

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ბაგრატ გოდიბაძე

ნანოსტრუქტურული Cu – W კომპოზიციის ნამზადების მიღების
ტექნოლოგიის შემუშავება და მათი ფიზიკო - მექანიკური,
ელექტრული თვისებების კვლევა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის მეტალურგიის,
მასალათმცოდნეობისა და ლითონების დამუშავების დეპარტამენტში და
სსიპ გრიგორ წულუკიძის სამთო ინსტიტუტში

ხელმძღვანელები:

ტ.მ.დ., სრული პროფესორი მიხეილ ოქროსაშვილი _____

აკადემიური დოქტორი აკაკი ფეიქრიშვილი _____

რეცენზენტები: -----

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და
მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. დღეისათვის მსოფლიოს თითქმის ყველა განვითარებული ქვეყნის მკვლევარის ყურადღების ცენტრშია მოქცეული ფოროვანი და კონდენსირებული მასალების ქცევის შესწავლა მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. ასეთი გაზრდილი ინტერესი ძირითადად განაპირობა ახალი, თვისებათა უნიკალური შეხამების (მაღალი სიმტკიცის, პლასტიკურობის, ცვეთამდეგობის, კოროზიამდეგობის, დაბალი ტოქსიკურობის) მქონე მასალების ძიებამ, რაც აუცილებელია ტექნიკისა და მრეწველობის მრავალი დარგის შემდგომი განვითარებისათვის.

ფხვნილთა მეტალურგიის განვითარებამ განაპირობა ძირეული ძვრები სამრეწველო წარმოებაში. ბოლო ხანებში გაჩნდა ახალი მიმართულებები, რომლებიც დაკავშირებულია თითქმის უფრო მასალის წარმოებასთან, რომლებიც არ შეიცავენ მინარევებს და სტრუქტურულად ნაკლებად არიან დამახინჯებული. ფართოდ ვითარდება აგრეთვე ისეთი მასალების მიღების ტექნოლოგიები, როგორცაა: ფრიქციული, ანტიფრიქციული, გამფილტრავი (ფოროვანი), შემაკავშირებელი, ცვეთამდეგი მასალები და ნაკეთობები, რომლებიც მუშაობენ დიდ დატვირთვებზე ტემპერატურის ფართო ინტერვალში, სხვადასხვა აგრესიულ გარემოში და ზემოდალ ვაკუუმში.

ტექნოლოგიური პროცესების რაციონალური მართვით შეიძლება წინასწარ დასახული ქიმიური შედგენილობის და სტრუქტურის მქონე მასალებისა და ნაკეთობების მიღება. ამის ნათელი მაგალითია ფხვნილთა მეტალურგიით წარმოებული სწრაფმჭრელი ფოლადები და შენადნობები, მხურვალგამძლე შენადნობები, მაღალი სიმტკიცის საიარაღო მასალები და ა.შ. მათში რეალიზებული თვისებების მიღწევა პრაქტიკულად შეუძლებელია მეტალურგიული წარმოების ტრადიციული მეთოდებით. გარდა ამისა, ფხვნილთა მეტალურგიის ძირითადი უპირატესობა ტრადიციულ ტექნოლოგიებთან შედარებით მასალების მცირე დანაკარგებით განისაზღვრება.

არაერთ უპირატესობასთან ერთად ფხვნილთა მეტალურგიაში გამოყენებული იზოსტატიკური ცხელი დაწნეხის მეთოდები ხასიათდებიან გარ-

კვეული ნაკლოვანებითაც, რომელთაგან ძირითადია შეცხოვის პროცესის ხანგრძლივობა და ძვირადღირებული წნეხების გამოყენების აუცილებლობა.

გაცილებით უფრო მაღალი წნევის მიღება შეიძლება დინამიკური მეთოდის რეალიზაციით, როდესაც ენერგომატარებლად ფეთქებადი მასალები გამოიყენება. ამავე დროს შეიძლება გამოყენებული იქნეს დარტყმითი ტალღის დატვირთვის სხვადასხვა სქემა, რომლებიც სხვადასხვანაირად აისახება ფოროვანი და კონდენსირებული მასალების თვისებებზე. დღეისათვის მსოფლიოს თითქმის ყველა განვითარებული ქვეყანა (ამერიკა, ინგლისი, საფრანგეთი, იაპონია, გერმანია და სხვა) მასალების წნევით დამუშავებისას აფეთქების ენერგიას იყენებს. კვლევები ფხვნილოვანი მასალების კომპაქტირებისათვის აფეთქების ენერგიის გამოყენების მიმართულებით ამერიკელი მეცნიერების მიერ არის დაწყებული. სწორედ მათ დაუდეს სათავე ამ ტექნოლოგიის წარმოებაში დანერგვას. ყოფილ საბჭოთა კავშირს ერთ-ერთი წამყვანი როლი ეკუთვნის ამ სფეროში.

ლითონების აფეთქებით განმტკიცება და შედუღება ფართოდ გამოიყენება მრეწველობის სხვადასხვა დარგში ნაკეთობათა საექსპლოატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესებისათვის. აღნიშნული დარგის შემდგომი განვითარების ტემპს დიდად განსაზღვრავს პროცესის თეორიული საფუძვლების მეცნიერულად დამუშავება, რაც მყარ საფუძველს დაუდებს ახალი ტექნოლოგიების შემუშავებას და ისეთი დამატებითი მახასიათებლების განსაზღვრას, რომლებიც შესაძლებელს გახდის რაოდენობრივად შეფასდეს მასალის გამტკიცების ეფექტი და მისი განაწილების ხასიათი ნაკეთობის მოცულობაში. ტექნოლოგიამ უნდა განაპირობოს ასევე ნაკეთობის დეფორმაციის ხარისხის შეფასება დარტყმითი ტალღის ინტენსივობის გავლენით.

უკანასკნელ წლებში დიდი მოთხოვნით სარგებლობს მძიმე შენადნობები ვოლფრამის ბაზაზე. მათი უმრავლესობა შედგება ვოლფრამის ნაწილაკებისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან შეკავშირებულია სხვადასხვა ლითონით, როგორებიცაა, მაგალითად რკინა, ნიკელი და სპილენძი. Cu – W

კომპოზიციები შესაძლებელია ფართოდ იქნან გამოყენებული როგორც სითბოს გამბნევი მასალები მიკროელექტრონიკაში, ელექტროოპტიკურ ხელსაწყოებში, ამრეკლ ფირფიტებად თბურ რეაქტორებში, საჰაერო და კოსმოსურ ტექნოლოგიებში. პერსპექტივაში დიდი პოტენციალი გააჩნია Cu-W სისტემის შენადნობებს სამხედრო დანიშნულებით გამოყენებისათვის, კერძოდ, ჭურვების მუშა თავების დასამზადებლად, რომლის დანიშნულებაცაა ჯავშნის დამსხვრევა და მისი მწყობრიდან გამოყვანა.

ნანოკრისტალური ფხვნილებისაგან მიღებული ნიმუშების მექანიკური თვისებების შესწავლამ ცხადყო, რომ მათი მახასიათებლები არსებითად განსხვავდება იგივე შემადგენლობის, მაგრამ მსხვილმარცვლოვანი (მიკრონი და მეტი) აგებულების მქონე მასალებისაგან. კერძოდ, ისინი გამოირჩევიან ზესალი და გაზრდილი ცვეთამდედგობით, აქვთ სიმტკიცისა და პლასტიკურობის უნიკალური შეხამება. უფრო მეტიც, გამოირჩევიან ზეპლასტიკურობითაც კი. როდესაც ნაწილაკის საშუალო ზომა მცირეა და უტოლდება ხილული სინათლის ტალღის სიგრძეს, მასალები ღებულობენ და ხასიათდებიან უნიკალური ოპტიკური, თერმული, ელექტრო და მაგნიტური თვისებებით. აღნიშნულიდან გამომდინარე ცხადი ხდება, რომ მარცვლის ზომის შემცირება კომპოზიციებში და დეფექტური სტრუქტურის თანმიმდევრული კონტროლი მასალების თვისებების გაუმჯობესების კიდევ ერთ ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს.

სამუშაოს მიზანი. კვლევის მთავარ მიზანს წარმოადგენდა ცხელი აფეთქებით დაწნეხვის ტექნოლოგიით Cu-(5-40%)W კომპოზიტების მიღება და მათი სტრუქტურის, ელექტრული თვისებებისა და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შესწავლა. შემუშავებულიყო ტექნოლოგიური პროცესის განსახორციელებლად აუცილებელი მექანიზმებისა და დანადგარების კონსტრუქციები, შერჩეულიყო სათანადო ხელსაწყოები გაზომვების დასაშვები სიზუსტის უზრუნველყოფით.

დაწნეხვის პარამეტრების ოპტიმიზაციის მიზნით ჩატარებულია წინასწარი საცდელი სამუშაოები, რომლებიც მიზნად ისახავდა ექსპერიმენტ-

ტული გზით ფხვნილოვანი მასალების აფეთქებით წინასწარი გამკვრივების პროცესის ისეთი პარამეტრების დადგენას, რომელიც თავიდან აგვაცილებდა კომპაქტირებისათვის დამახასიათებელი ისეთი არასასურველი დეფექტების ფორმირებას, როგორცაა: სიმკვრივის ანიზოტროპია ნიმუშის სიგრძეზე, ბზარების წარმოქმნა და მახის ეფექტი, რომელიც მიიღება აფეთქების პროცესში გასამკვრივებელი ნიმუშის ცენტრალურ ნაწილში დარტყმითი ტალღების შეჯახებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. აფეთქების ტექნოლოგიის საშუალებით Cu-(5-40%)W ნანოკომპოზიტების მისაღებად საწყის მასალებად შერჩეულ იქნა სამი სხვადასხვა კომპანიის მიერ წარმოებული ვოლფრამის ფხვნილები:

ა) W - წარმოებული „Argon” company (USA), „SkySpring Nanomaterials, Inc”, (USA). სისუფთავის ხარისხი 99,9%, მარცვლოვნება 40-60nm ნომინალური ზომით;

ბ) W - ნანოზომის, წარმოებული Treibacher Industrie AG, Austria, მარცვლოვნება 60-80nm ნომინალური ზომით;

გ) W - წარმოებული I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences, Ukraine. მარცვლოვნება – 5÷6 μm ნომინალური ზომით.

ექსპერიმენტებში გამოიყენებოდა სვერდლოვსკის ქიმიური რეაქტივების ქარხნის წარმოებული სპილენძის ფხვნილი, TY 4451-54.

