოქაში ინდუსტრიის განვითარებთან ერთად იზრდება მოთხოვნილება ინოვაციური მასალებისა და მოწინავე ტექნოლოგიების შემუშავებაზე. ამ მხრივ აღსანიშნავია ნაკეთობის ზედაპირზე განსხვავებული მასალის დანაფარების დატანის მეთოდები, რაც განაპირობებს ნაკეთობის საექსპლუატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესებას, მწარმოებლურობის ამაღლებას, დანახარჯების შემცირებას და ფუძემშრისგან დამოუკიდებლად ზედაპირის თვისებების კონტროლის შესაძლებლობას. ამ თვალსაზრისით აღსანიშნავია ფართოდ გავრცელებულ და შედარებით დაბალი ღირებულების მასალის - ალუმინისა და სპილენძის ნაკეთობების ზედაპირზე ძნელდნობადი ლითონების ფუნქციური დანაფარების დატანა. ასეთ ლითონებად შეიძლება გამოყენებული იქნას ტანტალი და ნიობიუმი, რომლებიც ფიზიკო-მექანიკური და ტექნოლოგიური თვისებების ერთობლიობის გათვალისწინებით ერთ-ერთ ყველაზე პერსპექტიულს წარმოადგენს თანამედროვე ტექნიკაში, განსაკუთრებით ავია და კოსმოსურ მშენებლობაში, სარაკეტო და ბირთვულ ტექნიკაში, ენერგეტიკაში, ელექტრონიკაში, მედიცინაში. აღსანიშნავია ნიობიუმის მაღალი კოროზიული მედეგობა ძლიერ მჟავებსა და გამდნარ ტუტეებში, მდგრადობა დასხივებისას, კარგი ბირთვული მახასიათებლები და ზეგამტარობა. ტანტალს, ზემოაღნიშნულ თვისებებთან ერთად, ახასიათებს ბიოთავსებადობის კარგი უნარი, რის გამოც შესაძლებელია მისი ბიომასალად გამოყენება სამედიცინო მრეწველობაში, მაგალითად, იმპლანტებისა და პროთეზების დასამზადებლად.

არსებობს დანაფარების მიღების სხვადასხვა მეთოდი. თუმცა, ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგია ძნელდნობადი ლითონების და მათი ნაერთების დანაფარებთან მიმართებაში არაერთი უპირატესობით სარგებლობს, როგორცაა მათი დიდი სიჩქარით აორთქლების და კონდენსატის დასმის შესაძლებლობა პრაქტიკულად ნებისმიერ, მასალაზე (თუნდაც შეუთავსებელ წყვილზე) ფუძემშრესთან საუკეთესო შეჭიდულობისა

და რეგულირებადი სტრუქტურისა და თვისებების უზრუნველყოფით. ასევე, აღსანიშნავია მეთოდის ეკოლოგიურობა - სამუშაო პროცესის დროს გამოირიცხება გარემოში რაიმე მავნე ნივთიერების გაზნევა.

თუ გადავხედავთ ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიის ბაზრის მონაცემებს, Allied Market Research-ის ანალიტიკოსთა თანახმად, ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიით მიღებული ერთშრიანი და მრავალშრიანი დანაფარების მსოფლიო ბაზარი, რომელიც 2019 წელს შეფასდა 1.8 მლრდ. აშშ დოლარად, პროგნოზების მიხედვით 2027 წელს მიაღწევს 2.8 მლრდ. აშშ დოლარს.

ასეთი დანაფარების გამოყენების მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ტანტალის დანაფარიანი ალუმინის კონტეინერები რადიოაქტიური ნარჩენებისთვის, ცერნის ამაჩქარებელში გამოყენებული ნიობიუმის დანაფარიანი სპილენძის მაღალსიხშირული რეზონატორები და სხვა.

თემის აქტუალობის მაგალითია აშშ-ს ენერჯეტიკის დეპარტამენტის, ლოურენსის სახელობის ლივერმორის ეროვნული ლაბორატორიის დიდი ინტერესი თანამედროვე მხურვალმედეგი დანაფარების მიღებისადმი. ამ ინტერესის ფარგლებში განხორციელებულია პროექტი „თანამედროვე მხურვალმედეგი დანაფარები სამრეწველო გამოყენებისთვის“.

მეტად საინტერესოა ისეთი მრავალშრიანი დანაფარების მიღება და მათი თვისებების კვლევა, სადაც ფერომაგნიტური ლითონის ფენასთან (ფენებთან) ერთად იქნება ზეგამტარი, პარამაგნიტური ფენაც. მაგ. ასეთ თემატიკაზე ინტენსიურად მუშაობენ სხვადასხვა ქვეყნის მეცნიერები. მაგალითად, იულისის კვლევით ცენტრში მუშაობენ ნანოზომის მრავალშრიან დანაფარებზე სენსორებისთვის. მრავალშრიანი დანაფარების სხვა მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ საავიაციო დარგში წარმოებული ნაკეთობის ზედაპირის მხურვალმედეგი თერმობარიერული დანაფარები, რომელთა მისაღებად ელექტრონულ-სხივურ ტექნოლოგიის გამოყენებას ენიჭება უპირატესობა, რადგან აქ უფრო მაღალი ეროზიამედეგობაა საჭირო და თავს იჩენს გაზრდილი დაძაბულობები.

სწორედ მხურვალმედეგი ლითონების დანაფარების შემუშავებას ეძღვნება წინამდებარე ნაშრომი.

### **სამუშაოს მიზანი**

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენდა ელექტრონული სხივით აორთქლებისა და ორთქლის ნაკადის შემდგომი კონდენსაციის გზით სპილენძისა და ალუმინის ფუძემრეებზე მათთან საუკეთესო შეჭიდულობის მქონე ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსატების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება; მიღებული ნიმუშების “ფუძემრე-დანაფარი” ზედაპირის და გარდამავალი ზონების მეტალოგრაფიული, ელექტრონულ-მიკროსკოპული, რენტგენოსპექტრალური და ფაზური ანალიზი; ფუძემრე-დანაფარი გარდამავალი ფენის ბუნებისა და ფაქიზი სტრუქტურის გამოკვლევა; ფუძემრისა და დანაფარის სტრუქტურულ-გეომეტრიული ფაქტორების გავლენის შესწავლა ფუძემრე-დანაფარი წყვილის შეჭიდულობის ხარისხზე; შემუშავებული ტექნოლოგიით რთული გეომეტრიული ფორმის ტექნოლოგიურ ნიმუშებზე ნიობიუმისა და ტანტალის ყოველმხრივი დანაფარების მიღება; სპილენძისა და ალუმინის ფუძემრეებზე Ni/Fe/Nb Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი დანაფარების მიღების შესაძლებლობის კვლევა, მეტალოგრაფიული და ელექტრონულ-მიკროსკოპული კვლევა, ფაზური ანალიზი.

### **კვლევის ობიექტი**

ჩვენ მიერ გამოკვლეული იქნა ბრტყელი სპილენძის (M2, 99,7%Cu) და ალუმინის (A6, 99,6%Al) ფირფიტებზე (120×280×2 მმ) ნიობიუმის (Product №41MR-0001, Lot № IAM5240 Nb, Grain Size 5 μm) და ტანტალის (Product № 73MR-0001, Lot № IAM1283TAM, Grain Size 5 μm) ფხვნილების ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიით ვაკუუმში აორთქლებისა და ორთქლის ნაკადის შემდგომი კონდენსაციის შედეგად მიღებული ერთშრიანი დანაფარები. ასევე, შესწავლილია სპილენძისა და ალუმინის ფუძემრეებზე (120×280×1 მმ)

შემუშავებული ტექნოლოგის გამოყენებით მიღებული მრავალშრიანი Cu-Ni/Fe/Nb, Al-Ni/Fe/Nb, Cu-Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta და Al-Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta დანაფარები.

### კვლევის მეთოდები

საკვლევი ნიმუშების ზედაპირზე ტანტალისა და ნიობიუმის ერთ-შრიანი და Ni/Fe/Nb, Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი დანაფარების მიღება ხორციელდებოდა ელექტრონულ-სხივურ დანადგარზე. ნიობიუმისა და ტანტალის ფხვნილების დაწნეხილი და ელექტრონული სხივით გადადნობილი ბრიკეტების აორთქლება წარმოებდა ელექტრონული სხივით სპილენძის წყლით საცივებელი ტიგელიდან, ხოლო ორთქლის ნაკადის კონდენსაცია - ოპტიმალურ ტემპერატურამდე გახურებული სპილენძისა და ალუმინის ბუნებრივი ზედაპირის მქონე ფუძემრეებზე.

ორთქლის ნაკადის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონების დასადგენად დანაფარის დასმა ხორციელდებოდა ტემპერატურული გრადიენტის (100–დან 600°C–მდე) მქონე ფუძემრეზე. ფუძემრის სიგრძეზე ტემპერატურის განაწილების ხასიათის დადგენის შემდეგ, ნიმუშები იჭრებოდა სტრუქტურული ზონების მიხედვით და ხდებოდა მათი გამოცდა ნიშანცვლად გადალუნვებზე კონდენსატში პირველი მაკროზონის გაჩენამდე. ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონის დადგენის შემდეგ საკვლევი ნიმუში მიიღებოდა იზოთერმულ პირობებში.

ნიმუშის ზედაპირის ყოველმხრივი დაფარვისათვის გამოიყენებოდა მოწყობილობა, რომელიც შედგება საბრუნებელი მექანიზმისა და ღუმელისაგან. დაფარვის პროცესში ნიმუში განუწყვეტლივ ბრუნავს.

მიღებული ნიმუშების სტრუქტურისა და თვისებების კვლევა წარმოებდა ფუძემრესთან ერთად, კონდენსატის მოცილების გარეშე.

ზედაპირული და განივი კვეთის მაკრო- და მიკროსტრუქტურების შესასწავლად გამოიყენებოდა: მეტალოგრაფიული მიკროსკოპები MBC-9, MMP-2P და Zuzi 173 კომპიუტერული უზრუნველყოფით, მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპი (SEM) JSM-5610 L, რომელიც აღჭურვილია EDX

JED-2201 ქიმიური ანალიზის სისტემით (JEOL, Japan). ელემენტების შემცველობა რენტგენული ფლუორესცენტული მეთოდით განსაზღვრულია რენტგენული გამოსხივების ენერგიის სპექტრომეტრზე CEP-01 ElvaX (უკრაინა).

ფაზური შემადგენლობა შესწავლილია რენტგენის დიფრაქციით (XRD) DRON-3M დიფრაქტომეტრზე.

