

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

წურწუმია ოლღა

**ქრომისა და რკინა-ქრომის ფუძის შენადნობების ზედაპირებზე თერმო-ქიმიური
დამუშავებით მიღებული დანაფარების სტრუქტურისა და ფორმირების მექანიზმების
გამოკვლევა**

სპეციალობა: 05.27.06 – ნახევარგამტარებისა და ელექტრონული ტექნიკის მასალების
ტექნოლოგია

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის
მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი 2006 წელი

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკურ ცენტრში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: **ქუთელია ელგუჯა,**
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი

სამეცნიერო კონსულტანტი: **მიქაძე ომარ,**
ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი

ოფიციალური ოპონენტები: **მარსაგიშვილი თამაზ,**
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი (01.04.17)

ნოზაძე დავით,
ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი (05.27.06)

დისერტაციის დაცვა შედგება 2006 წლის “ ოქტომბერს“, .00 საათზე
საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ფიზიკის დარგის
სადისერტაციო Ph.m.01.27 №7 საბჭოს სხდომაზე
მისამართი: ქ. თბილისი, 0175, მ. კოსტავას ქ. №77
დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ბიბლიოთეკაში

ავტორეფერატი დაიგზავნა 2006 წლის “ “

სადისერტაციო საბჭოს სწავლული მდივანი,
ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, დოცენტი

გ.გოდერძიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა განსაზღვრულია მცირედლეგირებული ქრომისა და ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობების გამოყენების რეალური პერსპექტივებით 1200°C და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე აგრესიულ გარემოში სამუშაოდ განკუთვნილი დეტალებისა და მოწყობილობების დასამზადებლად. დღევანდელი მოთხოვნები, რომლებიც წაყენებათ მაღალტემპერატურულ კონსტრუქციულ მასალებს, აღმატებიან ტრადიციული მხურვალმტკიცე და მხურვალმედეგი ნიკელის, რკინის და კობალტის ფუძის შენადნობების პოტენციურ შესაძლებლობებს, ამიტომ ახალი მაღალტემპერატურული კონსტრუქციული მასალების შემუშავება და შექმნა ძნელდნობადი ლითონების ბაზაზე გახდა მასალათმცოდნეობის ერთ-ერთი უმთავრესი პრობლემა. პრობლემის აქტუალობას ამძაფრებს ის გარემოებაც, რომ პრაქტიკულად არ არსებობენ კონსტრუქციული მასალები, რომლებსაც შეეძლება იმუშაონ ხანგრძლივად 1200°C და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე ჩვეულებრივ ატმოსფეროსა და სხვა აგრესიული გარემოს პირობებში. აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტის მიმართულებით უკვე გაჩნდა სამუშაოები (თავაძე, მიქაძე, რაკიცი და სხვ.) მცირედლეგირებული ქრომისა და ექვიატომურს მიახლოებული Fe-Cr შენადნობების ბაზაზე განსაკუთრებულად მხურვალმედეგი მასალების მიღებისა, დაფუძნებული ოპტიმიზებული შედგენილობის ლითონური მატრიცის ზედაპირზე მოცულობითი დიფუზიის დაბალი პარამეტრების მქონე ოქსიდური ფენების ფორმირების პრინციპზე.

ამ ბოლო დრომდე, როგორც მონოგრაფიულ ლიტერატურაში (კოფსტადი, რობერტსი, ორმონტი, კოლონგი და სხვ.), აგრეთვე მრავალრიცხოვან სტატიაში მიძღვნილს ლითონ/გაზი გამყოფი საზღვრის ფიზიკა-ქიმიასა და მცირედლეგირებული ქრომისა და Fe-Cr-Al-RE სისტემის შენადნობების მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესებისადმი განსაკუთრებული აქცენტი კეთდება ოქსიდური ფირების (მათ შორის ბარიერული დამცავი ფენების) ჩასახვისა და ზრდის მექანიზმების მოდელის შექმნაზე მათი რეალური სტრუქტურისა და აღნაგობის გათვალისწინებით. ზედაპირების ფიზიკურ-ქიმიური ანალიზის მეთოდების სწრაფ განვითარებასა და სრულყოფასთან ერთად ნათელი გახდა, რომ ლითონებისა და მათი შენადნობების ზედაპირებზე ოქსიდური ფენების ფორმირების მექანიზმები გაცილებით უფრო რთულია ვიდრე ეს ითვლებოდა ადრე, როდესაც თეორიული წარმოდგენების ფორმირების ბაზას ძირითადად წარმოადგენდნენ კინეტიკური მონაცემები და მეტალოგრაფიული სტრუქტურული კვლევები.