ლითონის ცილინდრული ფორმის კონტეინერების (ამპულების) დასამზადებლად გამოყენებულია ჩვეულებრივი ხარისხის ფოლადი С13, რადგან იგი სხვა ფოლადებთან შედარებით გამოირჩევა დაბალი თვითღირებულებით და სრულად აკმაყოფილებს ჩვენი ტექნოლოგიური პირობებისათვის წაყენებულ ტექნიკურ მოთხოვნებს.

ფეთქებად მასალად გამოიყენებოდა ამონიტისა და ამონიუმის გვარჯილის ნარევი წონითი პროპორციით 50:50. მათი მახასიათებლები წარმოდგენილია ცხრილში 1.

ცხრილი 1. ექსპერიმენტებში გამოყენებული ფეთქებადი მასალების მახასიათებლები.

ფეთქებადი მასალის დასახელება	ფეთქებადი მასალის დეტონაციის სიჩქარე კმ/წმ	მასალის ზედაპირზე განვითარებული წნევა გპა
ჰექსოგენი	6,0	20
ამონიტი	3,6	10
ამონიტი + ა/გვარჯილა 50%50	2,0	5

ნანო და მასთან მიახლოებული ზომის ფხვნილებისაგან ცილინდრული ფორმის, გრძელტანიანი ნამზადების დაწნევა შესრულებულია ორ საფეხურად:

ა) პირველ საფეხურზე საწყისი ფხვნილების ნარევის აფეთქებით მოწნევა ხორციელდება ოთახის ტემპერატურაზე დატვირთვის ინტენსივობით 5-20 გპა. მისი მიზანია ნამზადის წინასწარი სიმკვრივის გაზრდა და ნარევაში ნაწილაკების ზედაპირების გააქტიურება;

ბ) მეორე საფეხურზე, იგივე წინასწარ დაწნეხილი ცილინდრული ნიმუში განმეორებით განიცდის აფეთქებით მოწნევას ცხელ მდგომარეობაში 300-1000°C. ტემპერატურაზე. დატვირთვის ინტენსიურობა ამ შემთხვევაში არ აღემატება 10 გპა. გახურების ციკლი მთლიანობაში გრძელდება 2-4 წთ.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე.

1. ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე შეირჩა და დამზადდა ოპტიმალური პარამეტრების ლითონის ცილინდრული ფორმის კონტეინერები (ამპულები), ხრახნიანი თავებით ორივე დაბოლოებაზე, ფხვნილოვანი კომპოზიციური მასალების დარტყმითი ტალღებით აფეთქებით კომპაქტირებისათვის.

2. შემუშავდა ფხვნილოვანი კომპოზიციური მასალების - კაზმის ლითონის ამპულაში სტატიკურად ჩატვირთვის საუკეთესო მეთოდი, რაც უზრუნველყოფს გასამკვრიველ ფხვნილთა ნარევის თანაბარ საწყის სიმკვრივეს. წინასწარი შემჭიდრიების ასეთმა მეთოდმა მნიშვნელოვანი როლი ითამაშა აფეთქების შემდეგ ამპულის სწორი გეომეტრიის შენარჩუნებაში.

3. შემუშავებულია კონსტრუქცია და დამზადებულია ორიგინალური ავტომატიზირებული გამახურებელი დანადგარი, რომელიც საშუალებას იძლევა წინასწარ, ოთახის ტემპერატურაზე აფეთქებით დაწნეხილი კომპოზიტების გახურებას 1200°C -მდე და მათ განმეორებით კომპაქტირებას ცხელ მდგომარეობაში ფხვნილთა დისპერსიულობის ხარისხის (მათ შორის ნანო ზომის) შენარჩუნებით.

4. ცად-ის ტექნოლოგიით მიღებულია გრძელტანიანი ცილინდრული ფორმის Cu-(5-40)% W კომპოზიტები. დადგენილია მათი მიღების პროცესის ოპტიმალური პირობები და პარამეტრები, წნეხვის რეჟიმები (წნევები) და კომპოზიტების გახურების ოპტიმალური ტემპერატურული დიაპაზონი.

5. დადგენილია, რომ Cu-W კომპოზიტში ვოლფრამის რაოდენობის გაზრდით 5-40% დიაპაზონში არ ხდება ნამზადის სისალის მკვეთრი ზრდა (114 -დან 126კგ/მმ^2 -მდე), რაც საშუალებას იძლევა ვოლფრამის რაოდენობის შემცირებით გაიზარდოს კომპოზიტში ელექტროგამტარობის მახასიათებლები.

6. ჩვენს მიერ პირველად არის დადგენილი, რომ კომპოზიტში ვოლფრამის ნანო ნაწილაკების გამოყენება იძლევა სისალის თანაბარ განაწილებას ნაკეთობის მოცულობაში მსხვილმარცვლოვან სტრუქტურებთან შედარებით, რაც ნაკეთობას ანიჭებს თვისებათა ერთგვაროვნებას და გამორიცხავს ანიზოტროპიას.

7. სემ-ის მიკროსტრუქტურული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ კომპოზიტები ნანოზომის W შემთხვევაში ხასიათდებიან სტრუქტურის ერთგვაროვნებით, ნაკლები ფორიანობით, მაღალი სიმკვრივით, ვოლფრამის მარცვლების საკმაოდ ძლიერი შეკავშირებით სპილენძის მარცვლებთან. კომპოზიტის მარცვლებში ხდება პლასტიკური დეფორმაცია, მათი მიკროსტრუქტურა შედგება სხვადასხვა ზომის და ფორმის ნაწილაკებისაგან, რომელთა შეერთება მიმდინარეობს გარდამავალი ზონის ფორმირებით, რომელიც წარმოადგენს კომპოზიტების ელემენტებისაგან შემდგარ მიკრომექანიკურ ნარევს.

8. ცად-ით მიღებული ნამზადების მექანიკური თვისებების კვლევის შედეგების განხილვისას დადგინდა, რომ შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრის რელაქსაციის პიკის არსებობა ყველა ნიმუშის შემთხვევაში და შესაბამისად იუნგის მოდულის დეფექტის არსებობა, დრეკადი რხევების ენერჯის შთანთქმის საერთო მექანიზმის არსებობაზე მიგვითითებს. მეტად შესაძლებელი მექანიზმი, რომელიც განაპირობებს ჩვენს მიერ დამზადებულ რელაქსაციებს, არის მეზობელი მარცვლების ბლანტი სრიალი ერთმანეთის მიმართ. ძვრის დაძაბულობები, რომლებიც საზღვარზე მოქმედებენ, აღნიშნული სრილის გამო თანდათან მცირდებიან. რელაქსაციური პროცესები წყდება მაშინ, როდესაც ძვრის დაძაბულობები მარცვალთა საზღვრების უმეტეს ნაწილში ნულამდე დადის.

9. ცად-ით მიღებული ნამზადების გლინვითი თვისებების შესწავლამ ვოლფრამის შემცველობაზე დამოკიდებულებით გვიჩვენა, რომ 400°C-ზე მომწვარი ნიმუშების გაგლინვით გამოწვეული დეფორმაცია წარმოქმნის ბზარებს ნიმუშის (ფირფიტის) ნაპირის გასწვრივ. ვოლფრამის მაღალი კონცენტრაციის შემცველ ნიმუშებში ბზარები ინტენსიურად წარმოიქმნება და იზრდება მარცვალთშორის საზღვრებში, ხოლო ნიმუში ვოლფრამის 35% შემცველობით მთლიანად იმსხვრევა. მარცვლის ზომის სწორი არჩევანი განაპირობებს და საშუალებას იძლევა, ცად-ით მაღალ ტემპერატურებზე და მათი მოწვით, თავიდან ავიცილოთ ნიმუშების დეფორმირება და მსხვრევა. დეფორმაციის სხვა სახეობამ (ჭედვამ) მოგვცა ბევრად უფრო დადებითი შედეგები. 35% ვოლფრამის შემცველი ნიმუშების მოწვამ 570°C-ზე და მათმა სწრაფად გაციებამ, გაგლინვის შემდეგ გამოიღო გარკვეული დადებითი შედეგი - მართალია, ბზარები კვლავ წარმოიქმნება, მაგრამ შენარჩუნებულია ნიმუშის მთლიანობა.

10. დადგენილია, რომ ნიმუშების სისქის შემცირებისას გლინვის შემდეგ ადგილი აქვს კუთრი წინაღობის ზრდას, რაც შეესაბამება პერკოლაციის თეორიას. ვოლფრამის 25%-ზე მეტი შემცველობის შემთხვევაში აღნიშნულ კავშირს არა აქვს რეგულარული ხასიათი და ძლიერადაა დამოკიდებული

ცად-ის პირობებზე. ეს შეიძლება ავხსნათ იმით, რომ ნანოზომის W-ის ფაზების მაღალი შემცველობის გამო ადგილი აქვს უფრო ინტენსიურ ურთიერთქმედებას არსებულ ფაზებს შორის და როგორც შედეგი, იკარგება აღნიშნული პარამეტრების W-ის კონცენტრაციისაგან დამოკიდებულების ხასიათი. ცად-ით Cu-W კომპოზიტებიდან ფურცლების ან კილიტების მიღება შესაძლებელია ნანოზომის ვოლფრამის ფხვნილის სხვადასხვა შემცველობის ნამზადებიდან.

11. რენდგენოდიფრაქტოგრამების ანალიზი საშუალებას იძლევა დავასკვნათ, რომ ნიმუშების კრისტალური სტრუქტურა შეესაბამება მეტალური სპილენძ-ვოლფრამის ნარევს. რენდგენოდიფრაქტოგრამებზე სპილენძისა და ვოლფრამის შესაბამისი მაქსიმუმების წინ ფიქსირდება ასევე სუსტი დიფრაქციული მაქსიმუმები, რომლებიც შეესაბამება ვოლფრამის ოქსიდებს WO_3 Cu-10%W ნიმუშში და WO_2 სხვა კომპოზიტებში.

სამუშაოს აპრობირება. სამუშაოს შედეგები წარმოდგენილი იყო შემდეგ კონფერენციებზე: ფხვნილთა მეტალურგიის ევროპის კონგრესი–EURO PM-2009 (კოპენჰაგენი, დანია 2009წ); საერთაშორისო კონფერენციაზე ნანო 2010 (თბილისი, საქართველო 2010 წ); „მე-10 საერთაშორისო სიმპოზიუმი აფეთქების ენერჯის გამოყენებით ახალი მასალების მიღებაზე: მეცნიერება, ტექნოლოგიები, ბიზნესი და ინოვაციები“. „Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations“ (EPNM2010), E.P.N.M. 2010, 06-14 ივნისი, Montenegro, Bechichi; გამოყენებითი ფიზიკის და მასალათმცოდნეობის პირველი საერთაშორისო კონგრესი–APMAS2011 (ანტალია, თურქეთი, 2011წ); გამოყენებითი ფიზიკის თანამედროვე საკითხები (თბილისი, საქართველო, 30.03.2011წ); „მე-11 საერთაშორისო სიმპოზიუმი აფეთქების ენერჯის გამოყენებით ახალი მასალების მიღებაზე: მეცნიერება, ტექნოლოგიები, ბიზნესი და ინოვაციები“. „Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations“ (EPNM2012), ქ. სტრასბურგი, საფრანგეთი, 2-6 მაისი 2012წ; „აკადემიკოს

ფერდინანდ თავაძის დაბადებიდან 100 წლისთვისადმი მიძღვნილი“ საერთაშორისო კონფერენციის მასალები, თბილისი, საქართველო, 4-6 ივნისი 2012 წ.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, სამი თავისაგან, დასკვნისა და ციტირებული ლიტერატურისგან. სამუშაო შეიცავს 140 ნაბეჭდ გვერდს, 12 ცხრილს, 11 ნახაზს, 24 სურათს, 19 დიაგრამას და 91 დასახელების ბიბლიოგრაფიას.