ლოკალური რენტგენოსპექტრალური ანალიზი ჩატარებულია მასკა-ნირებელ ელექტრონულ მიკროსკოპზე JSM-6510 LV EDX სპექტრომეტრით (JEOL, Japan).

ფუძემდებთან დანაფარების ადჰეზია გამოკვლეულია ნიშანცვლადი გადაღუნვებისა და ნაკაწრების ცხურას საერთაშორისო სტანდარტით (ГОСТ 9.302-88) გათვალისწინებული მეთოდით.

დანაფარის ზედაპირის და განივი კვეთის სისქეები და მიკროსისალე გაზომილია CASON-59 HV (ჩინეთი) და ПМТ-3 (რუსეთი) მიკროსისალის გამხომ ხელსაწყოებზე.

მრავალშრიანი დანაფარების მაგნიტური თვისებების კვლევა განხორციელდა თსუ-ს ე. ანდრონიკაშვილის ფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომლების მიერ დამზადებული თვითნაკეთი ხელსაწყოთი აღჭურვილ რადიოსიხშირულ რეზონანსულ მაგნეტომეტრზე.

### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები**

შემუშავებულია სპილენძისა და ალუმინის ფუძემდებთან საუკეთესო შეჭიდულობის მქონე ნიომიუმისა და ტანტალის ერთშრიანი დანაფარების მიღების ტექნოლოგია კონდენსაციის დადგენილ ტემპერატურულ დიაპაზონებში; დადგენილია სპილენძის ფუძემდებზე Ni/Fe/Nb, Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta და ალუმინის ფუძემდებზე Ni/Fe/Nb მრავალშრიანი დანაფარების მიღების შესაძლებლობა. გამოკვლეულია მიღებული მრავალშრიანი დანაფარების მაგნიტური თვისებები; ნაჩვენებია, რომ Cu-Nb, Cu-Ta, Al-Nb და Al-Ta კომპოზიციურ სისტემებში ძნელდნობადი ლითონების – ნიობიუმისა და ტანტალის

კონდენსაციის პროცესში ფაზათა ფორმირებისა და ფუძემრეხა და დანაფარს შორის ადჰეზიის ხარისხზე არსებით გავლენას ფუძემრეხის (კონდენსაციის) ტემპერატურა ახდენს. ალუმინის ფუძემრეხე  $390^{\circ}\text{C}$  და  $320^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურის ზემოთ შესაბამისად ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსაციის შემთხვევაში ხდება კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის მიმდინარეობის ინიცირება, რა დროსაც ყალიბდება მოცემული ტექნოლოგიური პროცესისათვის არასასურველი შუალედური ნაერთები. ისინი ვერ უზრუნველყოფს Al-Nb(Ta) წყვილებს შორის გარდამავალი ზონის ფუნქციას და უწყვეტი ფირის ფორმირებას, რითაც ორშრიანი დანაფარის მისაღებად კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული ინტერვალი მეტად ვიწრო დიაპაზონით იზღუდება; დადგენილია „ფუძემრე-კონდენსატი“ გარდამავალ ზონაში სპილენძის ნიობატებისა და ტანტალატების სინთეზის ფაქტი; მრავალშრიანი კომპოზიტების ფენებს შორის სასაზღვრო უბნებში გამოვლენილია ელემენტების ურთიერთდიფუზიის ზონები, ხოლო Fe-Nb გარდამავალ ზონაში -  $\text{Fe}_2\text{Nb}$  ნაერთის სინთეზის ფაქტი.

### შედეგების გამოყენების სფერო

შემუშავებული დანაფარები პერსპექტიული მასალაა თანამედროვე მრეწველობისა და ტექნიკის ისეთ დარგებში, როგორცაა ავიამშენებლობა, მანქანათმშენებლობა, სარაკეტო და ბირთვული ტექნიკა, ენერგეტიკა, მედიცინა და სხვა. აღსანიშნავია, რომ ბირთვულ ენერგეტიკაში მნიშვნელოვანი გადასაწყვეტი საკითხია რადიაციული ნარჩენები. World Nuclear Association-ის მონაცემების მიხედვით მსოფლიოში მოქმედი 439 ენერგეტიკული ბირთვული რეაქტორია, რომლებიც უზრუნველყოფს მსოფლიო ელექტროენერჯის დაახლოებით 10%-ს. ყოველწლიურად იზრდება ნარჩენი გამოყენებული საწვავის რაოდენობა, რომელიც მოითხოვს მაღალაქტიური და ხანგრძლივად მდგრადი რადიოაქტიური ნარჩენების უსაფრთხო ტრანსპორტირებას და შენახვას მდგრად საცავებში ბუნებრივად დასაშლელად. აქედან გამომდინარე, ასეთი ნარჩენების კონტეინერები და



მასალები, რომლისგანაც არის ისინი დამზადებული, დიდი ხნის განმავლობაში უნდა უძლებდეს ერთდროულად შენახვის ნოტიო და/ან კოროზიულ ზემოქმედებას. ასევე უნდა ხასიათდებოდეს ნეიტრონებისგან მაქსიმალურად დაცვის უნარით. ამჟამად, ბირთვული ნარჩენების შესანახი და გადასაზიდი კონტეინერების დასამზადებლად ხშირად გამოიყენება ნეიტრონებისგან დაცვის დაბალი უნარის მქონე მასალები – სპილენძი, რკინა, უჟანგავი ფოლადები, ტიტანის, ნიკელის და სხვა შენადნობები. ფუნქციური მახასიათებლების გაზრდის მიზნით აქ შესაძლებელია ჩვენ მიერ მიღებული ტანტალის დანაფარების გამოყენება. ასევე ტანტალის დანაფარების გამოყენება მისაღებია სამედიცინო დანიშნულების ნაკეთობების (პროთეზების, იმპლანტების) დასამზადებლად.

მრეწველობაში, ენერგეტიკაში, სამეცნიერო-კვლევით კომპლექსებსა თუ მედიცინაში დიდი მოთხოვნილებაა ზეგამტარ ზემალალსიხშირულ რეზონატორებზე, რომლებიც უმეტესად სუფთა ნიობიუმისგან მზადდება. თუმცა, ამ დანიშნულებით სულ უფრო მეტ პოპულარობას იძენს სპილენძის ფუძემდებზე ნიობიუმის დანაფარების გამოყენება. ამ მიმართულებით ყველაზე მეტად შესწავლილია მაგნეტრონული დაფრქვევის მეთოდი, რომლითაც მიღებულია რეზონატორები დიდი ელექტრონულ-პოზიტრონული კოლაიდერისა და დიდი ადრონული კოლაიდერისთვის. თუმცა, ამ უკანასკნელთ შედარებით დაბალი სამუშაო მახასიათებლები გააჩნია სუფთა ნიობიუმისგან დამზადებულთან შედარებით. ამის გამო გრძელდება ახალი მეთოდებისა და ტექნოლოგიების შემუშავება ისეთი დანაფარების მისაღებად, რომლებიც თავისი თვისებებით მეტად მიახლოებული იქნება სუფთა ნიობიუმთან. ამ მიმართულებით პერსპექტიული შეიძლება აღმოჩნდეს ვაკუუმურ-თერმული დაფრქვევა ელექტრონულ-სხივური აორთქლებით და უკვე არსებობს მეცნიერთა ჯგუფები, რომლებიც ამ საკითხზე მუშაობენ.

## ნაშრომის მეცნიერული სიახლეები

დადგენილია ალუმინის და სპილენძის ფუძემშრეებზე ძნელდნობადი ლითონების - ნიობიუმისა და ტანტალის ორთქლის ნაკადის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონები, რომლებიც უზრუნველყოფს ფუძემშრესა და კონდენსირებულ დანაფარს შორის საუკეთესო შეჭიდულობის ხარისხს. სპილენძის ფუძემშრეზე ნიობიუმის კონდენსაციის შემთხვევაში იგი შეადგენს 300-500°C, ტანტალის კონდენსაციის შემთხვევაში – 600-750°C. ალუმინის ფუძემშრეზე კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონები საკმაოდ ვიწრო ინტერვალით არის შემოფარგლული და შეადგენს: ნიობიუმისათვის 200–390°C, ტანტალისათვის – 200-320°C;

ფუძემშრებისა და ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარების სტრუქტურულ-გეომეტრიული ფაქტორების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ სპილენძის ფუძემშრესა და ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარებს შორის დამაკმაყოფილებელი შეჭიდულობის ხარისხი განხორციელებულია ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე კოჰერენტული კავშირით. გამოთქმულია ვარაუდი, რომ ალუმინის ფუძემშრესა და ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსირებულ ფაზებს შორის სასაზღვრო ზონაში კავშირი ნახევრადკოჰერენტულია;

შესწავლილია ფუძემშრის ტემპერატურის გავლენა დანაფარების ზედაპირის მორფოლოგიასა და ფაზურ შედგენილობაზე. დადგენილია კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის მიმდინარეობის ფაქტი ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონის ზედა ზღვარს ზემოთ, ჩამოყალიბებული პროდუქტების ბუნება და ფაზური შედგენილობა.

„ფუძემშრე-კონდენსატი“ გარდამავალ ზონაში დადგენილია ნიობატებისა და სპილენძის ტანტალატების სინთეზის ფაქტი. ახსნილია მათი ჩამოყალიბების განმსაზღვრელი პირობები;

შემუშავებული ტექნოლოგიით რთული კონფიგურაციის ალუმინისა და სპილენძის ტექნოლოგიურ ნიმუშებზე მიღებულია ნიობიუმისა და ტანტალის ყოველმხრივი დანაფარები, რომელიც სრულად პასუხობს მათ მიმართ წაყენებულ ყველა ტექნიკურ მოთხოვნილებას.

დადგენილია შემუშავებული ტექნოლოგიით Cu-Ni/Fe/Nb, Cu-Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta და Al-Ni/Fe/Nb მრავალშრიანი დანაფარების მიღების შესაძლებლობა ფენებს შორის დამაკმაყოფილებელი ადჰეზიური თვისებების უზრუნველყოფით. ფენებს შორის სასაზღვრო უბნებში გამოვლენილია ელემენტების ურთიერთდიფუზიის ზონები, ხოლო Fe-Nb გარდამავალ ზონაში - Fe<sub>2</sub>Nb ნაერთის სინთეზის ფაქტი.

მაგნიტური თვისებების შესწავლის შედეგად დადგენილია, რომ Cu-Ni/Fe/Nb და Cu-Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი კომპოზიტები ფერმაგნიტური თვისებებით ხასიათდება, ალუმინის ფუძეზე Ni/Fe/Nb დანაფარი და სპილენძის ფუძეზე Ni/Fe დანაფარი სუპერპარამაგნიტური თვისებებით გამოირჩევა.