ჩვენი სამუშაოს დაწყების მომენტისათვის ძირითადი სირთულე, დაკავშირებული მხურვალმედეგი ლეგირების პრინციპების შემდგომი განვითარებისათვის ძნელდნობადი ლითონების ბაზაზე ახალი, განსაკუთრებულად მაღალი ქიმიური წინაღობის (მაღალტემპერატურული კოროზიამედეგობის) მქონე კომპოზიციური მასალების მიღებასთან, მდგომარეობდა იმაში, რომ ვერც ერთი არსებული ჟანგვის თეორია ვერ იძლეოდა დამაკმაყოფილებელ დასაბუთებას აღნიშნული მასალების მხურვალმედეგობის მოსალოდნელი პარამეტრებისა. ამიტომ, წარმოიშვა აუცილებლობა ზედაპირული ფენების კრისტალოგრაფიაზე, ქიმიურ

შედგენილობაზე, დეფექტურობაზე და მორფოლოგიაზე მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე ახალი ექსპერიმენტული მონაცემების დაგროვებისა მაღალი გარჩევის უნარისა და მგრძობიარობის მქონე ისეთი მეთოდების კომპლექსურად გამოყენების საფუძველზე, როგორებიცაა მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (მემ), ჩქარი ელექტრონების დიფრაქცია (ჩედ), ენერგოდისპერსიული რენტგენული მიკროანალიზი (ედრმ), ოჟე-ელექტრონული სპექტრომეტრია (ოეს) და ტალღა-დისპერსიული სპექტრომეტრია (ტდს). სწორედ ამ მეთოდებისა და მათი განსახორციელებელი ტექნიკური ბაზის განვითარებამ უზიდა მკვლევარებს ბოლო ათწლეულში გაეშალათ ფართო ფრონტით შემდგომი კვლევები მაღალტემპერატურული დამცავი ოქსიდური ფირების მიღების მეცნიერულად დასაბუთებული ტექნოლოგიების შესამუშავებლად, რადგან ზედაპირებზე ფიზიკურ-ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის პრობლემა იყო და რჩება განსაკუთრებული მნიშვნელობის მქონედ მეცნიერული დასაბუთებისათვის ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესისა ფუნქციონალური ზედაპირების ფორმირებისათვის, რომლებიც გამიზნულია მაღალტემპერატურული აგრესიული გარემოსა და ხახუნის პირობებში სამუშაოდ.

დღეისათვის არ არსებობენ ისეთი ლითონური შენადნობები, რომლებიც თავიანთი მხურვალმტკიცობისა თუ მხურვალმდეგობის თვისებათა კომბინაციით უზრუნველყოფდნენ საჰაერო და სახმელეთო მაღალეფექტური აირტურბინული დანადგარების დეტალების ფუნქციონალურ რესურსებს. სირთულეს წარმოადგენს ამ თვისებების მიღება არაკომპოზიციური მასალისაგან. ამიტომ, მოცემული სიძნელის გადალახვას ცდილობენ ისეთი კომბინირებული მასალების გამოყენებით, რომელთა ფუძეებიც მაღალი მხურვალმტკიცობის ლითონური შენადნობებია, ხოლო მათ ზედაპირებზე კი ფორმირებულია დამცავი ოქსიდური ფენები, რომლებსაც თავის მხრივ გააჩნიათ ანტიკოროზიული და თერმობარიერული თვისებები. შენადნობებზე ზედაპირული დამცავი ფენების შექმნის მეთოდების შემუშავება, რომლებიც წარმოადგენენ მაღალ ტემპერატურებზე გამოყენების აირტურბინული მოწყობილობების დეტალების დამუშავების ტექნოლოგიის ნაწილს, მოითხოვს ძალიან დიდი რაოდენობის ინფორმაციის არსებობას ნელამზარდი, სტაბილური და ადპერენტული ზედაპირული ოქსიდის ფორმირების განმაპირობებელი ფაქტორების, ფურჩის გავლით კათიონებისა და ანიონების დიფუზიის გზების ბლოკირების მექანიზმების შესახებ და ასევე თერმული და თერმომექანიკური ციკლირებებისა და დაბუთობათა წარმოშობის და მათი რელაქსაციის მექანიზმის შესახებ. ამასთან დაკავშირებით ბოლო დროის განმავლობაში მკვეთრად გაიზარდა ინტერესი მცირედლევირებული ქრომის კომპოზიციების მიმართ და განსაკუთრებით კი Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობების მიმართ, რომლებიც განიხილებიან როგორც ქრომისა და ალუმინის ჟანგის წარმომქმნელი პერსპექტიული მასალები ისეთ ნაკეთობათა დეტალების დასამზადებლად რომლებიც გამიზნულია 1200°C-ზე და შესაძლოა უფრო მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ.

იმის გათვალისწინებით, რომ კოროზია წარმოადგენს არსებითად მიკროსკოპულ პროცესს და იგი ყოველთვის იწყება ზედაპირიდან, სრულიად ბუნებრივი იყო იმის მოლოდინი, რომ მაღალტემპერატურული ჟანგისას მნიშვნელოვანი ზეგავლენა ექნებოდა ზედაპირის საწყის მდგომარეობას ფურჩის ფორმირებასა და ზრდის პირველ

სტადიებზე. თუმცა, როგორც არსებული ლიტერატურის ანალიზი გვიჩვენებს ამ თვალსაზრისით ეს საკითხი არასაკმარისადაა შესწავლილი.