შესავალი

დღეისათვის მსოფლიოს თითქმის ყველა განვითარებული ქვეყნის მკვლევარის ყურადღების ცენტრშია მოქცეული ფოროვანი და კონდენსირებული მასალების ქცევის შესწავლა მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. ასეთი გაზრდილი ინტერესი ძირითადად განაპირობა ახალი, თვისებათა უნიკალური შეხამების (მაღალი სიმტკიცის, პლასტიკურობის, ცვეთამედეგობის, კოროზიამედეგობის, დაბალი ტოქსიკურობის) მქონე მასალების ძიებამ, რაც აუცილებელია ტექნიკისა და მრეწველობის მრავალი დარგის შემდგომი განვითარებისათვის.

ფხვნილთა მეტალურგიის განვითარებამ განაპირობა ძირეული ძვრები სამრეწველო წარმოებაში. ბოლო ხანებში გაჩნდა ახალი მიმართულებები, რომლებიც დაკავშირებულია თითქმის უფრო მასალის წარმოებასთან, რომლებიც არ შეიცავენ მინარევებს და სტრუქტურულად ნაკლებად არიან დამახინჯებული. ფართოდ ვითარდება აგრეთვე ისეთი მასალების მიღების ტექნოლოგიები, როგორცაა: ფრიქციული, ანტიფრიქციული, გამფილტრავი (ფოროვანი), შემაკავშირებელი, ცვეთამედეგი მასალები და ნაკეთობები, რომლებიც მუშაობენ დიდ დატვირთვებზე ტემპერატურის ფართო ინტერვალში, სხვადასხვა აგრესიულ გარემოში და ზემოდალ ვაკუუმში.

ტექნოლოგიური პროცესების რაციონალური მართვით შეიძლება წინასწარ დასახული ქიმიური შედგენილობის და სტრუქტურის მქონე მასალებისა და ნაკეთობების მიღება. ამის ნათელი მაგალითია ფხვნილთა

მეტალურგიით წარმოებული სწრაფმჭრელი ფოლადები და შენადნობები, მხურვალგამძლე შენადნობები, მაღალი სიმტკიცის საიარალო მასალები და ა.შ. მათში რეალიზებული თვისებების მიღწევა პრაქტიკულად შეუძლებელია მეტალურგიული წარმოების ტრადიციული მეთოდებით. გარდა ამისა, ფხვნილთა მეტალურგიის ძირითადი უპირატესობა ტრადიციულ ტექნოლოგიებთან შედარებით მასალების მცირე დანაკარგებით განისაზღვრება.

არაერთ უპირატესობასთან ერთად ფხვნილთა მეტალურგიაში გამოყენებული იზოსტატიკური ცხელი დაწნეხის მეთოდები ხასიათდებიან გარკვეული ნაკლოვანებითაც, რომელთაგან ძირითადია შეცხოების პროცესის ხანგრძლივობა და ძვირადღირებული წნეხების გამოყენების აუცილებლობა.

გაცილებით უფრო მაღალი წნევის მიღება შეიძლება დინამიკური მეთოდის რეალიზაციით, როდესაც ენერგომატარებლად ფეთქებადი მასალები გამოიყენება. ამავე დროს შეიძლება გამოყენებული იქნეს დარტყმითი ტალღის დატვირთვის სხვადასხვა სქემა, რომლებიც სხვადასხვანაირად აისახება ფოროვანი და კონდენსირებული მასალების თვისებებზე. დღეისათვის მსოფლიოს თითქმის ყველა განვითარებული ქვეყანა (ამერიკა, ინგლისი, საფრანგეთი, იაპონია, გერმანია და სხვა) მასალების წნევით დამუშავებისას აფეთქების ენერგიას იყენებს. კვლევები ფხვნილოვანი მასალების კომპაქტირებისათვის აფეთქების ენერგიის გამოყენების მიმართულებით ამერიკელი მეცნიერების მიერ არის დაწყებული. სწორედ მათ დაუდეს სათავე ამ ტექნოლოგიის წარმოებაში დანერგვას. ყოფილ საბჭოთა კავშირს ერთ-ერთი წამყვანი როლი ეკუთვნის ამ სფეროში.

ლითონების აფეთქებით განმტკიცება და შედუღება ფართოდ გამოიყენება მრეწველობის სხვადასხვა დარგში ნაკეთობათა საექსპლოატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესებისათვის. აღნიშნული დარგის შემდგომი განვითარების ტემპს დიდად განსაზღვრავს პროცესის თეორიული საფუძვლების მეცნიერულად დამუშავება, რაც მყარ საფუძველს დაუდებს ახალი ტექნოლოგიების შემუშავებას და ისეთი დამატებითი მახასიათებლების განსა-

ზღვრას, რომლებიც შესაძლებელს გახდის რაოდენობრივად შეფასდეს მასალის გამტკიცების ეფექტი და მისი განაწილების ხასიათი ნაკეთობის მოცულობაში. ტექნოლოგიამ უნდა განაპირობოს ასევე ნაკეთობის დეფორმაციის ხარისხის შეფასება დარტმითი ტალღის ინტენსივობის გავლენით.

უკანასკნელ წლებში დიდი მოთხოვნით სარგებლობს მძიმე შენადნობები ვოლფრამის ბაზაზე. მათი უმრავლესობა შედგება ვოლფრამის ნაწილაკებისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან შეკავშირებულია სხვადასხვა ლითონით, როგორებიცაა, მაგალითად რკინა, ნიკელი და სპილენძი. Cu – W კომპოზიციები შესაძლებელია ფართოდ გამოყენებული იქნან როგორც სითბოს გამბნევი მასალები მიკროელექტრონიკაში, ელექტროოპტიკურ ხელსაწყოებში, ამრეკლ ფირფიტებად თბურ რეაქტორებში, საჰაერო და კოსმოსურ ტექნოლოგიებში. პერსპექტივაში დიდი პოტენციალი გააჩნია Cu–W სისტემის შენადნობებს სამხედრო დანიშნულებით გამოყენებისათვის, კერძოდ, ჭურვების მუშა თავების დასამზადებლად, რომლის დანიშნულებაცაა ჯავშნის დამსხვრევა და მისი მწყობრიდან გამოყვანა.

ნანოკრისტალური ფხვნილებისაგან მიღებული ნიმუშების მექანიკური თვისებების შესწავლამ ცხადყო, რომ მათი მახასიათებლები არსებითად განსხვავდება იგივე შემადგენლობის, მაგრამ მსხვილმარცვლოვანი (მიკრონი და მეტი) აგებულების მქონე მასალებისაგან. კერძოდ, ისინი გამოირჩევიან ზესალი თვისებებით და გაზრდილი ცვეთამედეგობით, აქვთ სიმტკიცისა და პლასტიკურობის უნიკალური შეხამება. უფრო მეტიც, გამოირჩევიან ზეპლასტიკურობით. როდესაც ნაწილაკის საშუალო ზომა მცირეა და უტოლდება ხილული სინათლის ტალღის სიგრძეს, მასალები დებულობენ და ხასიათდებიან უნიკალური ოპტიკური, თერმული, ელექტრო და მაგნიტური თვისებებით. აღნიშნულიდან გამომდინარე ცხადი ხდება, რომ მარცვლის ზომის შემცირება კომპოზიციებში და დეფექტური სტრუქტურის თანმიმდევრული კონტროლი მასალების თვისებების გაუმჯობესების კიდევ ერთ ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს.

დღევანდელ დღეს ინტენსიურად მიმდინარეობს კვლევები, რომლე-

ბიც მიზნად ისახავს არსებული ტექნოლოგიური პროცესების გამოყენებას (ცივი და ცხელი იზოსტატიკური დამუშავება ვაკუუმში ან სხვა დამცავ გარემოში) ულტრადისპერსული და ნანო ზომის ფხვნილების დაწნეხვის გზით მონოლითური ნიმუშების მისაღებად.

ყველა არსებულ ტექნოლოგიებს დადებით თვისებებთან ერთად უარყოფითი მხარეებიც გააჩნიათ. ნანო ზომის ფხვნილები მეტად მგრძობიარეა ტემპერატურის მიმართ და ეს ეფექტი იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად. მარცვლის ზრდა კი გამოიწვევს ნანოსტრუქტურის სრულყოფილების დარღვევას და, როგორც შედეგი, მიღებული მონოლითური მასალები კარგავენ მათთვის დამახასიათებელ უნიკალურ ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებს.

ამ უარყოფითი მოვლენის თავიდან ასაცილებლად დაწნეხისა და შეცხობის ტემპერატურების შემცირება, ანუ დაბალტემპერატურული წარმოების პროცესები, ვერ იძლევა სასურველ შედეგს - შედარებით დიდი თავისუფალი ზედაპირები ხელს უშლის მაღალი სიმკვრივის მიღწევას დაწნეხილ ნიმუშებში. ამასთან, დაბალ ტემპერატურებზე სასურველი მარცვალთშორისი საზღვრები არ ყალიბდება. ეს ხარვეზი განსაკუთრებით მკვეთრად მჟღავნდება ძნელდნობადი ლითონებისა და კერამიკული ფხვნილების კომპაქტირებისა და კონსოლიდაციის დროს. ასეთ პირობებში დაწნეხილი მასალები ხასიათდებიან მაღალი ფორიანობითა და არაადეკვატური ფიზიკო-მექანიკური თვისებებით.