### **დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა**

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, სამი თავისა და დასკვნებისაგან. შეიცავს რეზიუმეს, შინაარსს, 26 ნახაზს, 59 სურათს, 11 ცხრილს, ციტირებული ლიტერატურის ნუსხას 89 წყაროს დასახელებით. დისერტაცია წარმოდგენილია 151 A4 ფორმატის ფურცელზე.

### **ნაშრომის აპრობაცია**

კვლევის შედეგები მოხსენებულია შემდეგ კონფერენციებზე:

- Kh.O. Ananiashvili, M.N. Okrosashvili, T.O. Loladze, N.G. Valko. Comparative Analysis of Obtaining Functional Coatings of Refractory Metals on Copper and Aluminum Substrates by the Method of Electron-Beam Technology. 11th International Conference "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation" NEET 2019, 25-28 June, 2019, Zakopane, Poland, ISBN: 978-83-7947-369-4.
- Ананиашвили Х.О., Окросашвили М.Н., Лоладзе Т.О., Валько Н.Г. Рентгенофазовый анализ получения конденсатов ниобия на алюминиевой и медной подложках. პროფესორ ვიქტორ ერისთავის 80 წლისთავისადმი

მიძღვნილი საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“, 11-12 ნოემბერი, 2019. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2019, ISBN 978-9941-8-1875-2.

- Khatia Ananiashvili, Mikheil Okrosashvili, Tamar Loladze, Natalia Valko. Study of Tantalum and Niobium Coatings on Copper Substrates Obtained by Electron-Beam Technology. Proceedings of III International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing PETROCHEMISTRY – 2020, December 2–3, 2020 Minsk, the Republic of Belarus. P. 153-156.

ამ უკანასკნელ კონფერენციაზე ონლაინ მოხსენების გაკეთების შემდეგ ორგანიზატორებმა დამაჯილდოვეს სიგელით „საუკეთესო ზეპირი მოხსენებისთვის სექციაზე“.

### **დისერტაციის ძირითადი შედეგები თავების მიხედვით**

პირველ თავში შესულია ლიტერატურის მიმოხილვა. განხილულია დანაფარების მიღების ძირითადი მეთოდები, მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები. გაშუქებულია დანაფარების მიღების ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიის უპირატესობები სხვა მეთოდებთან მიმართებაში. მოყვანილია ის სფეროები, სადაც გამოიყენება ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგია.

ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიის გამოყენების ერთ-ერთი პერსპექტიული არეალია მრავალშრიანი კომპოზიტების მიღება. აორთქლებისა და კონდენსაციის ტექნიკა პრაქტიკულად შეუზღუდავ შესაძლებლობებს იძლევა მრავალშრიანი მასალების მისაღებად შრეების ნებისმიერი მონაცვლეობით: ლითონი – ლითონი, ლითონი – ოქსიდი, ლითონი – კარბიდი და ა.შ. აღსანიშნავია, რომ თითოეული ფენის სისქე შეიძლება სხვადასხვა იყოს მოცემული დანაფარის ფუნქციურ თავისებურებებზე დამოკიდებულებით.

ზოგ მასალაში შესაძლებელია ზეგამტარობისა და მაგნეტიზმის ერთდროული თანაარსებობა. დღესდღეობით შესაძლებელია ზეგამტარი დანაფა-

რებისთვის მაგნიტური თვისებების მისანიჭებლად მრავალშრიანი დანაფარების წარმოება, რომლებიც გამოყენების ახალ შესაძლებლობებს გვთავაზობს ბირთვულ მაგნიტურ რეზონანსში, მაგნიტო-რეზონანსულ ტომოგრაფიასა და სხვა სამედიცინო მიზნებისთვის. აღსანიშნავია მრავალშრიანი დანაფარის Si/Nb/CuNi/SiO<sub>2</sub>/Nb გამოყენება ციფრულ და კვანტურ სქემებშიც.

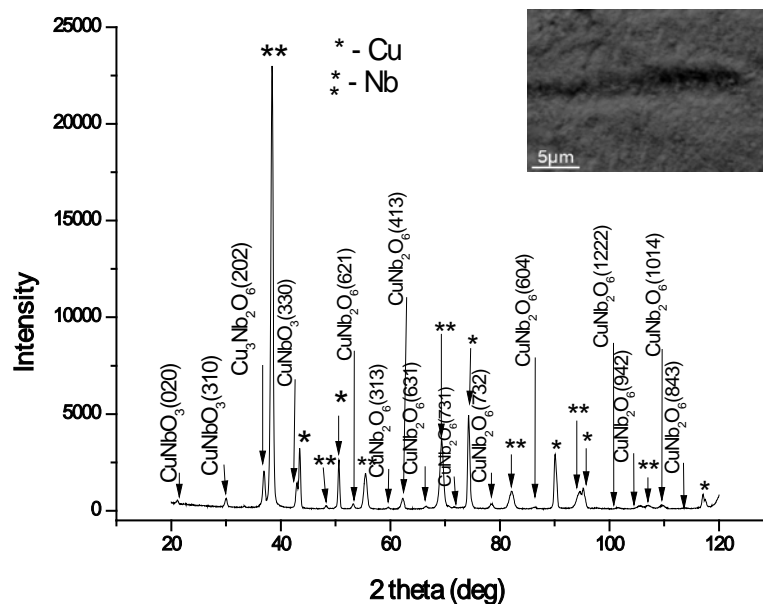
მეორე თავი მოიცავს აპარატურის, საწყისი მასალების, ნიმუშების მიღებისა და კვლევის მეთოდების განხილვას. აღწერილია ელექტრონულ-სხივური დანადგარი, მისი მუშაობის პრინციპი, გრადიენტული ნიმუშების მიღების მეთოდი. ასევე მითითებულია მეტალოგრაფიული, მასკანირებელი ელექტრონულ-მიკროსკოპული, რენტგენოსტრუქტურული და სხვა კვლევის საშუალებები. მოკლედ არის დახასიათებული ფუძემრეებისა და დანაფარების საწყისი მასალების ფიზიკური, ქიმიური, მექანიკური და ტექნოლოგიური თვისებები.

მესამე თავში გაშუქებულია ექსპერიმენტების შედეგები, მისი ანალიზი და განსჯა. გაანალიზებულია Cu-Nb, Cu-Ta, Al-Nb და Al-Ta სისტემების მდგომარეობის დიაგრამები.

ტემპერატურული გრადიენტის მქონე სპილენძის ფუძემრეზე კონდენსირებული ნიობიუმის და ტანტალის დანაფარების კვლევისას დადგენილია, რომ ფუძემრესთან საუკეთესო შეჭიდულობისთვის ნიობიუმის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონი 300-500°C-ს შეადგენს, ხოლო ტანტალის - 650-700°C. აღსანიშნავია, რომ ტანტალის დანაფარის ვიზუალური დაკვირვებით შეინიშნება შეფერილობით განსხვავებული ორი ზონის არსებობა. პირველ, დაბალტემპერატურულ ზონაში (კონდენსაციის ტემპერატურა <370°C), კონდენსატის შეფერილობა მოვერცხლისფროა და ადჰეზიის ხარისხი - მცირე. კონდენსაციის ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად დანაფარი თანდათან მუქ შეფერილობაში გადადის და ~530°C-ის ზემოთ შავი შეფერილობით იცვლება, სადაც ადჰეზიური თვისებები საუკეთესოა. ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით, შეფერილობის შეცვლა უნდა და-

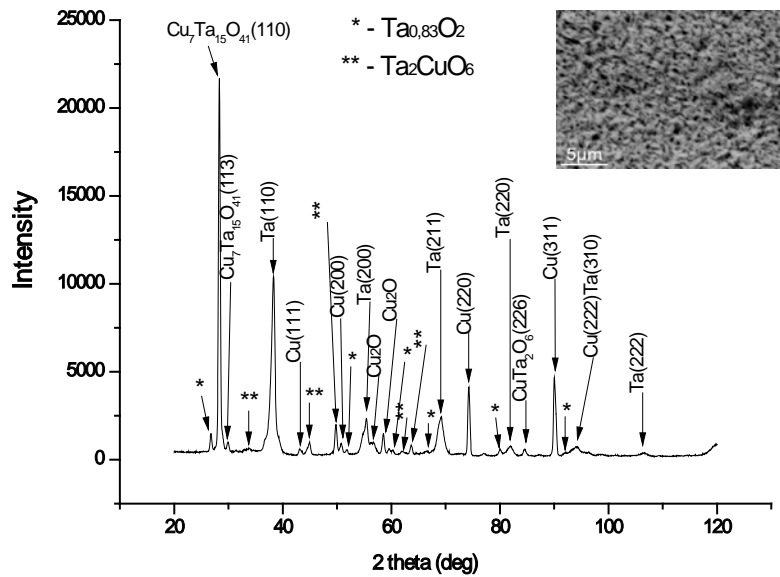
ვაკავშიროთ ორთქლის ფაზიდან ფირთა მიღების ტექნოლოგიის თავისებურებებთან, რაც კონდენსატში არაწონასწორული მდგომარეობის დაფიქსირებას უწყობს ხელს დეფექტების გაზრდილი კონცენტრაციით.

მართალია, Cu-Nb და Cu-Ta წონასწორულ სისტემებში შუალედური ნაერთები არ წარმოიქმნება, მაგრამ, ზუსტი რენტგენოფაზური ანალიზით დანაფარებისა და ფუძემრეების საკმაოდ ძლიერ მაქსიმუმებთან ერთად ჩვენს მიერ გამოძველებულია შესაბამისად, ნიობატების –  $\text{CuNbO}_3$ ,  $\text{CuNb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Cu}_3\text{Nb}_2\text{O}_6$  (ნახ. 1) და ტანტალატების -  $\text{Ta}_2\text{CuO}_6$ ,  $\text{Cu}_7\text{Ta}_{15}\text{O}_{41}$  (ნახ. 2) სხვადასხვა ინტენსივობის მაქსიმუმები, რაც სასაზღვრო ზონაში მათი სინთეზის ფაქტზე მიუთითებს.