დისკუსიას, ლითონებისა და მათი ფუძის შენადნობების მექანიკურად პოლირებული ზედაპირის სტრუქტურისა და თვით პოლირების პროცესის მექანიზმზე, ჯერაც არ დაუკარგავს თავისი სიმდაფრე და აქტუალობა. საქმე ის არის, რომ აღნიშნული მასალებიდან რეალურ ნაკეთობათა დამზადებისას ცივი დამუშავების ისეთი სახეობები, როგორებიცაა ხეხვა და მექანიკური პოლირება წარმოადგენენ აუცილებელ ტექნოლოგიურ პროცესებს მანქანათმშენებლობის სხვადასხვა სფეროში გამოყენებული აგრეგატებისა და მანქანების საპასუხისმგებლო დეტალებზე ფუნქციონალური ზედაპირების ფორმირებისათვის. ამასთან, კონსტრუქციული მასალების ზედაპირულ ფენებში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური რეაქციების პრობლემა იყო და რჩება განსაკუთრებულად მნიშვნელოვნად იმ ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესის მეცნიერული დასაბუთებისათვის, რომლებიც დაკავშირებულნი არიან ფუნქციონალური ზედაპირების შექმნასთან.

ხახუნის პროცესში (ტრიბოსისტემებში) და მექანიკური პოლირებისას ფორმირებული ზედაპირული ფენების ბუნების, თვისებების, აღნაგობის და მასალის მდგომარეობის სტრუქტურულ-თერმოდინამიკური ანალიზი, ჩატარებული პლასტიკური დეფორმაციისათანამედროვე დისლოკაციური თეორიის გამოყენებით, გვაძლევს საფუძველს დავასკვნათ, რომ ბეილბის ფენები არსებული მექანიკურად პოლირებულ ზედაპირებზე და ტრიბოსისტემებში მოხახუნე ზედაპირებზე არიან იდენტურნი, როგორც დესტრუქციის პროდუქტები, რომლის სიჩქარეც კონტროლდება ენტროპიის წარმოქმნის სიჩქარით. ზემოთქმული წარმოდგენების საფუძველზე ბეილბის ფენა წარმოადგენს მყარი სხეულის ენტროპიულად “დატუმბულ” ზედაპირულ ფენას და შესაძლებელია განიხილებოდეს როგორც ფუნქციონალური სისტემა, რომელიც გარედან ენერჯის მოდინების პირობებში (სითბური, თერმომექანიკური, თერმო-ქიმიური და სხვ.) გამოავლენს სისტემის რეაქციის ადაპტურ ეფექტებს გარე ფაქტორების ცვლილებებზე. ნათელია ასევე, რომ უფრო ფაქიზი და მრავალფეროვანი შეიძლება აღმოჩნდეს ბეილბის ფენის ზეგავლენა სხვადასხვა სუბსტრატის ზედაპირზე შექმნილი ელექტრონული ტექნიკის კომპონენტების მაგნიტურ და სხვა ფიზიკურ თვისებებზე. ამის გამო, ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე მექანიკური პოლირების დროს და ხახუნისას ზედაპირული სტრუქტურის წარმოქმნის იერარქიული თანმიმდევრობის ბუნების შესახებ წარმოდგენების გაღრმავება მნიშვნელოვნებას იძენს ტექნიკის ფართო სპექტრის სფეროთათვის.

არსებულ წარმოდგენათა თანახმად, მექანიკური დამუშავებით (ხეხვა+პოლირება) დამახინჯებული ფენა არის მეტ-ნაკლებად განვრცობილი ზონა მყარი სხეულის გეომეტრიული ზედაპირის ქვეშ, რომელშიც დამუშავების გამოყენებული საშუალებების ფიზიკური ან/და ქიმიური ზემოქმედების შედეგად, გარემოს ზემოქმედებასთან ერთად, ადგილი აქვს რთულ ფაზურ და სტრუქტურულ ტრანსფორმაციებს. ამიტომ, ბუნებრივია ვივარაუდოთ, რომ დამახინჯებული ფენა არაერთგვაროვანია და თავად შესაძლოა შესდგებოდეს რამოდენიმე ზონისაგან გარე ზემოქმედების ძალების განაწილების ხასიათზე დამოკიდებულებით. თუმცა, უმეტეს შემთხვევაში ამ შემადგენელ ზონათა სისქეები უცნობია და ყოველ კონკრეტულ

შემთხვევაში აუცილებელია მათი ექსპერიმენტული განსაზღვრა უფრო მგრძობიარე და მაღალი გარჩევის ზედაპირის ანალიზის თანამედროვე მეთოდებით ვიდრე ჩვეულებრივი მეტალოგრაფია.