ნაკეთობაში ნანოკრისტალური აგებულების და, აქედან გამომდინარე, შესაბამისი სპეციფიკური თვისებების შენარჩუნების მიზნით ჩვენს მიერ ჩატარებულმა კვლევებმა გარკვეული შედეგი უკვე გამოიღო. პრობლემის გადაჭრა შესაძლებელი გახდა ფხვნილთა ნარევის სწრაფი გახურებით მაღალ ტემპერატურამდე (1500K) და სწრაფი დაწნეხით ცხელ მდგომარეობაში დარტყმითი ტალღების გამოყენებით. დარტყმითი ტალღებით დატვირთვამდე წინასწარი გახურება იწვევს საწყისი მასალის პლასტიკურობის მნიშვნელოვან გაზრდას, ხოლო გახურების მეტად მცირე დროის ინტერვალი,

რომელიც არ აღემატება 50 წამს, არ არის საკმარისი მარცვლის ზრდის პროცესის დაწყებისათვის. მაგალითად, ჩვენს მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტებით ნაჩვენებია, რომ დაწნევის წინ ამორფული ფხვნილების სწრაფი გახურება გამორიცხავს განმინვის პროცესს, სწრაფი კონსოლიდაცია (დაწნევა) კი პრაქტიკულად წრთობის ეფექტის მატარებელია და უზრუნველყოფს საწყისი სტრუქტურის შენარჩუნებას ნიმუშის მთელ მოცულობაში.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული სიახლის არატრადიციული მიდგომა იმაში მდგომარეობს, რომ ცილინდრული გეომეტრიის ფორმის ნაკეთობის დაწნევა ნაწილად და მასთან მიახლოებული ზომის ფხვნილებისაგან ორ საფეხურად არის შესრულებული:

ა) პირველ საფეხურზე ხორციელდება ოთახის ტემპერატურაზე საწყისი ფხვნილების ნარევის აფეთქებით მოწნევა დატვირთვის ინტენსივობით 5-20 გპა. მისი მიზანია ნამზადის წინასწარი სიმკვრივის გაზრდა და ნარევი ნაწილაკების ზედაპირების გააქტიურება;

ბ) მეორე საფეხურზე, იგივე წინასწარ დაწნეხილი ცილინდრული ნიმუში განმეორებით განიცდის აფეთქებით მოწნევას ცხელ მდგომარეობაში 200-1100°C ტემპერატურაზე. დატვირთვის ინტენსიურობა ამ შემთხვევაში არ აღემატება 10გპა.

წინასწარი, პირველ საფეხურზე დატვირთვის შემდეგ, როგორც მოსალოდნელია, არავითარი ცვლილება დაწნეხილი ფხვნილის მიკროსტრუქტურაში არ ხდება.

ვაკუუმში სტატიკური ცხლად დაწნევისაგან განსხვავებით, სადაც პროცესი მიმდინარეობს მაღალ ტემპერატურაზე ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, ჩვენს შემთხვევაში ცილინდრული ფორმის ნიმუშის მეორადი აფეთქებით მოწნევა მიმდინარეობს ელექტრო ღუმელში მისი 800-1000°C-მდე წინასწარი გახურების შემდეგ. გახურების ციკლი მთლიანობაში გრძელდება 2-4 წთ. გახურების ასეთი მოკლე პერიოდი პრაქტიკულად გამორიცხავს თერმულად აქტივირებული პროცესის მიმდინარეობას - ნაწილად ნაწილაკების მარცვლის ზრდას (რაც დაფიქსირებულია ჩვენს წინას-

წარ ექსპერიმენტებში). მაღალი ინტენსიურობის დარტყმითი ტალღები კი განაპირობებს ნაწილაკების ზედაპირების დენადობას და მარცვალთშორისი საზღვრების ჩამოყალიბებას, რაც გამორიცხულია სტატიკური დაწნევის პირობებში. აფეთქებით (დარტყმითი ტალღებით) Cu-W ფხვნილების დაწნევა-კომპაქტირება ჩვენს მიერ განხორციელებულია ღერძულ-სიმეტრიული დატვირთვის სქემით. დარტყმითი ტალღები ინიცირებული იყო საწარმოო ფეთქებადი მასალებით და მათი ნარევებით სხვადასხვა პასიურ დანამატებთან, როგორცაა, მაგალითად სელიტრა-ამონიუმის გვარჯილა NH_4NO_3 .

1. გაკეთებულია პრობლემის ირგვლივ არსებული ლიტერატურული მონაცემების დეტალური ანალიზი. მიმოხილულია ახალი მასალების მიღების თანამედროვე მეთოდები: კომპოზიციური მასალების ზოგადი დახასიათება; გამოყენებული მასალების ზოგადი მიმოხილვა; დიფუზიის მექანიზმები; ნაწილაკთა მოცულობითი დეფორმაციები; გამკვრივების პროცესები გახურებისას და ოთახის ტემპერატურებზე; ზოგიერთი ტექნოლოგიური პარამეტრის გავლენა შეცხოების პროცესზე და შეცხოვნილი მასალების თვისებებზე; შეცხოების პროცესები ერთკომპონენტთან და მრავალკომპონენტთან სისტემებში; შეკავშირების მექანიზმები და წნევის გავლენა დარტყმით გამკვრივებული მასალების სუბსტრუქტურაზე.

ფხვნილების დინამიკური წნევის მეთოდებში პროგრესულად ვითარდება დარტყმითი ტალღებით კომპაქტირების ტექნოლოგია. ამიტომ ამავე თავში განხილულია ფხვნილების აფეთქებით წნევის თავისებურებანი. გაანალიზებულია ფორიან გარემოში დარტყმითი ტალღების აღძვრისა და გავრცელების კანონზომიერებები. ჩამოყალიბებულია პირობები, რომლის დროსაც ფხვნილების კომპაქტირების დროს ხდება ნაწილაკებს შორის საერთო საზღვრების ჩამოყალიბება.

აფეთქებით დაწნევას თან სდევს ფაზური გარდაქმნები, რომლებიც შესაძლებლობას იძლევა მივიღოთ ზოგიერთი ნივთიერების მაღალი წნევის

მეტასტაბილური ფაზები (გრაფიტი, ბორის ნიტრიტი). აღნიშნული ფაზები ხასიათდებიან სტრუქტურული დეფექტების მაღალი კონცენტრაციით და კრისტალიტების მცირე ზომით, რაც განაპირობებს მათი თვისებების განსხვავებას ჩვეულებრივ სხვა მეთოდებით მიღებული ნიმუშების თვისებებისაგან. კვლევებისადმი ინტერესი ამ მიმართულებით განუხრელად იზრდება.

როგორც გამომდინარეობს ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვიდან, აფეთქების წინ ნიმუშების წინასწარი გახურება ზრდის ნამზადის პლასტიკურობას, რითაც მცირდება ბზარების წარმოქმნისადმი მიდრეკილება. ამიტომ მიზნად დავისახეთ ფხვნილოვანი ვოლფრამ-სპილენძის კომპოზიტის კომპაქტირებისათვის გამოვიყენოთ აფეთქებით კომპაქტირების ორსაფეხურიანი მეთოდი, რომელიც საშუალებას იძლევა საწყის მასალებად გამოვიყენოთ არა მარტო ტრადიციული მარცვლოვნების მქონე ფხვნილები, არამედ ნანოზომის საწყისი მასალებიც კომპაქტირებულ ნაკეთობაში მათი ფრაქციულობის შენარჩუნებით.

2. წარმოდგენილია კვლევების ძირითადი შედეგები და გაკეთებულია მათი ანალიზი.

მასალების წინასწარი გახურება, მისი შემდგომი აფეთქებით დამუშავებისათვის, წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან და საპასუხისმგებლო საფეხურს მასალების წნევით დამუშავებისას.

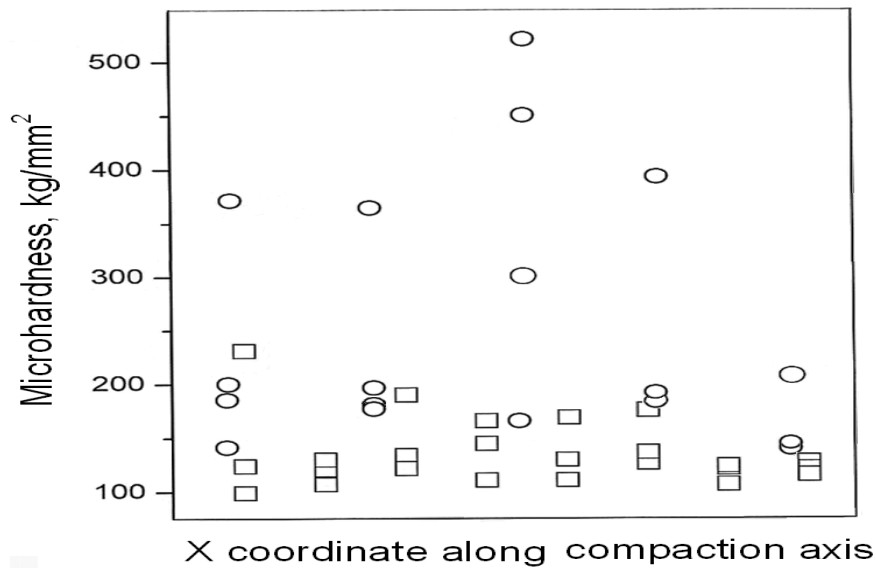
მასალების ცხლად აფეთქებით დაწნეხვა (ცად) - დამუშავებისათვის გამოვიყენეთ სსიპ გ. წულუკიძის სამთო ინსტიტუტში ერთობლივად შექმნილი ავტომატური ექსპერიმენტული რობოტი. იგი საშუალებას იძლევა მაღალ ტემპერატურულ ინტერვალში, $200\div 1200^{\circ}\text{C}$ ე.წ. ცხელი დაწნეხვით (ცდ) მოვახდინოთ წინასწარ, ოთახის ტემპერატურაზე კომპაქტირებული კომპოზიციური ნამზადების ხელმეორედ დაწნეხვა ფეთქებადი მასალის დეტონაციის შედეგად წარმოქმნილი დარტყმითი ტალღებით. დატვირთვის ინტენსივობა შეადგენდა 5-20 გპა.