ნახ. 1. სპილენძის ფუძემრეზე ნიობიუმის დანაფარის რენტგენოფაზური დიაგრამა და ზედაპირის მიკროსტრუქტურა  $\times 5000$  (ნიობიუმის კონდენსაციის ტემპერატურა  $\sim 500-520^\circ\text{C}$ )

სასაზღვრო ზონაში კომპლექსური ნაერთების ჩამოყალიბების ძირითადი ფაქტორებიდან აღსანიშნავია ტექნოლოგიურ ნაკვეთურში ნარჩენი ჟანგბადის რაოდენობა, რომელიც განსაკუთრებით ინტენსიურად აბსორბირდება გაფრქვეული ძნელდნობადი ლითონების, მოცემულ შემთხვევაში ტანტალისა და ნიობიუმის მიერ და მათთან ქიმიურად ბმულ მდგომარეობაში გადადის. ფუძემრის ზედაპირზე მოხვედრისას კი ხდება ფუძემრის მასალის გააქტიურებაც და მასთან კომპლექსური ნაერთის ჩამოყალიბება. ფაზების



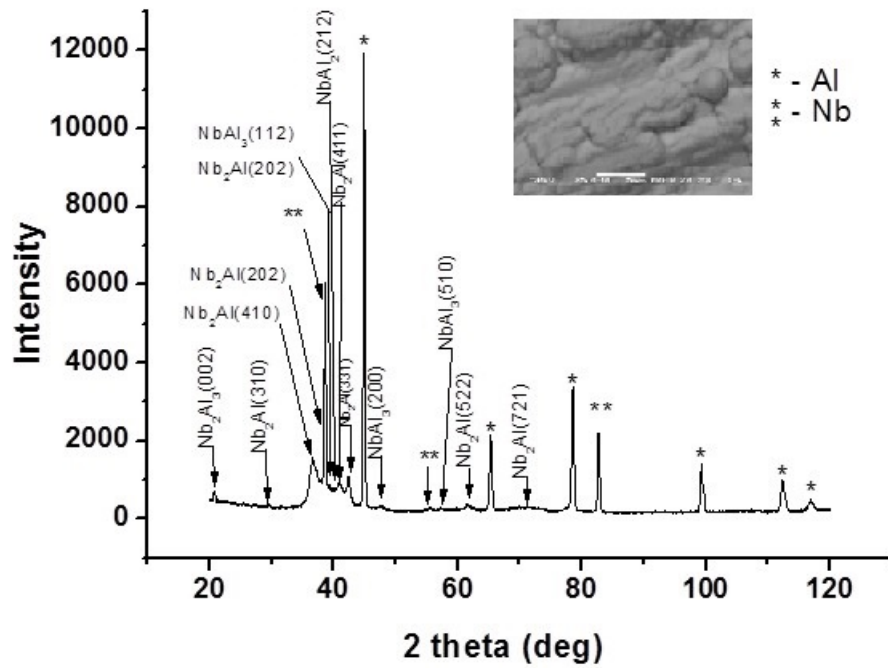
**ნახ. 2. სპილენძის ფუძეშრეზე ტანტალის დანაფარის რენტგენოგრაფიული დიაგრამა და ზედაპირის მიკროსტრუქტურა × 5000 (ტანტალის კონდენსაციის ტემპერატურა ~670°C)**

სტაბილიზაციის ერთ-ერთ მიზეზად შეიძლება ჩაითვალოს გარდამავალი ზონის მცირე სისქე და კონდენსირებული წარმონაქმნების მაღალი დისპერსიულობის ხარისხი.

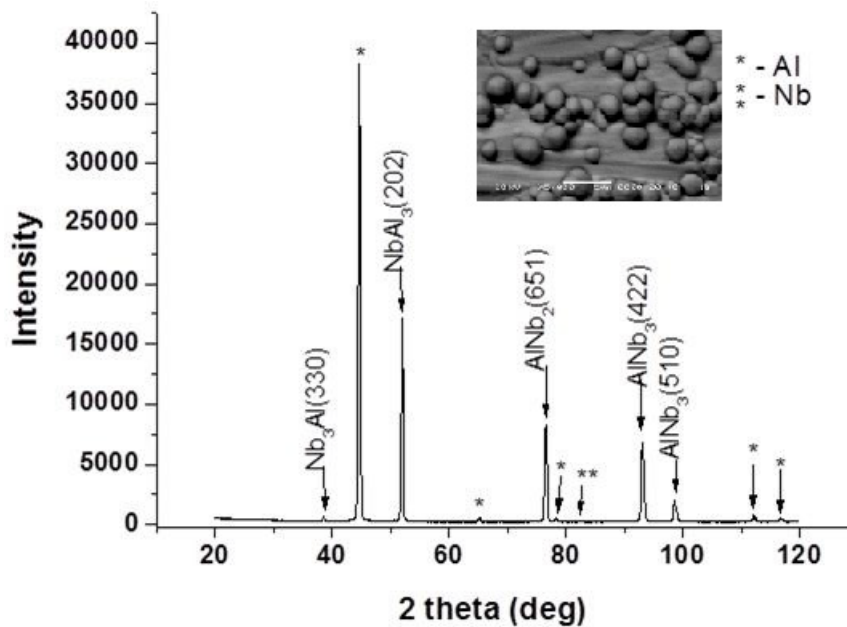
უფრო რთული სიტუაციაა ალუმინის ფუძეშრეზე კონდენსირებულ ნიობიუმისა და ტანტალის ფირებში, რადგან ალუმინი მაღალი აქტივობისაა და Al-Nb და Al-Ta ფაზური მდგომარეობის დიაგრამის მიხედვით შესაძლებელია სისტემაში ინტერმეტალური ნაერთების ჩამოყალიბება.

ალუმინის გრადიენტულ ფუძეშრეებზე კონდენსირებული ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარების კვლევით დადგენილია, რომ კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონები, რომელშიც დანაფარები ფუძეშრესთან საუკეთესო შეჭიდულობით ხასიათდება, ნიობიუმისთვის შეადგენს ~200–390°C, ხოლო ტანტალისთვის - 200–320°C.

როგორც ნიობიუმის, ისე ტანტალის დანაფარებში, ოპტიმალური ტემპერატურის ზედა ზღვარს ზემოთ ადგილი აქვს კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის მიმდინარეობას. რეაქტიული დიფუზიის ზონების კვლევისას ჩვენ მიერ აღმოჩენილია შესაბამისად, NbAl<sub>2</sub>, NbAl<sub>3</sub>, AlNb<sub>2</sub>, Nb<sub>3</sub>Al და Ta<sub>2</sub>Al ინტერმეტალური ნაერთები (ნახ. 3-5).



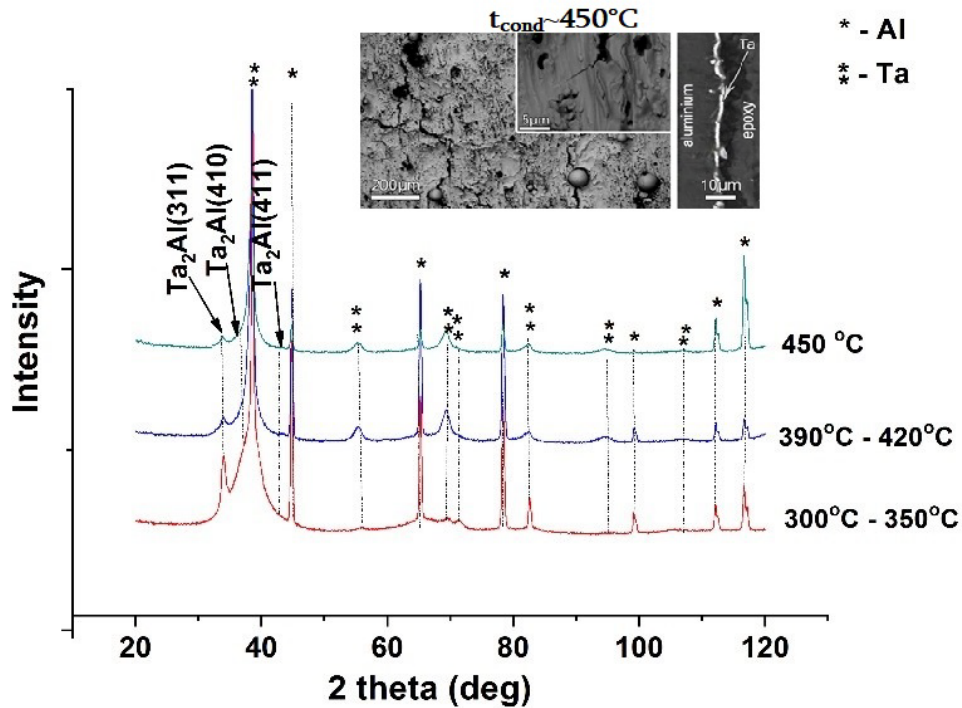
ნახ. 3. ალუმინის ფუბეშრეზე ნიობიუმის დანაფარის რენტგენოფაზური დიაგრამა და ზედაპირის მიკროსტრუქტურა  $\times 5000$  (ნიობიუმის კონდენსაციის ტემპერატურა 390-440°C)



ნახ. 4. ალუმინის ფუბეშრეზე ნიობიუმის დანაფარის რენტგენოფაზური დიაგრამა და ზედაპირის მიკროსტრუქტურა  $\times 5000$  (ნიობიუმის კონდენსაციის ტემპერატურა 480-500°C)

თუ დავუშვებთ, რომ სტრუქტურული ზონების ფარგლებში ფუბეშრის ზედაპირზე ორთქლის ნაკადით მიწოდებული კომპონენტის ინტენსიურობა





ნახ. 5. გრადიენტულ ალუმინის ფუძემდრეზე ტანტალის დანაფარების დიფრაქტოგრამების უბნები. კონდენსაციის ტემპერატურა: 1) – 300–350°C, 2) – 390–420°C, 3)– დაახლოებით 450°C და ზედაპირის მიკროსტრუქტურა. ( $t_{cond} \sim 450^\circ\text{C}$ )

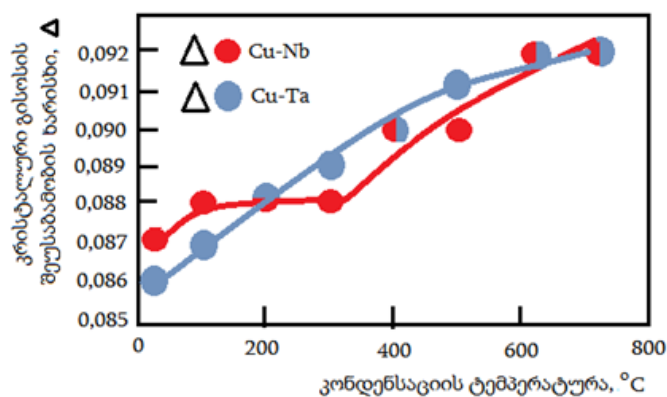
მუდმივია, რეაქტიულ უბნებში ელემენტების განაწილების ასეთი არათანაბარი ხასიათი უნდა დავაკავშიროთ როგორც ფუძემდრის ტემპერატურულ ფლუქტუაციებთან, ისე ორთქლის ფაზიდან კრისტალიზაციისა და ფაზათა წარმოქმნის სპეციფიკურ, არაწონასწორულ პირობებთან.