სამუშაოს მიზანი და ამოცანები ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად:

1. ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირებზე მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესში ფორმირებული ფურჩის თავისებურებებზე ზედაპირის მოდიფიცირებისა და თერმო-ქიმიური დამუშავების ზეგავლენის გამოკვლევა;

2. ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მექანიკურად პოლირებულ ზედაპირზე ფორმირებული ბეილბის ფენის სისქის, ნანოსტრუქტურის, კომპოზიციური შემადგენლობისა და სტაბილურობის საზღვრების დადგენა ზედაპირების ზონდირების თანამედროვე ექსპერიმენტული მეთოდების კომპლექსური გამოყენებით;

3. Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის ზედაპირზე 1000-1400°C ტემპერატურულ ინტერვალში ჟანგვისას წარმოქმნილი ფურჩის ფორმირების საწყისი სტადიებისა და ზრდის სტრუქტურული ასპექტების ექსპერიმენტული გამოკვლევა;

4. ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობისა და მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირებზე მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესში ფურჩის ფორმირების იერარქიული თანმიმდევრობის სტრუქტურული მექანიზმის შესაძლო სრული სურათის აგება 1200°C და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე მუშაობისათვის განკუთვნილი დეტალების ზედაპირებზე ცვეთამედეგი და კოროზიამედეგი ოქსიდური დანაფარების მიღების ტექნოლოგიების სამეცნიერო საფუძვლების შექმნის მიზნით.

სამეცნიერო სიახლე. ნაშრომში წარმოდგენილია მცირედლეგირებული ქრომისა და ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მოდიფიცირებულ ზედაპირებზე მაღალტემპერატურული კოროზიისაგან დამცავი (ბარიერული) ოქსიდური ფირების ფორმირების კანონზომიერებათა სტრუქტურული ასპექტების ექსპერიმენტული შესწავლის შედეგები. პირველადაა შესწავლილი ოქსიდური ფირების მორფოლოგიაზე, მის ფაზურ შედგენილობაზე, სტრუქტურულ ტრანსფორმაციებზე და დამცავ თვისებებზე საწყისი ზადაპირის მდგომარეობის გავლენა მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე მაღალი გარჩევის უნარისა და მგრძობიარობის მქონე თანამედროვე მეთოდების (მემ, ოეს, ტდს, ჩედ, ედს) კომპლექსური გამოყენებით.

1. დადგენილია, რომ ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირების მოდიფიცირება ლანთანის იმპლანტაციით იძლევა მნიშვნელოვან ეფექტს მხურვალმედეგობის ზრდაზე 1200-1300°C ტემპერატურებზე, განსაკუთრებულად ჟანგვის საწყის სტადიებზე.

2. პირველად იქნა დადგენილი ქრომის მაღალი (>40%) შემცველობის Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მექანიკურად პოლირებულ ზედაპირულ შრეში ოთხი

განსხვავებული სტრუქტურისა და კომპოზიციის მქონე ზონის არსებობა, რომელთაგან გეომეტრიული ზედაპირის მიმდებარე ორი ქვეზონა წარმოადგენს ბეილბის ფენის ერთმანეთთან ორგანულად შერწყმულ ჭეშმარიტად ამორფულ და “რენტგენოამორფულ” შრეებს ჯამური სისქით ~60ნმ.

3. პირველად იქნა დადგენილი, რომ Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის მექანიკურად პოლირებული ნიმუშის ზედაპირული $\leq 1 \mu$ სისქის ფენა, შემდგარი ამორფული ბეილბის ფენისა და მისი მიმდებარე, მატრიცის პლასტიკური დეფორმაციით გამოწვეული დაწვრილმარცვლოვანებული ფენისაგან, როგორც ენტროპიულად “დატუმბული” ფუნქციონალური სისტემა, 1200°C-ზე ლაბორატორიულ ატმოსფეროში ტრანსფორმირდება ერთგვაროვანი სისქის ისეთ ზედაპირულ ფენად, რომელსაც გააჩნია ფურჩის მიკრონაოჭების მოდულირებული სტრუქტურა, შემდგარი ლითონური მატრიცის ძირითადი კომპონენტების ატომთა ოქსიდების ნანოკრისტალიტების (100÷500 ნმ) ნარევისაგან.

4. პირველად იქნა ნაჩვენები, რომ ჟანგვის ტემპერატურის 1400°C-მდე გაზრდასთან ერთად ადგილი აქვს ნანოკრისტალიტების წამოზრდასა და რეკრისტალიზაციურ პროცესებს, რომელთაც თან ახლავს ოქსიდების ნანონაწილაკებს შორის მყარფაზოვანი რეაქციები და რომლებიც გვირგვინდებიან ლითონურ მატრიცაზე ფურჩის განშრევებითა და Al₂O₃-ის პოლიკრისტალური სტრუქტურის (მარცვლოვანებით 1-3 μ) თხელი ერთგვაროვანი ფენის ფორმირებით, რომელსაც თავის მხრივ ახასიათებს ძლიერი ადჰერენტულობა ლითონურ სუბსტრატთან და დამცავი თვისებები როგორც მაღალტემპერატურული (1200°C) კოროზიის, ასევე მისი აბრაზიული ცვეთის წინააღმდეგ.

სამეცნიერო და პრაქტიკული ღირებულება. დისერტაციის შედეგები შეიძლება ფართო დიაპაზონით იყოს გამოყენებული პრაქტიკაში, რადგან მიღებული შედეგები გვიჩვენებენ ქრომის ფუძისა და ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მხურვალმედეგობის შემდგომი ამაღლების ახალ გზებს; აგრეთვე მხურვალმტკიცობისა და მხურვალმედეგობის ოპტიმალური თანაფარდობის მქონე ახალი კომპოზიციების შემუშავებისა და მათი მაღალტემპერატურული და ტრიბოლოგიური თვისებების მართვის შესაძლებლობებს.