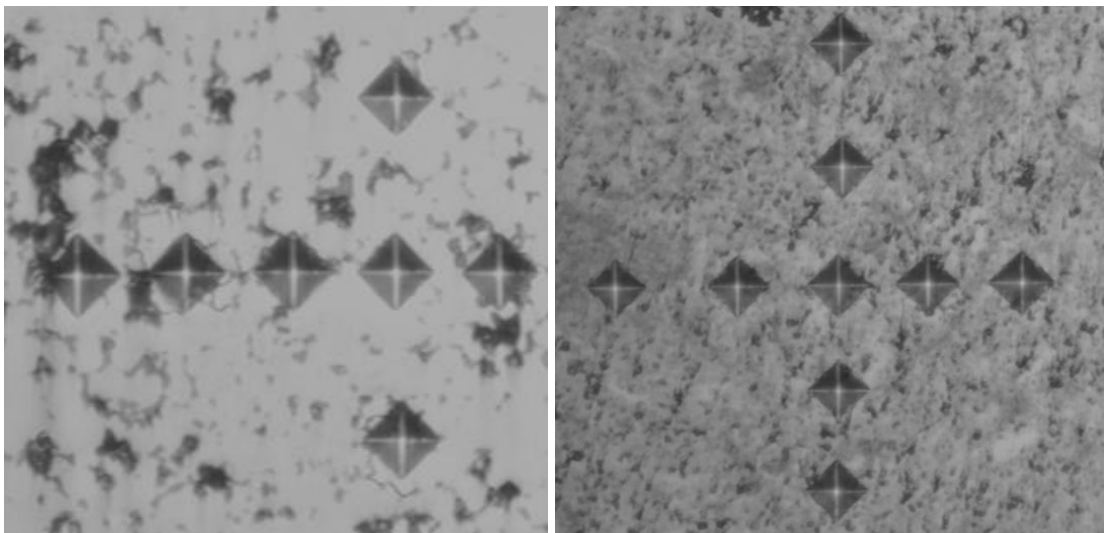
სურათი 1. 900C⁰-ზე მიღებული Cu-(5±40%)W კომპოზიტები მექანიკურად დამუშავების შემდეგ. წნევის ინტენსივობა 5გპა-მდე.

ჩატარდა წინასწარი ცხელი აფეთქებითი ექსპერიმენტები ცხელი კომპაქტირების ოპტიმალური ტემპერატურის შესარჩევად. ტემპერატურა შეიცვალა წინა ექსპერიმენტებისაგან განსხვავებით და გაიზარდა 800°C-ს ზემოთ. დაკვირვებებმა და გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ აფეთქების ტექნოლოგიით მიღებულ კომპოზიციებში, მათ კვეთებსა და ტეხებში არ აღმოჩნდა მნიშვნელოვანი დეფექტები. ჩავატარეთ ცად-ის ტექნოლოგიით მიღებული Cu-(5±40%)W კომპოზიტების თვისებების შესწავლა და ანალიზი. საინტერესო აღმოჩნდა მათი სისალის დამოკიდებულება ვოლფრამის მარცვლის ზომასზე. რვა სხვადასხვა შედგენილობის Cu-(5±40%)W კომპოზიტი ნაწილობრივ ვოლფრამის შემცველობით, დაიწნება ორ საფეხურად 5-15 გპა-მდე წნევების ინტენსივობით 800±950 °C ტემპერატურულ ინტერვალში. კომპოზიტები დაიჭრა შესაბამის ზომებად შემდგომი კვლევებისათვის და ჩატარდა მათი ფიზიკო-მექანიკური თვისებების შესწავლა.

კვლევებმა გვიჩვენა, რომ არ აღმოჩნდა არსებითი განსხვავება სტრუქტურასა და მათ სისალის მაჩვენებლებს შორის, მაგრამ აუცილებლად უნდა



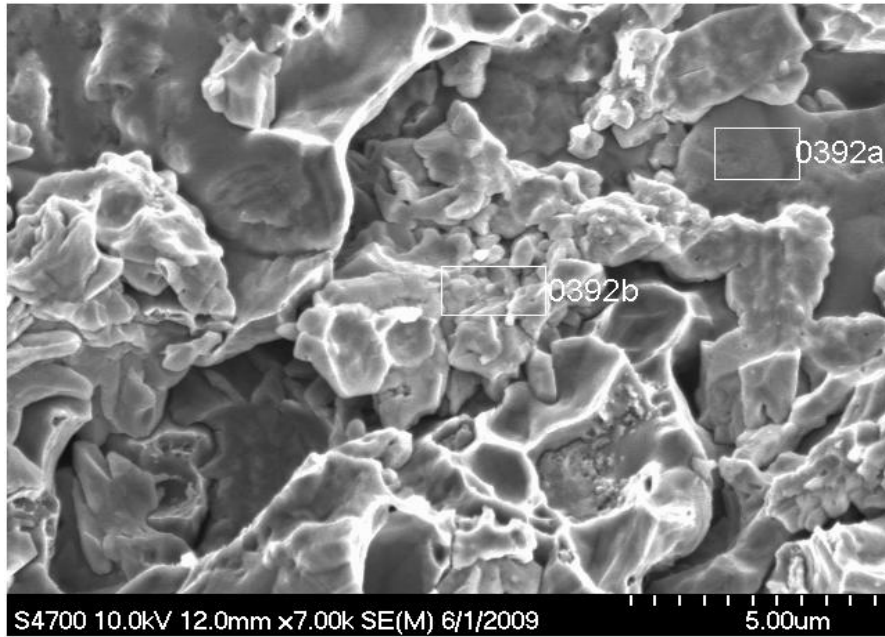
ნახ.1. 800°C -ზე დაწნეხილი Cu – 20%W კომპოზიტის მიკროსისალის განაწილება.
 □ - ნანოზომის W; ○ - მიკრონიანი W.



სურათი 2. მიკროსისალის განაწილება ცად-ის ტექნოლოგიით მიღებულ ნიმუშებში. ა)-Cu–35%W და ბ)-Cu–40%W. დატვირთვის ინტენსივობა 10 გპა-მდე, ტემპერატურა 950°C

აღინიშნოს ის ფაქტი, რომ წინამორბედი ნიმუშებისაგან განსხვავებით ნანოზომის W-ის გამოყენებამ მნიშვნელოვანი დადებითი გავლენა მოახდინა სისალის თანაბარ განაწილებაზე ნიმუშის მთელ მოცულობაში.

სურათზე 3 წარმოდგენილია ცად-ის ტექნოლოგიით მიღებული Cu–10%W ნანოზომის ვოლფრამის შემცველი კომპოზიტის ფრაქტოგრამა. სურათი მიღებულია სკანირებულ ელექტრონულ მიკროსკოპზე (სემ-SEM).

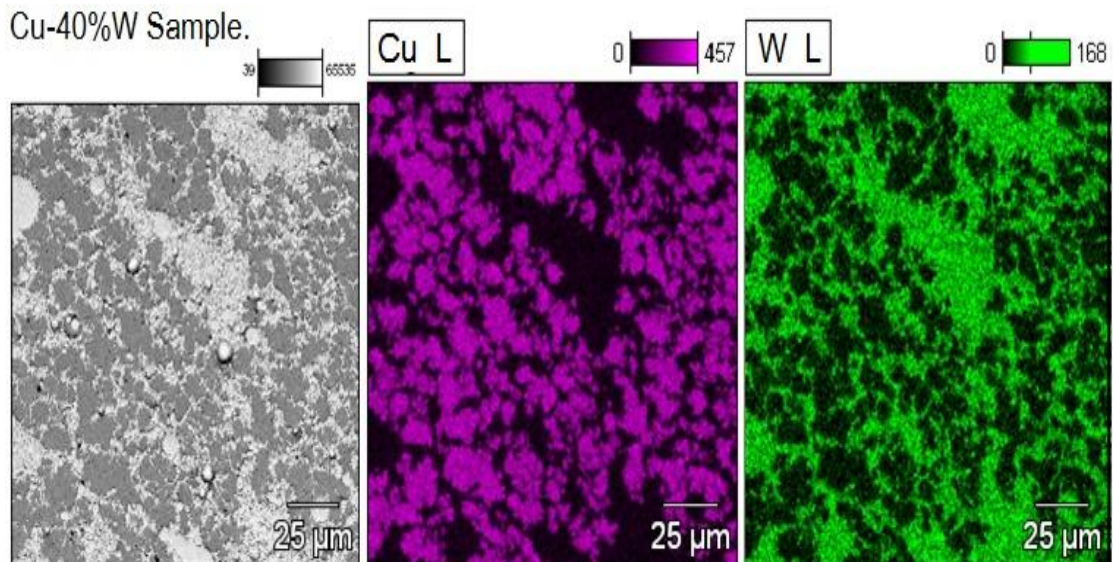


სურათი 3. Cu-10%W კომპოზიტის ტეხის ზედაპირი ნანოზომის W შემთხვევაში.

როგორც სტრუქტურიდან ჩანს, ვოლფრამის მარცვლები ხასიათბიან საკმაოდ ძლიერი შეკავშირებით სპილენძის მარცვლებთან. კომპოზიტის ტეხის ზედაპირზე რთულია მოიძებნოს არაკომპაქტირებული უბნები. სტრუქტურის საერთო ხასიათიდან გამომდინარე, კომპოზიტები ნანოზომის ვოლფრამის შემცველობის შემთხვევაში ხასიათდებიან მაღალი სიმკვრივით და არ შეიცავენ ისეთ დეფექტებს, როგორცაა ნაპრალები და ღრმულები.

სურათზე 4 წარმოდგენილია 950°C ტემპურატურაზე ცად-ის ტექნოლოგიით მიღებული Cu-40%W კომპოზიტის ე.წ. კომპოზიციური რუკა (კარტოგრაფია), რომელიც გადაღებულია სკანირებულ ელექტრონულ მიკროსკოპზე (სემ-SEM). კარტოგრაფაზე მკვეთრად არის გამოხატული კომპოზიტის შემადგენელი მარცვლების განაწილების ხასიათი. იასამნისფრით შეღებილია სპილენძის მარცვლები, ხოლო მწვანე ფერით - ვოლფრამის მარცვლები.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ცად-ის ტექნოლოგიით, ორსაფეხურიანი დაწნევის პროცესის გამოყენებით, წარმატებით შეიძლება დაიწნეხოს Cu-W კომპოზიტები. შედეგები გვი-



სურათი 4. Cu-40% W კომპოზიტში მარცვალთა განაწილება. იასამნისფერი - Cu; მწვანე - W

ჩვენებს, რომ მიღებული ნიმუშები ხასიათდებიან სტრუქტურის ერთგვაროვნებითა და ნაკლები ფორიანობით.

მიკროსტრუქტურული კვლევების საფუძველზე დადგინდა, რომ ცხელი აფეთქებით კომპაქტირების დროს კომპოზიტის მარცვლებში ხდება პლასტიკური დეფორმაცია. კომპოზიტების მიკროსტრუქტურა შედგება სხვადასხვა ზომის და ფორმის ნაწილაკებისაგან. მათი შეერთება მიმდინარეობს გარდამავალი ზონის ფორმირებით, რომელიც წარმოადგენს კომპონენტების ელემენტებისაგან შემდგარ მიკრომექანიკურ ნარევს.