ორთქლის ნაკადის კონდენსაციის პროცესში „ფუძემდრე–ორთქლის ნაკადი“ ფაზათა გამყოფ საზღვარზე რეალური მდგომარეობა ბევრად უფრო რთული შეიძლება აღმოჩნდეს, რადგან სიტუაცია მუდმივად იცვლება ტექნოლოგიური პარამეტრებისა და კონდენსირებადი ფირის სისქის ცვლილების შესაბამისად. დიდი გადაცივებისა და კრისტალიზაციის არაწონასწორული პირობების გამო შეიძლება წარმოიქმნას არა ერთი, არამედ რამდენიმე არაპროგნოზირებადი მეტასტაბილური ფაზა, რომლებიც კონტროლს არ ექვემდებარება. ფაზათა გამყოფ საზღვარზე ერთმანეთთან ან სხვა რეაგენტებთან ურთიერთქმედების შედეგად მათი წარმოქმნა–გაქრობის პროცესი კიდევ უფრო ართულებს რეალურ მდგომარეობას, რასთანაც შეიძლება დავაკავშიროთ რეაქტიულ ზონაში ელემენტების ასეთი არათანაბარი განაწილება.

ამ მოსაზრებას ადასტურებს ჩვენს მიერ ჩატარებული რენტგენოფაზური ანალიზი.

ერთ-ერთი უმთავრესი ფაქტორი, რომელიც დანაფარის გამოყენების პირობებს და მისი მიღების ტექნოლოგიის შერჩევის სისწორეს განაპირობებს, არის ნაკეთობაში ნარჩენი ძაბვების სიდიდე. მიუხედავად ამისა, ფუძემშრესთან კონდენსირებადი ფაზის შეზრდისათვის უმთავრეს განმსაზღვრელ ფაქტორს, ფუძემშრესა და დანაფარს შორის დამაკმაყოფილებელი ადჰეზიის უზრუნველყოფის თვალსაზრისით, მაინც კრისტალური გისოსების სტრუქტურულ-გეომეტრიული შესაბამისობის ხარისხი უნდა წარმოადგენდეს, რაც, უპირველეს ყოვლისა, გულისხმობს იმ სიბრტყეების გეომეტრიულ მსგავსებას, რომელთა შეზრდაც მიმდინარეობს, ხოლო მათი პერიოდების ფარდობითი განსხვავება არ უნდა აღემატებოდეს 15%:  $\Delta = (a_1 - a_2) / a_1$ , სადაც  $a_1$  არის მასალის კრისტალური გისოსის, ხოლო  $a_2$  – კონდენსირებადი ფაზის კრისტალური გისოსის პერიოდი.

აქედან გამომდინარე, სპილენძის ფუძემშრესა და ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარებს შორის დამაკმაყოფილებელი ადჰეზიის უზრუნველყოფის თვალსაზრისით უმთავრეს როლს უნდა ასრულებდეს კრისტალური გისოსების მსგავსება და მათი პარამეტრების შეუსაბამობის მეტად დაბალი ხარისხი. როგორც ჩვენ მიერ გამოთვლილი მონაცემების მიხედვით აგებული დიაგრამებიდან გამომდინარეობს (ნახ. 6), კონდენსაციის ტემპერატურიდან



ნახ. 6. სპილენძის ფუძემშრისა და ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსატების კრისტალური გისოსების შეუსაბამობის ხარისხი ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით

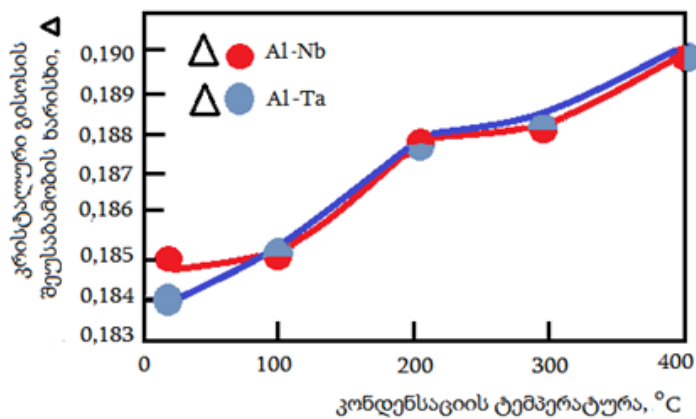
ოთახის ტემპერატურამდე გაცივებისას სპილენძის ფუძეშრესა და ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარებს შორის კრისტალური გისოსის შეუსაბამობის ხარისხი მნიშვნელოვნად მცირდება. შესაბამისად, გამოირიცხება მნიშვნელოვანი ნარჩენი ძაბვების დაგროვება, რაც ფუძეშრესა და დანაფარს შორის დამაკმაყოფილებელ შეჭიდულობას უნდა უზრუნველყოფდეს.

როდესაც კრისტალური გისოსები არ არის სრულად იდენტური, მაგრამ ერთმანეთისგან მცირედ, რამდენიმე პროცენტით განსხვავდება, კონდენსირებული ფირის ფორმირების საწყის სტადიაში კრისტალური გისოსების პერიოდების შეუსაბამობის ნაწილობრივი კომპენსაცია მოსალოდნელია ერთმანეთთან მოსაზღვრე ფაზების კრისტალური გისოსების გარკვეული ხარისხით დრეკადი (კოჰერენტული) დეფორმაციის ხარჯზე განხორციელდეს, რაც გისოსების ურთიერთმისადაგებას შეუწყობს ხელს. ასეთ პირობებში აღძრული დრეკადი ენერჯის სიდიდე ძირითადად ატომთშორისი მანძილების შეუსაბამობის ხარისხზე და კრისტალების დრეკადობის მუდმივებზეა დამოკიდებული.

რადგან ნიობიუმთან და ტანტალთან შედარებით სპილენძის ფუძეშრე უფრო მაღალპლასტიკურია, არ არის გამორიცხული ფსევდომორფიზმის მოვლენის განვითარება, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს დრეკადი დეფორმაციით გამოწვეულ დამაბულობას ფაზათა გამყოფ საზღვარზე.

ამგვარად, 300–500°C ინტერვალში ნიობიუმისა და 600–750°C ინტერვალში ტანტალის სპილენძის ფუძეშრეზე კონდენსაციის პირობებში ექსპერიმენტულად დადგენილი დადებითი ეფექტი განპირობებული უნდა იყოს „ფუძეშრე–კონდენსატი“ ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ფუძეშრესა და კონდენსირებულ ფაზებს შორის კოჰერენტული კავშირით, რაც ოთახის ტემპერატურამდეა შენარჩუნებული. ფუძეშრესა და კონდენსატს შორის დამაკმაყოფილებელი შეჭიდულობის ხარისხს განაპირობებს აგრეთვე ის გარემოება, რომ გაცივების პროცესში კომპოზიტში არ მიმდინარეობს რაიმე სტრუქტურული ან ფაზური გარდაქმნები.

შედარებით რთულ სიტუაციას აქვს ადგილი ალუმინის ფუძემშრეზე ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსაციის პროცესში, რაც ორი ძირითადი მოვლენით არის განპირობებული: ჯერ ერთი, ალუმინის მაღალი ქიმიური აქტიურობის გამო ფუძემშრის ოპტიმალური ტემპერატურის ზედა ზღვარს ზემოთ ინტენსიურად ვითარდება კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის პროცესები, რაც მნიშვნელოვლად ზღუდავს კონდენსირებული ფირის დასმის ოპტიმალურ ტემპერატურულ არეალს და მეორე, აღნიშნულ ინტერვალში ფუძემშრისა და კონდენსირებული ფაზების კრისტალური გისოსების შეუსაბამობის ხარისხი მეტად მაღალია და მნიშვნელოვნად აღემატება ლიტერატურულ წყაროებში მითითებულ ზედა ზღვარს (15%): როგორც მე-7 ნახაზზე წარმოდგენილი დიაგრამებიდან გამომდინარეობს, ოთახის ტემპერატურაზე  $\Delta Al-Nb=0,185$ , ხოლო  $\Delta Al-Ta=0,184$ .



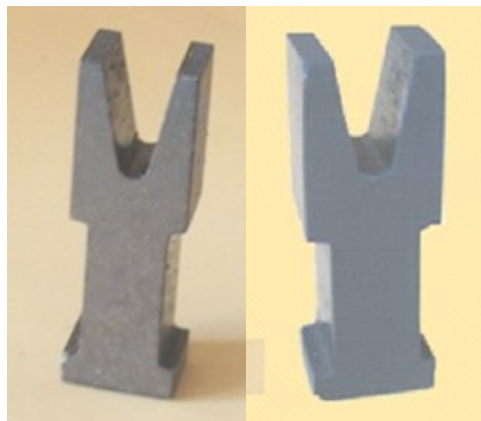
ნახ. 7. ალუმინის ფუძემშრებისა და ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსატების კრისტალური გისოსების შეუსაბამობის ხარისხის დამოკიდებულება კონდენსაციის ტემპერატურაზე

იმ შემთხვევაში, როდესაც ფუძემშრისა და დანაფარის კრისტალური გისოსის პეროდებს შორის განსხვავება მნიშვნელოვანია, გისოსის დრეკადი დამახინჯება გარკვეულ სიდიდემდე განვითარდება და კონდენსირებული ფირის სისქის განუხრელი ზრდის პირობებში ფაზათა შორის საზღვარზე დამაბულობა გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობას მიაღწევს. ასეთ შემთხვევაში, თუ არსებობს დისლოკაციის წყარო, შემოვა შეუსაბამობის დისლოკაცია, რაც ენერგეტიკულად უფრო მომგებიანია და ხელს შეუწყობს დრეკადი

დეფორმაციის დონისა და ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ენერჯის შემდგომ შემცირებას.

ალუმინის ფუძემრეზე ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარების მიღების ოპტიმალური ინტერვალი დაბალტემპერატურულ დიაპაზონს მოიცავს, რაც განაპირობებს ფენებს შორის მკვეთრი ჰეტეროსაზღვრების ჩამოყალიბებას და სტრუქტურული დეფექტების რაოდენობის შემცირებას. ამიტომ ასეთ პირობებში შეუსაბამობის დისლოკაციის ჩამოყალიბების ძირითად მექანიზმად დაცურების მექანიზმი განიხილება, რომელიც უფრო დაბალტემპერატურულ პირობებში რეალიზდება გადაცოცების მექანიზმთან შედარებით.