ამ ნაშრომში დადგენილი კანონზომიერებანი, მექანიკურად დამუშავებული ზედაპირების სტრუქტურული და ფაზური ტრანსფორმაციების იერარქიული თანმიმდევრობისა მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე, შეიძლება გამოყენებულ იქნას თვითორგანიზებადი დამცავი ბარიერული ოქსიდური დანაფარების მისაღები ტექნოლოგიების სამეცნიერო ბაზად მასიური და მცირე ზომის ნამზადებზე ფუნქციონალური ზედაპირების შესაქმნელად.

დასაცავად გამოტანილი ძირითადი დებულებები. დასაცავად გამოტანილია შემდეგი ძირითადი დებულებები:

1. ქრომისა და ექვიატომურს მიახლოებული რკინა-ქრომის ფუძის შენადნობების მოდიფიცირებულ ზედაპირებზე თერმო-ქიმიური დამუშავებით მიღებული ოქსიდური (მათ შორის ბარიერული) დანაფარების ფორმირების მექანიზმის სტრუქტურული ასპექტების კვლევის შედეგები.

2. ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მექანიკურად პოლირებულ ზედაპირზე ფორმირებული ბეილბის ფენის სისქის, ნანოსტრუქტურის, კომპოზიციური შედგენილობისა და სტაბილურობის დადგენილი საზღვრების დამოკიდებულება მექანიკური დამუშავების პარამეტრებზე.

3. ქრომის მაღალი შემცველობის (>40%) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის ზედაპირზე $1200 \pm 1400^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში ჟანგვისას წარმოქმნილი ფურჩის მოდულირებული სტრუქტურის წარმოშობის და მისი ტრანსფორმაციების ექსპერიმენტული კვლევისა და სტრუქტურულ-თერმოდინამიკური ანალიზის შედეგები.

4. განსაკუთრებულად მზურვალმედეგი და ცვეთამედეგი კომპოზიციების შექმნის პრინციპი ენტროპიულად “დატუმბული” ზედაპირული ფენის თვითორგანიზაციის გზით, მოცულობითი დიფუზიის დაბალი პარამეტრების მქონე ოქსიდებისგან თხელი, დამცავი ფენების ფორმირება.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა **71-ე** ღია სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (აპრილი 2003წ., თბილისი), სტუდენტთა და ასპირანტთა სოროსის კონფერენცია-კონკურსზე (მაისი 2003წ., თბილისი), საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა **72-ე** ღია სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (აპრილი 2004წ., თბილისი), ახალგაზრდა მასალათმცოდნეთა საერთაშორისო კონფერენციაზე **JuniorEuromat 2004** (6-9 სექტემბერი 2004წ., ლოზანა, შვეიცარია), ევროპის კოროზიის კონგრესზე **EuroCorr 2005** (4-8 სექტემბერი 2005წ., ლისაბონი, პორტუგალია), ნიუ მექსიკოს სამთო საქმისა და ტექნოლოგიების ინსტიტუტის (NMT) საინჟინრო მექანიკის და მესალებისა და მეტალურგიული ინჟინერიის დეპარტამენტების გაერთიანებულ სემინარზე (2 დეკემბერი 2005წ., სოკორო, ნიუ მექსიკო, აშშ), ახალგაზრდა მასალათმცოდნეთა საერთაშორისო კონფერენციაზე **JuniorEuromat 2006** (4-8 სექტემბერი 2006წ., ლოზანა, შვეიცარია), ზედაპირის პლაზმური ინჟინერიის მეათე საერთაშორისო კონფერენციაზე **PSE 2006** (10-15 სექტემბერი 2006წ., გარმიშ-პარტენკირხენი, გერმანია), საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკური ცენტრის სამეცნიერო სემინარებზე (აპრილი და მაისი 2006წ., თბილისი).

პუბლიკაციები. დისერტაციის მასალები გამოქვეყნებულია რვა ნაშრომში.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შესდგება შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნებისა და **137** დასახელების ციტირებული ლიტერატურისაგან. დისერტაციის სრული მოცულობა შეადგენს **146** ნაბეჭდ გვერდს მათ შორის **6** ცხრილი და **25** ილუსტრაცია.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალში მოცემულია თემის აქტუალობისა და მოცემული სამუშაოს ჩატარების აუცილებლობის დასაბუთება, ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი და ამოცანები.