ამავე თავში წარმოდგენილია ცად-ით მიღებული ნამზადების მექანიკური და ელექტრული თვისებების კვლევის შედეგები. აფეთქებით კომპაქტირებული რვა სხვადასვა შედგენილობის Cu-W ნიმუში დაიჭრა საჭირო ზომის თხელ ფირფიტებად (სურათი 5), გაიგლინა და მოხდა მათი ფიზიკომექანიკური თვისებების შესწავლა. შესწავლილ იქნა მათი შემადგენლობის გავლენა ელექტროგამტარი სისტემის თვისებებზე, ასევე ვაკუუმში მოწვის ტემპერატურისა და დეფორმაციის ხარისხის (10, 20, 30, 40%) გავლენა ნანოკომპოზიტების ელექტროგამტარობაზე 77÷400K ტემპერატურულ ინტერვალში. შედეგების ანალიზით დამყარებულია კავშირი ამ პროცესის ძირითად პარამეტრებსა და კომპოზიტების ფიზიკო-ტექნიკურ მახასიათებლებს



სურათი 5. მექანიკური და ელექტრული თვისებების შესასწავლად ფირფიტებად დაჭრილი W-Cu კომპოზიტები

შორის.

კვლევა ჩატარდა შინაგანი ხახუნის მეთოდის გამოყენებით. ეს მეთოდი ერთ-ერთი ყველაზე უფრო მგრძობიარე მეთოდია რელაქსაციის პროცესების შესასწავლად, მყარ სხეულებში ფაზური გარდაქმნების გამოსაკვლევად და სტრუქტურული დეფექტების პარამეტრების განსაზღვრისათვის.

ნიმუშების შინაგანი ხახუნისა და იუნგის მოდულის გასაზომად გამოიყენებოდა ე. ანდრონიკაშვილის სახელობის ფიზიკის ინსტიტუტში შექმნილი აკუსტიკური სპექტომეტრი. აკუსტიკური სპექტრომეტრის მუშაობას საფუძვლად უდევს ელექტროსტატიკური მეთოდით ღუნვითი რხევის აგზნება ნიმუშში, რომელსაც მართკუთხედი ფირფიტის ფორმა აქვს. სპექტრომეტრის ელექტრონული აპარატურა საშუალებას იძლევა გაზომვები ჩატარდეს ნიმუშების თვითაღზნების რეჟიმში მათ საკუთარ სიხშირეზე.

თვითაღზნება იქმნება ფაზის მაბრუნებლით, რომლითაც აღჭურვილია გამაძლიერებელი. ელექტრული სიხშირეზომი მიერთებულია გამზომი მიმღებთან და გამოიყენება ნიმუშის რხევის სიხშირის გასაზომად. ნიმუშის რეზონანსული სიხშირის ν_r გაზომვა საშუალებას იძლევა აიგოს E იუნგის მოდულის ცვლილება შემდეგი თანაფარდობის მიხედვით:

$$v_r = k \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

სადაც d არის ნიმუშის სისქე, L - რხევადი ფირფიტის სიგრძე, E - იუნგის მოდული, ρ - ნიმუშის სიმკვრივე, k - მუდმივი კოეფიციენტი.

δ მილევის დეკრემენტის განსაზღვრისათვის გამოყენებულ იქნა დიფერენციული ამპლიტუდის დისკრიმინატორი, რომელიც აფიქსირებს ნიმუშის რხევების რაოდენობას ამპლიტუდის ორ ზღვრულ A_1 და A_2 მნიშვნელობათა შორის. უკუკავშირის წრედის გაწყვეტა იწვევს ნიმუშის რხევების მილევას, რომელთა რაოდენობასაც A_1 -დან A_2 ამპლიტუდამდე თვლის იმპულსების მთვლელი. შინაგანი ხახუნის Q^{-1} ინაგრაიშება ფორმულიდან:

$$Q^{-1} = 1/\pi N \ln(A_1/A_2), \quad (2)$$

სადაც N წარმოადგენს ნიმუშის რხევების რაოდენობას ამპლიტუდის შემცირებისას A_1 დან A_2 - მდე.

აკუსტიკური სპექტომეტრის ტექნიკური მახასიათებლებია:

ტემპერატურული დიაპაზონი $1.5 \div 900$ K;

სიხშირული ინტერვალი $0.5 \div 10$ kHz;

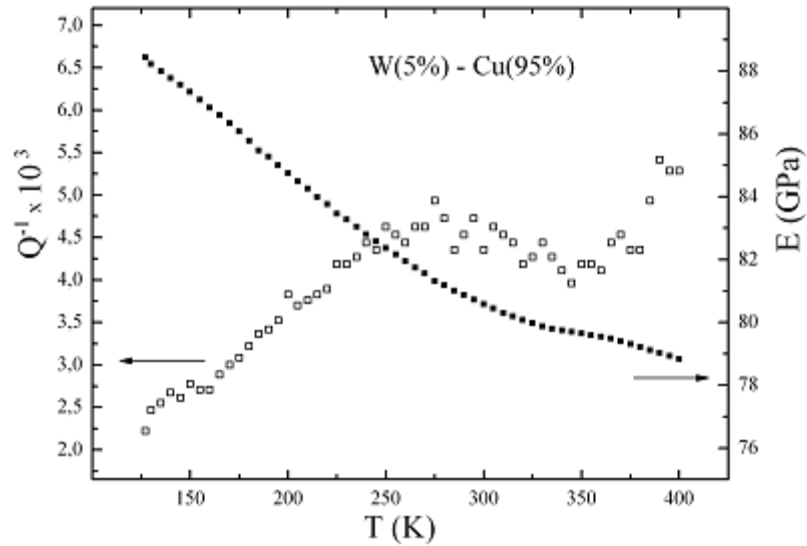
დეფორმაციის მაქსიმალური ამპლიტუდა $\epsilon_m \sim 10^{-7} \div 10^{-5}$;

დრეკადობის დინამიკური მოდულის გაზომვის ექსპერიმენტალური ცდომილება $\sim 0.01\%$ -ს;

შინაგანი ხახუნის რეგისტრაციის ცდომილება შეადგენს $Q^{-1} = 10^{-3} - 10^{-5}$ მნიშვნელობების ინტერვალში $\sim 2\%$ -ს და $Q^{-1} > 10^{-3}$ ინტერვალში $\sim 5\%$ -ს.

შინაგანი ხახუნის და იუნგის მოდულის გაზომვები ჩატარდა შემდეგ ნიმუშებზე: Cu-5%W; Cu-10%W; Cu-15%W; Cu-25%W; Cu-35%W (ყველა კონცენტრაცია მოცემულია წონით პროცენტებში).

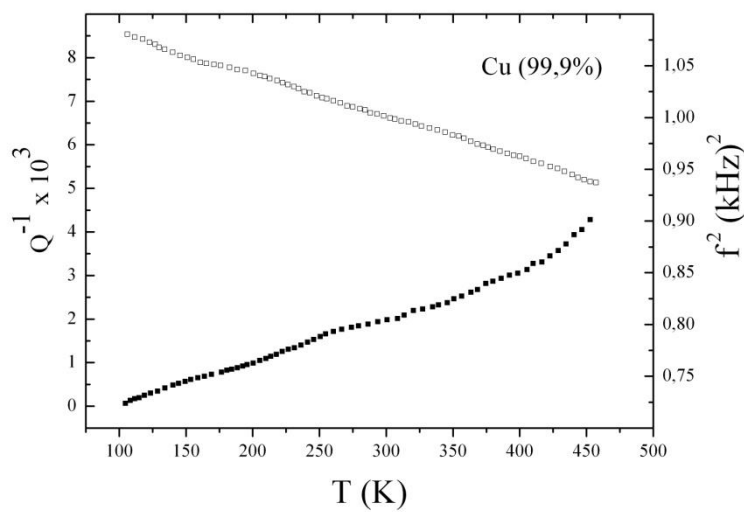
დიაგრამაზე 1 წარმოდგენილია Cu-5%W კომპოზიციური მასალის იუნგის მოდულის და შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრი. როგორც დიაგრამიდან 1 ჩანს, 250–350K ტემპერატურულ ინტერვალში შინაგანი ხახუნის მრუდს აქვს რელაქსაციური პიკი, რომელსაც შეესაბამება



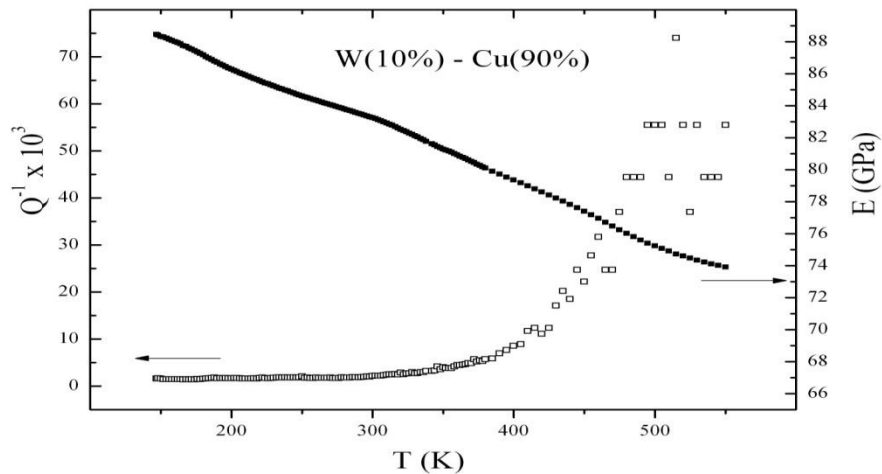
დიაგრამა 1. შინაგანი ხახუნის (Q^{-1}) და იუნგის მოდულის (E) დამოკიდებულება ტემპერატურაზე Cu-5%W კომპოზიციურ მასალაში.

დრეკადობის მოდულის დეფექტი $E(T)$ მრუდზე. გარდა ამისა, ჩანს რომ იუნგის მოდულის ფარდობითი ცვლილება მთელ ტემპერატურულ ინტერვალში არ აღემატება 10%-ს.

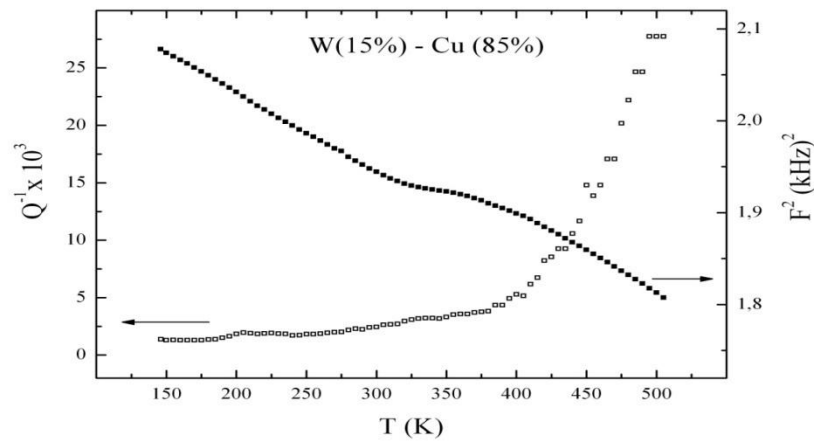
შედარებისათვის ქვემოთ წარმოგენილია ჩატარებული კვლევების რამდენიმე შედეგი მექანიკური თვისებებისათვის (იუნგის მოდული და შინაგანი ხახუნის) საწყის (სუფთა, დიაგრამა 2) და გაგლინულ სპილენძის ნიმუშებში (სისქე 0.3მმ და 1მმ).