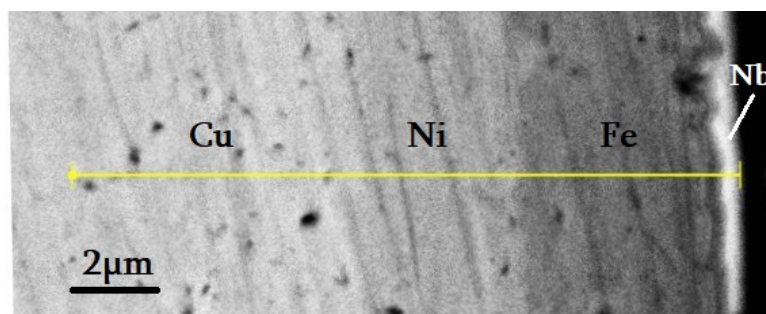
ამგვარად, განხილული მასალის ანალიზი საფუძველს იძლევა დავასკვნათ, რომ ალუმინის ფუძემრეზე 200-390°C ინტერვალში ნიობიუმისა და 200-320°C ინტერვალში ტანტალის კონდენსაციის პირობებში ექსპერიმენტულად დადგენილი დადებითი ეფექტი განპირობებული უნდა იყოს „ალუმინის ფუძემრე-კონდენსატი“ ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ნახევრადკოჰერენტული სასაზღვრო ზონის ჩამოყალიბებით.



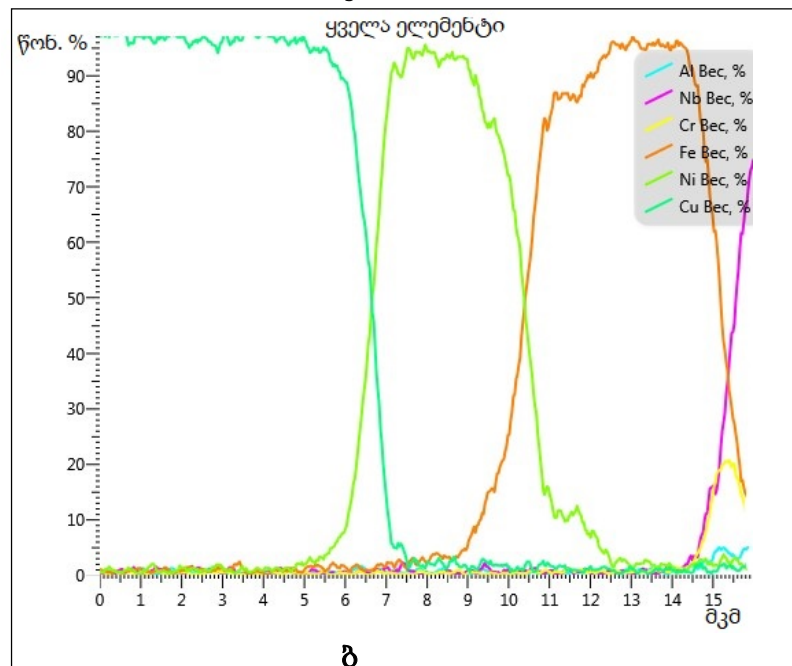
**სურ. 1. ყოველმხრივ დაფარული რთული გეომეტრიული ფორმის ნიმუშები**

ჩვენს მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზისა და მონაცემების განზოგადების საფუძველზე სპილენძისა და ალუმინის რთული გეომეტრიული ფორმის ტექნოლოგიურ ნიმუშებზე მიღებულია ნიობიუმისა და ტანტალის ყოველმხრივი დანაფარები. როგორც მაკროსტრუქტურის ხასიათიდან გამომდინარეობს (სურ. 1), ტექნოლოგიური ნიმუშების დაფარული ზედაპირები საკმაოდ ერთგვაროვანია და არ შეიცავს რაიმე სახის დეფექტებს.

ჩვენ მიერ შემუშავებული ტექნოლოგის გამოყენებით შესწავლილია სპილენძისა და ალუმინის ფუძემდებზე მრავალშრიანი Cu–Ni/Fe/Nb, Al–Ni/Fe/Nb, Cu–Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta და Al–Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta დანაფარების მიღების შესაძლებლობა. მოცემულ ტექნოლოგიურ ციკლში დამატებით გამოიყენებოდა დონეცკის ქიმრეაქტივების ქარხნის მიერ წარმოებული ცირკონიუმის ოქსიდის ფხვნილი მარკით „F“ დაწნებისა და ელექტრონული სხივით გადადნობის შემდეგ, აგრეთვე ელექტრონული სხივით გადადნობილი არმკო რკინისა და H1 ნიკელის ზოდები.



ა



ბ

სურ. 2. სპილენძის ფუძემდებზე კონდენსირებული Ni/Fe/Nb მრავალშრიანი დანაფარი (Ni 4,2 მკმ, Fe 4,8 მკმ, Nb 0,4 მკმ)

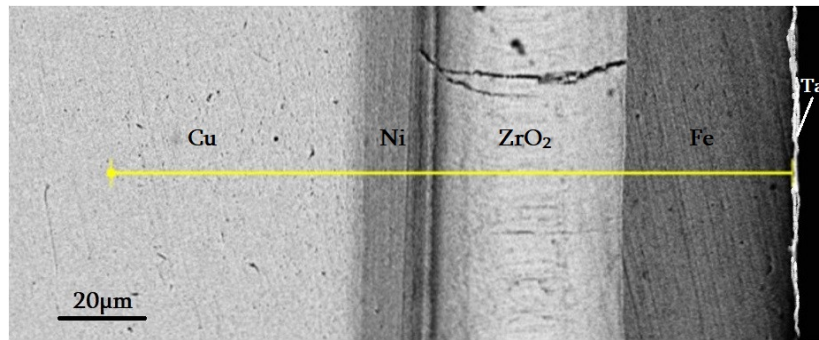
ა) განივი კვეთის მიკროსტრუქტურა

ბ) ქიმიური ელემენტების განაწილება

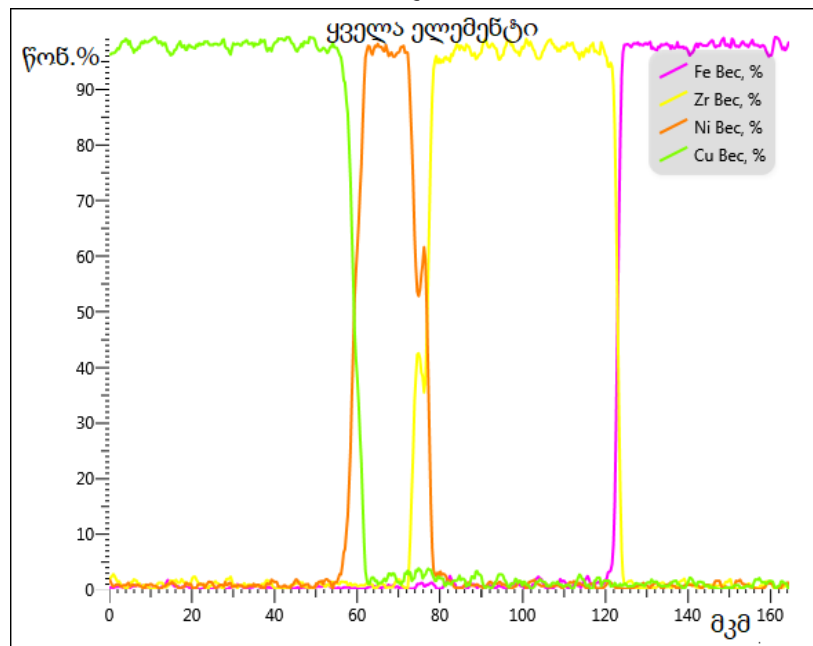
ხარისხოვანი დანაფარია მიღებული სპილენძის ფუძეშრეზე Ni/Fe/Nb შრეების (500-520°C კონდენსაციის ტემპერატურულ დიაპაზონში) კონდენსაციით. მე-2 სურათზე მოცემულია სპილენძის ფუძეშრეზე კონდენსირებული Ni/Fe/Nb მრავალშრიანი დანაფარის კვეთის ერთ-ერთი მიკროუბნის მიკროსტრუქტურა (ა) და ამ უბანზე გამჭოლი ხაზის გასწვრივ, ნიმუშის სიღრმეში (ათვლის წერტილიდან - 16 მკმ) ქიმიური ელემენტების განაწილების ხასიათი (ბ), სადაც ფიქსირდება როგორც სპილენძი, ასევე დანაფარის სამივე ელემენტი (Ni, Fe, Nb) სხვადასხვა ოდენობით სიღრმის ცვლილებაზე დამოკიდებულებით. ასევე აღინიშნება უმნიშვნელო რაოდენობით Al და Cr შემცველობა, რომლებიც სავარაუდოდ დანაფარში მოხვდა მიკროსკოპის დაბინძურებული ელექტრონულ-ოპტიკური სისტემიდან. როგორც გამომდინარეობს მე-2 (ა) სურათის ხასიათიდან, რკინისა და ნიობიუმის სასაზღვრო ზონაში შეინიშნება გამოკვეთილი, მუქი შეფერილობის ზოლი (~0,6 მკმ). უნდა ვივარაუდოთ, რომ ამ ზონაში მიმდინარეობს ფაზური გარდაქმნა Fe<sub>2</sub>Nb ინტერმეტალური ნაერთის წარმოქმნით. ამ ვარაუდს ამყარებს დიფრაქციული ანალიზით გამოვლენილი, როგორც სპილენძის (ფუძეშრე), ისე Fe<sub>2</sub>Nb შუალედური ნაერთის, ნიკელის, რკინისა და ნიობიუმის მაქსიმუმები. საყურადღებოა აგრეთვე აღნიშნულ უბანში ქიმიური ელემენტების განაწილების ანალიზის შედეგებიც. კერძოდ, 14.846 მკმ-ზე, რკინის შემცველობა შემცირებულია 71.04 %-მდე, ხოლო ნიობიუმის რაოდენობამ 14.55 % შეადგინა. ნიობიუმის შემცველობა თანდათან იზრდება რკინის რაოდენობის შემცირებასთან ერთად. ანალიზის შედეგების ბოლო წერტილში ნიობიუმის მაქსიმალური რაოდენობა - 78.06% ფიქსირდება 15.906 მკმ-ზე. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ნიობიუმის დანაფარის ზედაპირთან მახლობელ ფენებში რკინის კონცენტრაცია არ არის საკმარისი თერმოდინამიკურად სტაბილური Fe<sub>2</sub>Nb შუალედური ნაერთის სინთეზისათვის, ამიტომ ეს ზონა უნდა განვიხილოთ ელემენტების ურთიერთდიფუზიის შედეგად ჩამოყალიბებულ ზონად, რაც არ არის გამორიცხული ორთქლის ფაზიდან კონდენსაციის ტექნოლოგიური პროცესებისათვის. უფრო მეტიც, ასეთ პირობებში კომპონენტების

ხსნადობის ზღვარის გაზრდაც კი შეინიშნება. 2, ბ) სურათზე მოყვანილი მრუდების ქვედა უბნები ასევე მიუთითებს როგორც სპილენძისა და ნიკელის, ისე ნიკელისა და რკინის ატომების ურთიერთშერევის უბნებზე.