პირველი თავი ეძღვნება ქრომის, მცირედლეგირებული ქრომისა და Fe-Cr-Al-RE სისტემის შენადნობების მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესებზე არსებული ლიტერატურისა და წარმოდგენების კრიტიკულ მიმოხილვას. ნაჩვენებია, რომ ლითონებისა და მათი შენადნობების ზედაპირებზე ოქსიდური ფენების ფორმირების მექანიზმები გაცილებით უფრო რთულია ვიდრე ეს ითვლებოდა ადრე, როდესაც თეორიული წარმოდგენების ფორმირების ბაზას ძირითადად წარმოადგენდნენ კინეტიკური მონაცემები და მეტალოგრაფიული სტრუქტურული კვლევები, და რომ ძირითადი სირთულე მხურვალმედეგი ლეგირების პრინციპების შემდგომი განვითარებისათვის ძნელდნობადი ლითონების ბაზაზე ახალი, განსაკუთრებულად მაღალი ქიმიური წინააღმდეგობის მქონე კომპოზიციური მასალების მისაღებად მდგომარეობს იმაში, რომ ვერც ერთი არსებული ჟანგვის თეორია ვერ იძლევა დამაკმაყოფილებელ დასაბუთებას აღნიშნული მასალების მხურვალმედეგობის მოსალოდნელი პარამეტრებისა. განხილულია არსებული წარმოდგენების ევოლუცია ლითონებისა და შენადნობების ზედაპირების მექანიკური პოლირებით გამოწვეული ფაზურ-სტრუქტურული ტრანსფორმაციების შესახებ და ნაჩვენებია დღემდე არსებული წინააღმდეგობრივი ხასიათი ბეილბის ფენის სტრუქტურისა და მისი ფორმირების შესახებ არსებული მონაცემებისა. ნაჩვენებია, რომ აშკარად არასაკმარისადაა შესწავლილი საწყისი ზედაპირის მდგომარეობის გავლენა ლითონებისა და შენადნობების მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესებზე და ამ პროცესების შედეგად ფორმირებული ოქსიდური ფენების სტრუქტურასა და დამცავ თვისებებზე. პრაქტიკულად არ არსებობს კვლევები მაღალტემპერატურული კოროზიის სტრუქტურულ ასპექტებზე Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობებისათვის, რომლებშიც ქრომის შემცველობა ჰარბობს 40%. დასაბუთებულია თერმო-ქიმიური დამუშავების პერსპექტიულობა ქრომისა და Fe-Cr ფუძის შენადნობების მხურვალმედეგობის გაზრდის საქმეში.

მეორე თავში გამომდინარე კვლევის მიზნებიდან და საკვლევი ობიექტის სირთულიდან, რაც გამოიხატება ზედაპირების ძალიან თხელ ფენებში მიმდინარე პროცესების მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე კვლევაში და მრავალკომპონენტთან სისტემებში ოქსიდური ფენების წარმოქმნის მექანიზმის ექსპერიმენტულ დადგენაში, ჩამოყალიბებულია აზრი კვლევის ისეთი მეთოდების კომპლექსურად გამოყენების შესახებ, როგორებიცაა მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (მემ), ოჟე-ელექტრონული სპექტრომეტრია (ოეს), ჩქარი ელექტრონების დიფრაქცია (ჩედ), ენერგოდისპერსიული რენტგენული მიკროანალიზი (ედრმ) და ტალღა-დისპერსიული სპექტრომეტრია (ტდს). განხილულია თითოეული ამ მეთოდით ექსპერიმენტების ჩატარების თავისებურებები საკვლევი ობიექტების კომპოზიციურობიდან გამომდინარე.

სამუშაოში საკვლევი ობიექტებად გამოყენებული იყო შენადნობები, ერთის მხრივ, შემადგენლობის მიხედვით ყველაზე მეტად ოპტიმალური პრაქტიკული გამოყენების პერსპექტივის თვალსაზრისით, ხოლო მეორეს მხრივ ყველაზე მეტად ხელსაყრელი მეთოდურ ასპექტში დაყენებული ამოცანის გადაწყვეტისათვის – მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესში შერჩეული შენადნობების ზედაპირებზე

ფურჩის ფორმირების იერარქიული თანმიმდევრობის სტრუქტურული მექანიზმების შესაძლო სრული სურათის აგება ცვეთამედეგი და კოროზიამედეგი ოქსიდური დანაფარების მიღების ტექნოლოგიების სამეცნიერო საფუძვლების შესაქმნელად. ექსპერიმენტისათვის არჩეული შენადნობების შემადგენლობა, თერმული და მექანიკური დამუშავებების რეჟიმები და ობიექტების პრეპარირების მეთოდები ასევე მეორე თავშია გადმოცემული.

მესამე თავში წარმოდგენილია ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის ოპტიმიზებული BX-2K შენადნობის ზედაპირების მაღალტემპერატურული ჟანგვის პროცესების კინეტიკასა და ჟანგვისას ფორმირებული ოქსიდური დანაფარების თვისებებზე დასაყანგი ზედაპირების მოდიფიცირების გავლენის თავისებურებები. ჩატარებული იქნა შედარებითი გამოცდები მხურვალმედეგობაზე არალეგირებული ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის BX-2K შენადნობების ნიმუშებისა, რომელთა ზედაპირებზე სხვადასხვაგვარი ხერხით იქმნებოდა ბარიერული ფენები.