დიაგრამა 2. სუფთა სპილენძის მრუდები $Q^{-1}(T)$ და $E(T)$.



დიაგრამა 3. Cu-10%W კომპოზიტის მრუდები $Q^{-1}(T)$ და $E(T)$.



დიაგრამა 4. $Q^{-1}(T)$ და ვიბრატორის საკუთარი სიხშირის კვადრატის (F^2) დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

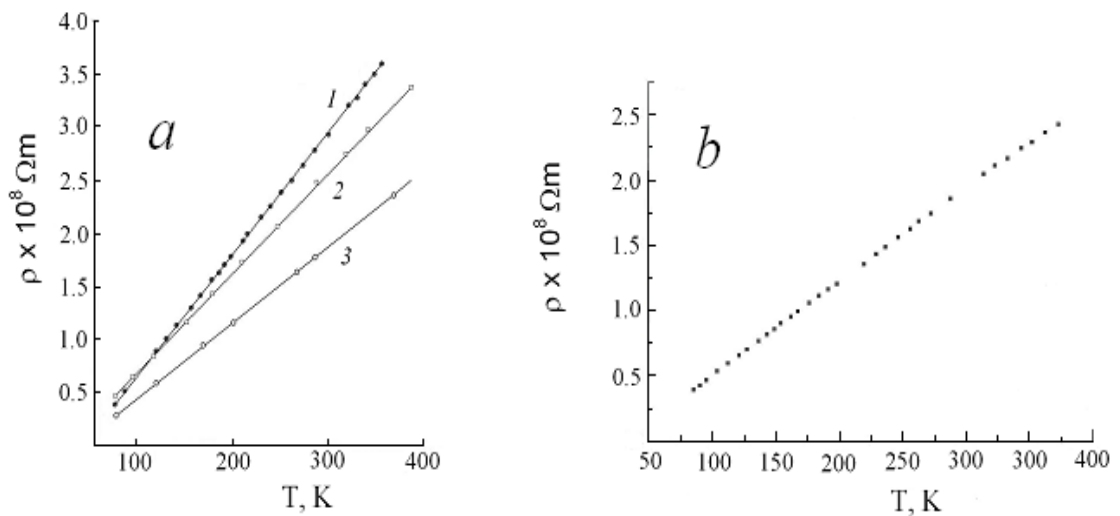
შინაგანი ხახუნის ტემპერატურული სპექტრის რელაქსაციის პიკის არსებობა ყველა ნიმუშის შემთხვევაში და შესაბამისად იუნგის მოდულის დეფექტის არსებობა, დრეკადი რხევების ენერჯის შთანთქმის საერთო მექანიზმის არსებობაზე მიგვითითებს. მყარი სხეულის სხვადასხვა დეფექტებით გამოწვეული რელაქსაციების თეორია საკმარისად დეტალურად არის დამუშავებული.

ყველაზე უფრო შესაძლებელი მექანიზმი, რომელიც განაპირობებს ჩვენს მიერ დამზერილ რელაქსაციებს, არის მეზობელი მარცვლების ბლანტი სრიალი ერთმანეთის მიმართ. ზინერის მიხედვით, ძვრის დაძაბულობები, რომლებიც საზღვარზე მოქმედებენ, აღნიშნული სრილის გამო თან-

დათან მცირდება, რელაქსაციური პროცესი წყდება მაშინ, როდესაც ძვრის დაძაბულობები საზღვრის უმეტეს ნაწილში ნულამდე დადის. ზინერის მოდელიდან გამომდინარეობს, რომ τ რელაქსაციის დრო უნდა იცვლებოდეს მარცვლის d ზომის პირდაპირპროპორციულად. მაშასადამე, მარცვლების ზრდასთან ერთად პიკმა უნდა გადაინაცვლოს უფრო მაღალი ტემპერატურებისკენ. ექსპერიმენტალური მონაცემები, რომლებიც 1-3 დიაგრამებზეა წარმოდგენილი, მიგვითითებს იმაზე, რომ W(25%)-Cu(75%) ნიმუშების თერმომექანიკურმა დამუშავებამ მიგვიყვანა კომპოზიტში მარცვლების საშუალო ზომის შემცირებამდე.

ნიმუშების პირველი სერია იჭრებოდა დისკური საჭრისით, ხოლო მეორე - ელექტრო-ეროზიული მეთოდით. ნაპერწკლური დაჭრის შემდეგ ნიმუშების ზედაპირიდან ხდებოდა თხელი ფენის მოცილება, რათა თავიდან აგვეცილებინა შესაძლო თერმულად აქტივირებული ნაერთების გავლენა გაზომვის შედეგებზე.

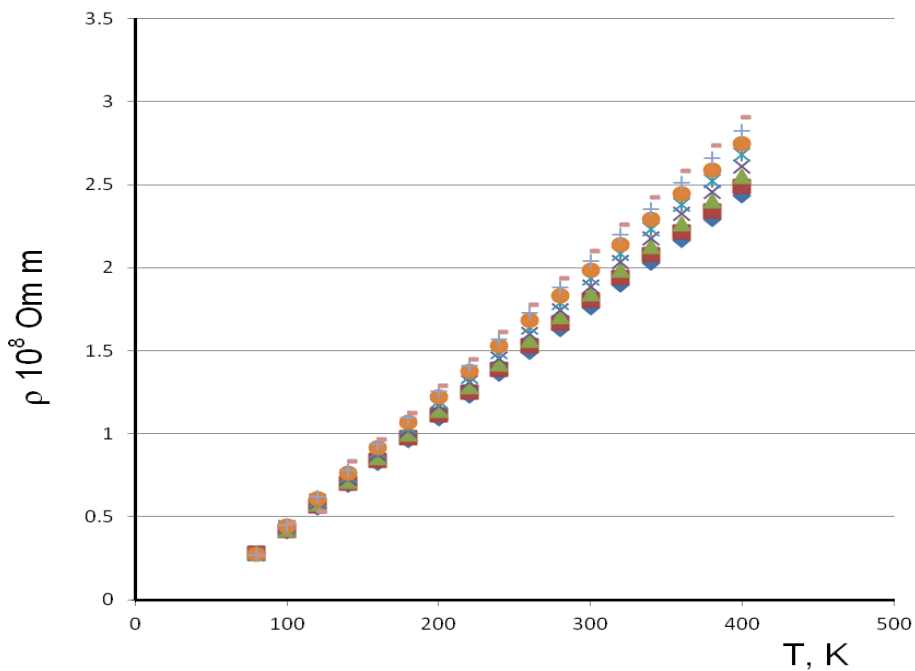
ნანოვოლფრამის სხვადასხვა პროცენტული შემცველობის Cu-W კომპოზიტების ხვედრითი ელექტრული წინაღობა იზომებოდა ოთხკონტაქტიანი პოტენციომეტრული მეთოდით, 77- 410K ტემპერატურულ დიაპაზონში. დიაგრამაზე 5 მოყვანილია გაგლინული და სუფთა სპილენძის ხვედრითი ელექტრული წინაღობის კვლევის შედეგები.



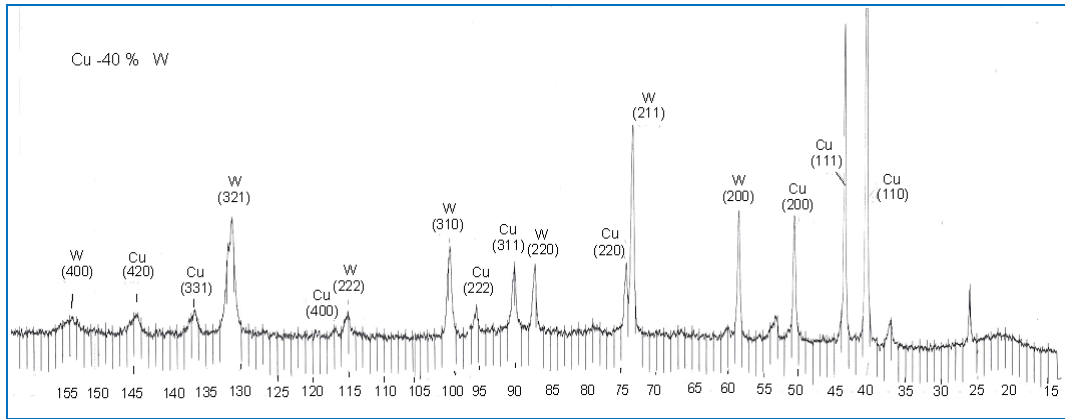
დიაგრამა 5. ხვედრითი ელექტრო წინაღობის მნიშვნელობები
 a) 1-Cu-W 10%; 2-სუფთა სპილენძი; 3- სპილენძი [23].
 b) გაგლინული სპილენძის კილიტა.

კუთრი ელექტრული წინაღობის შედეგების ანალიზი (დიაგრამა 6) გვიჩვენებს, რომ წინაღობის დამოკიდებულება ვოლფრამის კონცენტრაციაზე წრფივია და შეესაბამება პერკოლაციის თეორიას. ვოლფრამის კონცენტრაციის ზრდით 25%-ზე ზემოთ წრფივი დამოკიდებულება ირღვევა, რაც შეიძლება განპირობებული იყოს მექანიკური თვისებების ცვლილებებით (კრისტალური მესერის მკვეთრი დეფორმაციით). როგორც კვლევის შედეგებიდან გამომდინარეობს, შესაბამისი მოწვის რეჟიმის სწორად შერჩევით შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაფართოვდეს წრფივი დამოკიდებულების საზღვრები და ამავდროულად უზრუნველყოფილი იყოს მექანიკური მახასიათებლების მაღალი მნიშვნელობების შენარჩუნება ბზარების წარმოქმნის გარეშე.

სპილენძ-ვოლფრამის Cu-10%W; Cu-20%W; Cu-30%W; Cu-40%W კომ-



დიაგრამა 6. Cu-W კომპოზიტების ხვედრითი ელექტრული წინაღობის დამოკიდებულება გამოცდის ტემპერატურაზე ვოლფრამის სხვადასხვა კონცენტრაციის შემთხვევაში. W-ის კონცენტრაციები: ◆ 5%, ■ 10%, ▲ 15%, ✕ 20%, ✖ - 25%, ● 30%, + 35%, ■ 40%.