მიღებულია სპილენძის ფუძემდებზე Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი დანაფარი (510-590°C კონდენსაციის ტემპერატურულ დიაპაზონში). ფენებს



ა



ბ

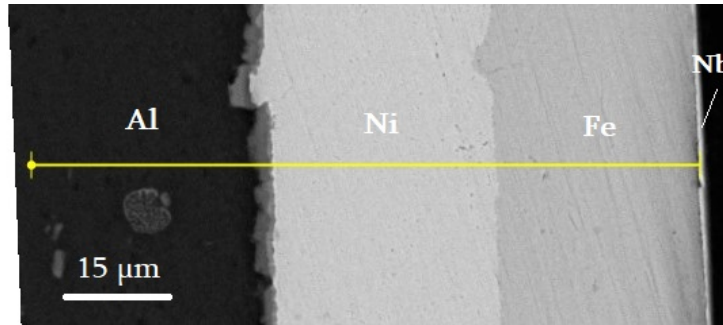
**სურ. 3. სპილენძის ფუძემდებზე კონდენსირებული Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი დანაფარი**  
 ა) განივი კვეთის მიკროსტრუქტურა  
 ბ) ქიმიური ელემენტების განაწილება

შორის არ შეინიშნება რაიმე სახის დეფექტის – განშრევის ან ფორების არსებობა, რაც ჩვენს მიერ შემუშავებული ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიით ხარისხოვანი მრავალშრიანი დანაფარების მიღების შესაძლებლობაზე მიუთითებს. მასკანირებელი ელექტრონული მისკოპით მიღებულ განივი კვეთის მიკროსტრუქტურისა (სურ. 3, ა) და ქიმიური ელემენტების



განაწილების მრუდების განხილვისას (სურ. 3, ბ) მრუდების ურთიერთკვეთით შექმნილი არეები მოცემულ შემთხვევაშიც მიუთითებს შესაბამისი კომპონენტების ატომების ურთიერთშერევით ჩამოყალიბებული დიფუზური ზონების არსებობაზე. რენტგენოფაზური ანალიზით გამოვლენილია როგორც ფუძემშრის (Cu), ისე დანაფარის შრეების მაქსიმუმები, აგრეთვე არასტექიომეტრიული  $Ta_{0.8}O_2$  ნაერთის სუსტი მაქსიმუმები.  $Ta_{0.8}O_2$  ნაერთის ჩამოყალიბება უნდა დავაკავშიროთ არაერთ ფიზიკო-ტექნოლოგიურ ფაქტორთან, რომელიც ხელს უწყობს არაწონასწორული მდგომარეობის ფიქსირებას კონდენსირებულ ფირებში. ორთქლფაზურ ტექნოლოგიაში პირველხარისხოვანი როლი ენიჭება დანადგარის ტექნოლოგიურ ნაკვეთურში ნარჩენი აირების შედგენილობას და წნევას კონდენსატის ფორმირების პროცესში. როგორც ცნობილია, ნაკვეთურში ნარჩენი ჟანგბადი განსაკუთრებით ინტენსიურად აბსორბირდება გაფრქვეული ძნელდნობადი ლითონების, მოცემულ შემთხვევაში ტანტალის მიერ და მასთან ქიმიურად ბმულ მდგომარეობაში გადადის. ჩამოყალიბებული ფრაგმენტები შემდგომში ამოიქოლება მზარდი ფირის მოცულობაში და ამუხრუჭებს სტრუქტურის წონასწორულ მდგომარეობაში გადასვლას. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ არ დაფიქსირდა წონასწორულ სისტემაში ცნობილი  $TaFe_2$  ქიმიური ნაერთი. ამიტომ, როგორც გამომდინარეობს ქიმიური ელემენტების განაწილების მრუდების ხაიათიდან, მოცემულ შემთხვევაშიც ხდება მათი ურთიერთგადაფარვა, რაც კომპონენტების ატომების ურთიერთდიფუზიის მიმდინარეობის ფაქტზე მიუთითებს სუფთა ნიობიუმის ფენის გარკვეული სისქის შთანთქმის ხარჯზე.

უდეფექტო სტრუქტურაა მიღებული აგრეთვე ალუმინის ფუძემშრეზე Ni/Fe/Nb ( $220-340^{\circ}C$  კონდენსაციის ტემპერატურულ დიაპაზონში). მასკანირებელი ელექტრონული მისკოპით მიღებულ განივი კვეთის მიკროსტრუქტურისა (სურ. 4) და ქიმიური ელემენტების განაწილების მრუდების განხილვისას ფუძემშრესა (Al) და ნიკელის დანაფარს შორის საზღვარზე შეიმჩნევა ცვალებადი სისქის მკვეთრად გამოყოფილი შუალედური შრე, რომლის

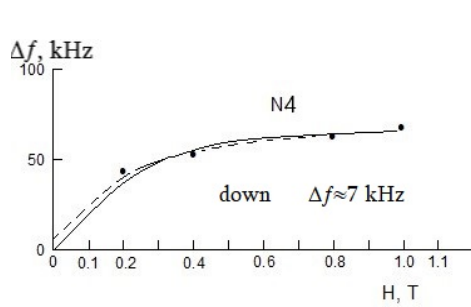


სურ. 4. ალუმინის ფუბეშრეზე კონდენსრებული Ni//Fe/Nb მრავალშრიანი დანაფარის განივი კვეთის მიკროსტრუქტურა

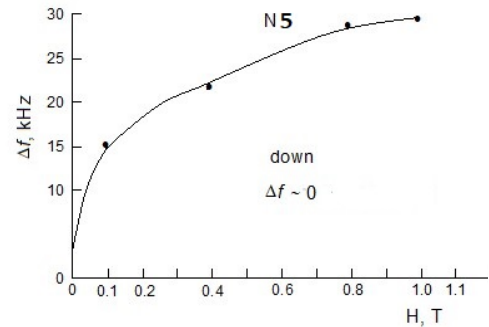
შედგენილობა იცვლება ანალიზის წერტილის ადგილმდებარეობის მიხედვით. Al-Ni შენადნობთა ფაზური მდგომარეობის დიაგრამაზე დაყრდნობით, მოცემულ სისტემაში შესაძლებელია NiAl, Al<sub>3</sub>Ni, Ni<sub>3</sub>Al, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> და Al<sub>3</sub>Ni<sub>5</sub> ინტერმეტალური ნაერთების წარმოქმნა. აღნიშნული ნაერთებიდან Al<sub>3</sub>Ni ხასიათდება მუდმივი შემადგენლობით (~24 ატ%), ხოლო დანარჩენები - ჰომოგენობის უბნებით. თუმცა, მრავალშრიანი დანაფარის რენტგენოფაზური ანალიზით გამოვლენილია მხოლოდ Fe<sub>2</sub>Nb შუალედური ნაერთის მაქსიმუმი რკინისა და ნიობიუმის გარდამავალ ზონაში. აქედან გამომდინარე, უნდა ვივარაუდოთ, რომ Al-Ni შრეების გარდამავალ ზონაში კომპონენტების კონცენტრაცია არ აკმაყოფილებს ქიმიური ნაერთის წარმოქმნის პირობებს და იგი უნდა განვიხილოთ, როგორც კომპონენტების ატომების ურთიერთდიფუზიის შედეგად ჩამოყალიბებული ზონა.

ალუმინის ფუბეშრეზე Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta მრავალშრიანი დანაფარის მიღების პროცესში დადებითი შედეგი ვერ იქნა მიღებული. ნიმუშის გაციების პროცესში მოხდა კონდენსირებული ცირკონიუმის ოქსიდის შრის პრაქტიკულად სრული თავისთავადი აშრევება ნიკელის ქვეშრიდან. ამ მიმართულებით აღნიშნულ წყვილზე ჩვენი ექსპერიმენტები შევწყვიტეთ, რადგან ეს არ იყო გათვალისწინებული მოცემული კვლევის ამოცანებით და იგი დამატებით შესწავლას მოითხოვს.

მრავალშრიანი დანაფარების მაგნიტური თვისებების რადიოსიხშირული რეზონანსული მაგნეტომეტრიის უკანტაქტო მეთოდით შესწავლისას დადგენილია, რომ სპილენძის ფუძემრეზე Ni/Fe/Nb და Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta (ნახ. 8) დანაფარებს ფერომაგნიტური თვისებები ახასიათებს, ხოლო ალუმინის ფუძემრეზე Ni/Fe/Nb (ნახ. 9) და სპილენძის ფუძემრეზე Ni/Fe დანაფარები სუპერპარამაგნიტური თვისებებით გამოირჩევა.



**ნახ. 8. Cu (ფუძემრე) /Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta დანაფარში სიხშირის ცვლილების დამოკიდებულება გარე მაგნიტურ ველზე**



**ნახ. 9. Al (ფუძემრე)/Ni/Fe/Nb დანაფარში სიხშირის ცვლილების დამოკიდებულება გარე მაგნიტურ ველზე**

აღსანიშნავია, რომ მრავალფენოვან დანაფარებში ფერომაგნიტური ან სუპერპარამაგნიტური თვისებები დამოკიდებულია არა მარტო ცალკეული დანაფარის მაგნიტურ თვისებაზე, არამედ მათ სისქესა, ან მათი შემადგენელი მარცვლების დისპერსიულობის ხარისხზე. ჩვენი ნიმუშების შემთხვევაში საინტერესო საკითხია სპილენძის ფუძემრეზე Ni/Fe დანაფარის სუპერპარამაგნიტურობა, ხოლო მასზე Nb-ის თხელი ფენის დამატებით ფერომეგნიტური თვისების შექმნა. შესაბამისად, ამ მიმართულებით კვლევები გრძელდება. „მეცნიერება არ არის და არც არასდროს იქნება დასრულებული წიგნი. ყველა მნიშვნელოვან წარმატებას ახალი კითხვები მოაქვს. ყოველი განვითარება დროთა განმავლობაში ახალ და უფრო ღრმა სირთულეებს ავლენს“.