2,5 საათის განმავლობაში ჰაერზე ნიმუშების დაჟანგვის პარამეტრების გამოკვლევებმა უჩვენეს, რომ აღნიშნულ ფენებს შეუძლიათ იმუშაონ როგორც ეფექტურმა წინააღმდეგობებმა დამჟანგველი აგენტების დიფუზიის გზაზე. მატრიცის დაცვის ეფექტი განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანია ჟანგვის ადრეულ სტადიებზე (იხ. **ცხრილი 1**), ამასთან მხურვალმედეგობის განსაკუთრებული ნამატი, დამზერილი ლანთანის იონების იმპლანტაციის შემდგომ, მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირულ შრეებში, ნარჩუნდება უფრო ხანგრძლივად (იხილეთ დანართი, **სურ.1**).

მიკრორენტგენული სპექტრალური ანალიზისა და ელექტრონოგრაფიული კვლევების საფუძველზე დადგენილია ზემოაღნიშნული ეფექტების მიზეზი. კერძოდ, აღმოჩენილია რომ ლანთანის ატომები სეგრეგირებენ ოქსიდური მარცვლების საზღვრებზე ლანთანის ქრომიტების სახით და აბლოკირებენ დაჩქარებული დიფუზიის არხებს ქრომის გადატანისას და აყოვნებენ ახალი ოქსიდური ფენების წარმოქმნას ფურჩის შიგნით, რაც წარმოადგენს საკმარის მიზეზს ფურჩის ზრდის სიჩქარის მკვეთრი შემცირებისა და მისი ადჰერენტულობის ამაღლებისა.

ცხრილი 1. ნიმუშების ჟანგვის პარამეტრები 2.5 საათის განმავლობაში

ნიმუში	W მგ/სმ ²	
	1200 °C	1300 °C
არალეგირებული ქრომი	2.71	—
ქრომი, დაფენილი ლანთანის ჰექსაბორიდით	0.82	1.75
მცირედლეგირებული ქრომი (BX-2K)	0.78	1.71
BX-2K დაფენილი ლანთანის ჰექსაბორიდით	0.25	0.52
BX-2K დაფენილი ლანთანით	0.37	0.61
BX-2K იმპლანტირებული ლანთანით	0.12	0.36

ჩატარებული გამოკვლევების შედეგების საფუძველზე გაკეთებულია დასკვნა, რომ ფურჩში მარცვალთაშორისი ბარიერების კონცენტრაციის გაზრდას, აღნიშნული აქტის რეალიზაციის საშუალებისაგან დამოუკიდებლად, მივყავართ Cr₂O₃-ის

წარმომქმნელი შენადნობების მხურვალმედეგობის მნიშვნელოვან გაზრდამდე. ამასთან, არსებობს სერიოზული საფუძველი ვივარაუდოთ, რომ მხურვალმედეგობის მაქსიმალური მატება რომელიც დაიმზირება ლანთანის იონების იმპლანტაციის შედეგად, განპირობებულია ზედაპირის იმპლანტაციისას მოდიფიცირების ორმაგი ეფექტით – ერთი, ზედაპირზე ლანთანის კონცენტრაციის თანაბარი გაზრდით მისი ხსნადობის ზღვარზე მეტი რაოდენობით და მეორე, იმპლანტაციის თანმხლები ზედაპირული ფენის ამორფიზაციის პროცესით. ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირებზე ფორმირებული ფურჩის სტრუქტურისა და მისი თვისებების შესწავლის და ლიტერატურაში არსებული ანალოგიური კვლევების შედეგების ანალიზზე დაყრდნობით ჩამოყალიბებულია აზრი, რომ ზედაპირის ამორფიზაციის, ზედაპირული შრეების რეაქტიული ელემენტებით (RE) გამდიდრებისა და ზედაპირების წინასწარი თერმო-ქიმიური დამუშავების პარამეტრების ოპტიმალური კომბინაციების შემუშავება შეიძლება დაედოს საფუძვლად მხურვალმტკიცე მასალების ზედაპირებზე მხურვალმედეგი ბარიერული და ცვეთამედეგი ოქსიდური დანაფარების მიღების ახალ უნივერსალურ პრინციპებს შესაბამის ტექნოლოგიებში რეალიზაციისას 1200 °C და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ განკუთვნილი ნამზადების ზედაპირებზე ფუნქციონალური ზედაპირების შესაქმნელად.