სურათი 6. Cu-40%W კომპოზიტის რენდგენოდიფრაქტოგრამა.

პოზიტების ფაზური ანალიზი ჩატარდა რენდგენულ დიფრაქტომეტრებზე DRON -2.0 და X-Ray SCINTAG INC. USA. რენდგენოდიფრაქტოგრამების ანალიზი საშუალებას იძლევა დავასკვნათ, რომ ნიმუშების კრისტალური სტრუქტურა შეესაბამება მეტალური სპილენძ-ვოლფრამის ნარევის (სურ. 6).

რენდგენოდიფრაქტოგრამებზე სპილენძისა და ვოლფრამის შესაბამისი მაქსიმუმების წინ ფიქსირდება ასევე სუსტი დიფრაქციული მაქსიმუმები, რომლებიც შეესაბამება ვოლფრამის ოქსიდებს WO_3 Cu-10%W ნიმუშში და WO_2 სხვა კომპოზიტებში.

დასკვნები

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

- ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე შეირჩა და დამზადდა ოპტიმალური პარამეტრების ლითონის ცილინდრული ფორმის კონტინერები (ამპულები);
- შემუშავდა ფხვნილოვანი კომპოზიციური მასალების - კაზმის ლითონის ამპულაში სტატიკურად ჩატვირთვის საუკეთესო მეთოდი;
- შემუშავებულია კონსტრუქცია და დამზადებულია ორიგინალური ავტომატიზირებული გამახურებელი დანადგარი;
- დადგინდა ცად-ის ტექნოლოგიით Cu-5-40% W კომპოზიტების მიღების ოპტიმალური პირობები და პარამეტრები;

- ჩვენს მიერ პირველად არის დადგენილი, რომ კომპოზიტში ვოლფრამის ნანო ნაწილაკების გამოყენება იძლევა სისალის თანაბარ განაწილებას ნაკეთობის მოცულობაში;
- სემ-ის მიკროსტრუქტურული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ კომპოზიტები ნანოზომის W შემთხვევაში ხასიათდებიან სტრუქტურის ერთგვაროვნებით, ნაკლები ფორიანობით, მაღალი სიმკვრივით, ვოლფრამის მარცვლების საკმაოდ ძლიერი შეკავშირებით სპილენძის მარცვლებთან და წარმოადგენს კომპოზიტების ელემენტებისაგან შემდგარ მიკრომექანიკურ ნარევს;
- ცად-ით მიღებული ნამზადების მექანიკური და ელექტრული თვისებების კვლევით დადგინდა, იუნგის მოდულისა $E(T)$ და შიდა ხახუნის $Q^{-1}(T)$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, დრეკადობის თვისებები და რელაქსაციური მოვლენები W-Cu კომპოზიტებში;
- შესწავლილია ცად-ით მიღებული ნანოზომისა და მსხვილმარცვლოვანი ვოლფრამის შემცველი ნამზადების გლინვითი თვისებები ვოლფრამის შემცველობაზე დამოკიდებულებით;
- დადგენილია, რომ ნიმუშების სისქის შემცირებისას გლინვის შემდეგ ადგილი აქვს კუთრი წინაღობის ზრდას, რაც შეესაბამება პერკოლაციის თეორიას.
- რენდგენოდიფრაქტოგრამების ანალიზი საშუალებას იძლევა დავასკვნათ, რომ Cu-W ნანოკომპოზიტების კრისტალური სტრუქტურა შეესაბამება მეტალური სპილენძ-ვოლფრამის ნარევს;
- მიღებული შედეგების დეტალური ანალიზით დაისახა შემდგომი კვლევების მიზნები და ამოცანები.

გამოქვეყნებული შრომები. დისერტაციის შინაარსი ასახულია 10

გამოქვეყნებულ შრომაში:

1. B. Godibadze, A. Peikrishvili, Laslo J. Kecskes, B.R. Klotz, G.I. Mamniashvili, „Structure and properties of hot shock wave consolidated Cu-W composites“, Shock-Assisted Materials Synthesis and Processing: Science, Innovations, and Industrial Implementation, Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2008. p.98
2. B. Godibadze, A. Peikrishvili, M. Tsiklauri, , L. Keskes, B. Klotz, G. Mamniashvili. "Hot Explosive consolidation of Nanostructural Cu-W Composites Structure/Property Relationship", Euro PM Congress, Copenhagen, Denmark, Vol. 3, ISBN 9781899072088. 2009, pp: 33-40. 12-14 October.
3. B. Godibadze, L. J. Kecskes, A. Peikrishvili, E. Chagelishvili, M. Tsiklauri, Z. Pan, W. Lin, and Q. Wei. „Fabrication and Properties of Hot Explosive Consolidated Ni- Al Composites.“ E.P.N.M. 2010 წ. 06-14 ივნისი Montenegro, Bechichi.
4. B. Godibadze, E. Chagelishvili, A. Peikrishvili, M. Tsiklauri. „Hot Shock Synthesis of Artificial Diamonds.“ E.P.N.M. 2010 წ. 06-14 ივნისი. Montenegro, Bechichi.
5. B. Godibadze, M. Chikhradze, N. Bochorishvili. - “Consolidation of Nanocrystalline Si and Si-Ge Powders by Shock Waves” Modern Issues of Applied Physics, Tbilisi, 2011.
6. B. Godibadze, M. Chikhradze, and N. Bochorishvili –“Consolidation of Nanocrystalline Si and Ge Powders by Shock Waves” APMAS2011; AIP Conf. Proc 1400, PP. 465-469.
7. B. Godibadze, A. Peikrishvili, L. Kecskes, G. Mamniashvili, E. Chagelishvili, V. Peikrishvili and M. Tsiklauri. “Hot explosive consolidation of nanostructured Ta-Al composites”, XI EPNM; France, Strasbourg- 2012, 2-6 May.
8. B. Godibadze, A. Peikrishvili, D. Lesuer, E. Chagelishvili, G. Mamniashvili, M. Tsiklauri. „Hot Shock-wave fabrication of nanostructured Cu-W composites”, XI EPNM; France, Strasbourg - 2012, 2-6 May.
9. J. Chicvinidze, S. Ashimov, M. Machaidze, O. Magradze, G. Donadze, G. Dvali, E. Chagelishvili, M. Tsiklauri, B. Godibadze, A. Dgebuadze and A. Peikrishvili. “Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O composites by shock consolidation technology”, XI EPNM; France, Strasbourg - 2012, 2-6 May.
10. ა. ფეიქრიშვილი, ე. ჩაგელიშვილი, ბ. გოდიბაძე, მ. წიკლაური, ა. დგებუაძე, და სხვ „ახალი ნანოსტრუქტურული Cu-W კომპოზიციების ცხლად აფეთქებით დაწნევა“. „აკადემიკოს ფერდინანდ თავაძის დაბადებიდან 100 წლისთვისადმი მიძღვნილი“ საერთაშორისო კონფერენციის მასალები, თბილისი, საქართველო, 4-6 ივნისი 2012 წ.

Abstract

The aim of first stage of thesis was to prepare correspondent equipment of HEC technology and measurement devices to evaluate electronic characteristics of fabricated billets from Cu - (5-40%) W nanostructural composition.

During the implementation of tasks according to the approved work plan there were carried out tests towards of optimization compression parameters during the predensification processes: to prevent formation of central Makh's zone as a result of collision of shock waves in the central part of consolidated precursors and to avoid formation of compaction defects in the face of cracks and anisotropy of densities along the consolidated billets.

Experimental studies relating mechanical properties of samples formed from nanocrystalline powders show that these ultra-fine grained materials are fundamentally different from their normal, coarse-grained counterparts. These materials often have very unusual properties: they are ultra-hard and wear resistant, have ideal compatibility of strength and elasticity, and are characterized by super-plasticity. When the average grain size is less than or equal to the wavelength of visible light, the material will also have unique optical, thermal, electrical and magnetic properties as well. Therefore, a decrease of grain size and concomitant control of the defect substructure of the grains seems to be a promising way to improve properties of these materials.

At present, there are various methods (cold or hot isostatic compaction in vacuum or other media) for the manufacturing of monolithic specimens from ultra-dispersed ultraviolet- and nano-sized powders. All existing conventional technologies, alongside with positive properties, introduce certain negative features. Because nano-scale grains are very sensitive towards heating, proportional to a rising temperature, they begin to grow rapidly. This grain growth causes imperfections in the nanostructure and, as a result, monoliths formed under such conditions are not characterized with those unique physical and mechanical properties that are otherwise intrinsic to nanostructured materials.

The decreasing the compaction or sinter temperature during low-temperature manufacturing processing does not lead to a desirable effect. In this case, the relatively large free surface area of the powder precludes the attainment of high-density samples. Additionally, at low temperatures, the required number of shared grain-to-grain boundaries do not form; this is especially true during the compression and consolidation of refractory and ceramic powders. Thus, pressed samples are characterized with high porosity and inadequate physical or mechanical properties.

Nevertheless, it has been accumulated sufficient experience to provide solutions to some of the aforementioned problems. The idea is to apply high temperatures, up to 1000÷1200°C, to the samples and carry out consolidation at hot conditions. Heating of the powders or alloys before loading assists to increase their plasticity, and, hence, does now during explosive loading. As a result, common

boundaries, solid solutions, intermediate layers (in case of joining bulk alloys) and other features will form. The short heating period, around 50s, prevents or suppresses grain growth processes. For example, in the case of the consolidation of amorphous powder, we have found that the short heating cycle retards the devitrification during heating. The rapid consolidation, in essence a quenching operation, maintains the nanoscale features and the amorphous glassy structure in the sample.

The novelty of the proposed, non-conventional approach relies on the fact that taking into account the high value of recrystallization temperature of tungsten the consolidation of heavy alloys in cylindrical geometry from nanosized and near nanosized Cu-W precursors will be performed in two stages: a) in the first stage, explosive compression of the precursor powder blend will be carried out at room temperature with a loading intensity of 5-20GPa to increase the initial density and to activate the particle surface in the blend; b) in the second stage, already predensified cylindrical sample will be reloaded by an explosive shock waves with intensity of compression up to 10GPa but at a temperature between 300-1000°C .

The heating takes place approximately reaching the process temperature in 2-4 min. High recrystallization temperature of tungsten prevents the grain growing process in nanoscale W and maintains its nanostructural morphology. The highly intense shock wave loading will impart fluidity to the grain surfaces increasing plasticity and, thus generate the particle-particle bonds that would not form under static conditions.

The explosive compaction process will be carried out using a cylindrical (axi-symmetric) scheme of dynamic loading. Shock waves will be initiated with the use of industrial explosives like Igdanit (ANFO) and Granulate (AC-4) NH_4NO_3 . With detonation velocity 2200-2800 m/sec and 2600-3200m/sec correspondently.