/ა. აინშტაინი/

## დასკვნა

ჩატარებული სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაო საშუალებას იძლევა გაკეთდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

- პირველად მაკრო და მიკროსტრუქტურული მონაცემების განზოგადების საფუძველზე დადგენილია ალუმინის და სპილენძის ფუძემშრეებზე მნელდნობადი ლითონების - ნიობიუმის და ტანტალის ორთქლის ნაკადის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონები, რომელიც უზრუნველყოფს ფუძემშრესა და დანაფარს შორის დამაკმაყოფილებელ შეჭიდულობის ხარისხს. სპილენძის ფუძემშრეზე ნიობიუმის კონდენსაციის შემთხვევაში იგი შეადგენს  $300-500^{\circ}\text{C}$ , ტანტალის კონდენსაციის შემთხვევაში -  $600-750^{\circ}\text{C}$ . დაზუსტებულია ალუმინის ფუძემშრეზე ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონები, რომელიც შესაბამისად შეადგენს  $200-390^{\circ}\text{C}$  და  $200-320^{\circ}\text{C}$ ;
- პირველად შესწავლილია ფუძემშრის ტემპერატურის გავლენა ნიობიუმისა და ტანტალის დანაფარების ზედაპირის მორფოლოგიასა და ელემენტების განაწილების ხასიათზე. გამოვლენილია კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის მიმდინარეობის ფაქტი ალუმინის ფუძემშრეზე როგორც ნიობიუმის, ისე ტანტალის კონდენსაციის ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონის ზედა ზღვარს ზემოთ.
- დადგენილია ალუმინის ფუძემშრეზე კონდენსაციით სტიმულირებული რეაქტიული დიფუზიის პროდუქტების ბუნება და ფაზური შედგენილობა. Al-Nb კომპოზიტში ფაზური ანალიზით პირველად არის გამოვლენილი როგორც სისტემაში ცნობილი  $\text{AlNb}_2$ -ის და  $\text{AlNb}_3$ -ის, ისე  $\text{Nb}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NbAl}_2$  და  $\text{NbAl}_3$  ფაზების არსებობა. Al-Ta კომპოზიტის გარდამავალ ზონაში გამოვლენილია  $\text{Ta}_2\text{Al}$  ინტერმეტალური ფაზის სინთეზის ფაქტი;
- „სპილენძის ფუძემშრეზე - ნიობიუმის დანაფარი“ გარდამავალ ზონაში ფაზური ანალიზით პირველად არის გამოვლენილი როგორც სპილენძის ცნობილი,  $\text{CuNbO}_3$  და  $\text{CuNb}_2\text{O}_6$ , ისე არასტექიომეტრიული  $\text{Cu}_3\text{Nb}_2\text{O}_6$  ნიობატები, ხოლო „სპილენძის ფუძემშრეზე - ტანტალის დანაფარი“ გარდამავალ

ზონაში - ტანტალატები  $Ta_2CuO_6$  და  $Cu_7Ta_{15}O_{41}$ . ახსნილია აღნიშნული ნაერთების სინთეზის განმსაზღვრელი პირობები;

➤ ფუძემრეებისა და კონდენსატების სტრუქტურულ-გეომეტრიული ფაქტორების გამოთვლის შედეგების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ სპილენძის (ფუძემრე), ნიობიუმისა და ტანტალის (კონდენსატები) კრისტალური გისოსების შეუსაბამობის ხარისხი უმნიშვნელოა, რაც ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე კოჰერენტულ კავშირს და ფუძემრესა და დანაფარს შორის დამაკმაყოფილებელ შეჭიდულობის ხარისხს განაპირობებს. გამოთქმულია ვარაუდი, რომ ალუმინის ფუძემრესა და ნიობიუმისა და ტანტალის კონდენსირებულ ფაზებს შორის კი სასაზღვრო ზონაში კავშირი ნახევრად-კოჰერენტულია.

➤ შემუშავებულია რთული კონფიგურაციის სპილენძისა და ალუმინის ნიმუშებზე ნიობიუმისა და ტანტალის ყოველმხრივი დანაფარების დასმის ტექნოლოგია ერთ ტექნოლოგიურ ციკლში. მიღებულია ტექნოლოგიური ნიმუშები, რომლებიც მათ მიმართ წაყენებულ ყველა ტექნიკურ მოთხოვნას აკმაყოფილებს.

➤ დადგენილია ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიით სპილენძის ფუძემრეზე  $Ni/Fe/Nb$  და  $Ni/ZrO_2/Fe/Ta$ , ხოლო ალუმინის ფუძემრეზე –  $Ni/Fe/Nb$  მრავალშრიანი დანაფარების მიღების შესაძლებლობა. შესწავლილია განივი კვეთის მიკროსტრუქტურა და ელემენტების განაწილების ხასიათი განივ კვეთში. ფენებს შორის სასაზღვრო უბნებში გამოვლენილია ელემენტების ურთიერთდიფუზიის ზონები, ხოლო  $Fe-Nb$  გარდამავალ ზონაში -  $Fe_2Nb$  ნაერთის სინთეზის ფაქტი.

➤ მრავალშრიანი დანაფარების მაგნიტური თვისებების კვლევის შედეგად დადგენილია, რომ სპილენძის ფუძემრეზე  $Ni/Fe/Nb$  და  $Ni/ZrO_2/Fe/Ta$  დანაფარებს ფერომაგნიტური თვისებები ახასიათებს, ხოლო ალუმინის ფუძემრეზე  $Ni/Fe/Nb$  და სპილენძის ფუძემრეზე  $Ni/Fe$  დანაფარები სუპერპარამაგნიტური თვისებებით გამოირჩევა.

**სადისერტაციო ნაშრომთან დაკავშირებული შრომების სია:**

1. ხ. ანანიაშვილი, მ. ოქროსაშვილი, თ. ლოლაძე. სპილენძის ფუძემრეზე ნიობიუმის და ტანტალის დანაფარების მიღების ტექნოლოგია. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, №3(513), თბილისი, 2019, გვ. 98-110.
2. Ananiashvili X.O., Okrosashvili M.H., Loladze T.O., Valko H.G. Рентгенофазовый анализ конденсатов ниобия на алюминиевой подложке. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორ ვიქტორ ერისთავის 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება“ შრომები. თბილისი 2020. გვ. 37-42.
3. Khatia Ananiashvili, Mikheil Okrosashvili, Tamar Loladze, Natalia Valko, Tomasz N. Koltunowicz. Structure and Properties of Tantalum Coatings Obtained by Electron Beam Technology on Aluminum Substrates. Applied Sciences, 2020, Volume 10, Issue 11, 3737. MDPI, Basel, Switzerland. P. 8. <https://doi.org/10.3390/app10113737>.
4. ანანიაშვილი ხ.ო. ალუმინის ფუძემრეებზე ელექტრონულ-სხივური ტექნოლოგიით მიღებული ტანტალისა და ნიობიუმის დანაფარების კვლევა. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. №2 თბილისი 2020. გვ 74-78.

კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [PHDF-18-736, სპეციალური დანიშნულების ფუძემრეზე ფუნქციონალური დანაფარების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება]. / This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG) [PHDF-18-736, “Development of the Technology for Obtaining Functional Coatings on the Special Substrate”].

## Abstract

In the modern era, with the development of industry, innovative materials are created and state-of-the-art technologies are developed. In this regard, the methods of depositing coatings of different materials on the surface of products are noteworthy, which leads to the improvement of the performance characteristics of the products. With electron-beam technology it is possible to obtain coatings on any material, including refractory metals, with good adhesion to the substrate.

The work is devoted to the development of technology for producing coatings of refractory metals - niobium and tantalum on copper and aluminum substrates, by evaporating the starting material with an electron beam and subsequent condensation of the vapor stream. To study the structures and properties of vacuum coatings, depending on the substrate temperature, the vapor stream was condensed on substrates with gradient temperature of 100-600°C. Macro- and microstructures of the coating surface and cross-section of the samples, as well as phase composition of various temperature zones of condensation have been studied.

When analyzing the possibilities of obtaining niobium and tantalum coatings, it is necessary to consider that intermediate compounds are formed in the Al-Nb and Al-Ta system, which will have a significant impact on the adhesion properties between the substrate and the condensate. In contrast to the above said, at high temperatures, the solubility of niobium in copper is insignificant in Cu-Nb and Cu-Ta, and inter-metallic compounds are not formed between them. Therefore, such a relationship will have a significant impact on the phase composition of the condensate and adhesion to the substrate.

It was established experimentally that above the temperature of 320-350°C, intensive development of reactive-diffusion process begins at the interface of the “substrate-vapor stream” phase, and the condensate is separated from the substrate. The best adhesion of niobium and tantalum condensates to an aluminum substrate is limited to a narrow temperature range, good adhesion is achieved at 200-390°C and at 200-320°C, respectively.

As for the coatings on the copper substrate, the temperature range for the above refractory metals is expanded and is 300-500°C and 600-750°C for niobium and tantalum condensates respectively. It is ascertained that for ensuring sufficient adhesion between copper substrate and the niobium and tantalum coatings the main factor is structural-geometric conformity of crystalline lattices; experimentally defined positive effects should be based on formation of coherent or semi-coherent border zone between the substrate and condensed phase on the "substrate-condensate" phase separation surface, maintained till room temperature. High quality of cohesion between the substrate and the coating will undoubtedly be promoted by the fact that phase and structural transformations do not occur in the substrate or in the condensed films while cooling.

The nature and phase composition of condensation-stimulated reactive diffusion products on the aluminum substrate are established. The presence of both known  $\text{AlNb}_2$  and  $\text{AlNb}_3$  in the system, as well as  $\text{Nb}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NbAl}_2$  and  $\text{NbAl}_3$  phases, is first investigated by phase analysis in Al-Nb composite. The fact of synthesis of  $\text{Ta}_2\text{Al}$  intermetallic phase has been revealed in the transition zone of Al-Ta composite; In the transition zones "copper substrate - niobium coating" and "copper substrate - tantalum coating" phase analysis reveals the niobates  $\text{CuNbO}_3$ ,  $\text{CuNb}_2\text{O}_6$  and  $\text{Cu}_3\text{Nb}_2\text{O}_6$  and tantalates  $\text{Ta}_2\text{CuO}_6$  and  $\text{Cu}_7\text{Ta}_{15}\text{O}_{41}$  respectively. The defining conditions for the synthesis of these compounds are explained.

The technology for elaboration of all-round coatings of niobium and tantalum on complex copper and aluminum specimens in a single technological cycle has been developed. Technological samples obtained meet all the technical requirements.

The possibility of obtaining Ni/Fe/Nb and Ni/ZrO<sub>2</sub>/Fe/Ta multilayer coatings on copper substrate and Ni/Fe/Nb multilayer coating on aluminum substrate is investigated. The microstructure of the cross-section and the character of the distribution of elements and magnetic properties of the specimens are studied.