მეთხე თავში დასაბუთებულია Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობებიდან კვლევისათვის Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La კონკრეტული შედგენილობის შენადნობის შერჩევის მიზანშეწონილობა და მისთვის მაღალტემპერატურული ჟანგის პროცესში ფურჩის ფორმირების სტრუქტურული ასპექტების კვლევის აუცილებლობა ზედაპირების ანალიზის თანამედროვე მეთოდების კომპლექსური გამოყენებით. წარმოდგენილია შერჩეული კომპოზიციის შენადნობის გახეხილი ზედაპირის პოლირებისას მიმდინარე გარდაქმნების ხასიათისა და მექანიკური დამუშავებით წარმოქმნილი დამახინჯებული ფენების სისქეებისა და სტრუქტურის კვლევის შედეგები. აგრეთვე დასაჟანგი ზედაპირების საწყისი მდგომარეობის გავლენა ბარიერული ოქსიდური ფენების ფორმირების პროცესებზე ტემპერატურულ ინტერვალში 1000÷1400 °C. Fe-Cr-Al-RE სისტემიდან შენადნობის არჩევანი განპირობებული იყო ორი მოსაზრებით: *პირველი* – მოცემული სისტემის შენადნობების მიმართ პრაქტიკული ინტერესით, რადგან ისინი განიხილებიან როგორც ქრომისა და ალუმინის ჟანგის წარმომქმნელი პერსპექტიული მასალა, ნაკეთობათა ისეთი დეტალების დასამზადებლად, რომლებიც განკუთვნილნი არიან 1200 °C და შესაძლოა უფრო მაღალ ტემპერატურებზე სამუშაოდ; და *მეორე* – მოცემული სამუშაოს ამოცანების გადაწყვეტის მეთოდური ხელსაყრელობით (დნობისა და რეკრისტალიზაციის მაღალი ტემპერატურა, არც თუ მაღალი პლასტიურობა, შენადნობის მულტიკომპონენტობა ზედაპირული ფენის პლასტიკური დინებით ამორფიზაციისას გადატანის სელექტიურობის (ან მისი არ არსებობის) ინდიკაციისათვის და ბეილბის ფენის მოსალოდნელი მაღალი თერმოდინამიკური მდგრადობა შენადნობში ისეთი ელემენტების არსებობის გამო, რომელთაც გააჩნიათ ძლიერი სწრაფვა ჟანგბადის მიმართ). საწყის ნიმუშებს, რომლებიც ამორჩეულნი იყვნენ მემ, ოეს, ჩედ და ტდს მეთოდებით საკვლევად ვანიჭებდით ისეთ გეომეტრიულ ფორმასა და ზომებს, როგორც ხელსაყრელი იქნებოდა ჩვენს მიერ გამოყენებული ყველა საკვლევი დანადგარის ნიმუშის დამჭერზე მათი დამაგრებისათვის, იმ მიზნით, რომ ერთსა და

იმავე ნიმუშზე შეგვძლებოდა ჩაგვეტარებინა გამოკვლევები კომპლექსურად ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდების გამოყენებით. ბეილბის ფენის ფორმირების მიზნით ზედაპირების დამუშავება, საფინიშო ხეხვიდან დაწყებული საბოლოო პოლირებით დამთავრებული, ხორციელდებოდა ხელით ზუმფარის ქაღალდების, ტილოს საფენებზე დატანილი ალმასის საპოლირებელი პასტებისა და MgO-ს ნანოფხვნილის გამოყენებით. ნიმუშების მომზადება, მათ გეომეტრიულ ზედაპირებზე ფორმირებული ბეილბის ფენით, ტარდებოდა მექანიკური პოლირების ორი სქემის მიხედვით. აქედან პირველის მიხედვით – ნიმუშის $20 \pm 10 \mu$ ზომის მარცვლების მქონე დამყვანი რგოლით სასუფთაო ხეხვაგავლილი ზედაპირი გადიოდა საფინიშო ხეხვის სტადიას $7 \pm 5 \mu$ ზომის მარცვლოვანების ზუმფარის ქაღალდზე (აღნიშნული სტადია შეიძლება ჩავთვალოთ ასევე მექანიკური პოლირების წინასწარ სტადიად) და ბოლო ორ, შუალედურ და საფინიშო პოლირების სტადიებს, რომლებიც ტარდებოდა საპოლირებელი პასტების გამოყენებით შესაბამისად 5 ± 1 და $1 \pm 0.2 \mu$ აბრაზიული ნაწილაკების ზომებით. მეორე სქემის მიხედვით – საფინიშო ხეხვის შემდგომ ნიმუშის ზედაპირიდან ელექტროქიმიურად, პოლირების რეჟიმში ანოდური გახსნის მეთოდით სრულიად იხსნებოდა წინა მექანიკური დამუშავებით დამახინჯებული ფენა (სისქით $\sim 2 \mu$), რის შემდეგაც ტარდებოდა ზემოხსენებული ორსაფეხურიანი მექანიკური პოლირება (შუალედური და საფინიშო) სარკისებური ზედაპირის უმაღლესი სიპრიალის მიღებამდე. ყოველი მექანიკური პოლირების ხანგრძლივობა შეადგენდა ~ 10 საათს ზუმფარის ქაღალდზე ნიმუშის 0.05 მ/წმ-ზე არაუმეტესი გადაადგილების სიჩქარეებისას.

მემ გამოსახულებები საკვლევი შენადნობის იმ ნიმუშების ზედაპირების მორფოლოგიისა, რომელთაც განიცადეს საფინიშო ხეხვა და ასევე შემდგომი მექანიკური პოლირება უმაღლესი სიპრიალის მიღებამდე ზემოთ აღწერილი პოლირების ორი სქემის მიხედვით, ნაჩვენებია სურ.2-ზე (*იხ. დანართი*). ჩანს, რომ $20 \pm 10 \mu$ აბრაზივის მარცვლების ზომების მქონე დამყვანი რგოლით ერთმიმართული ხეხვის შემდგომ, ნიმუშის ზედაპირის მორფოლოგიას გააჩნია რთული რელიეფური პროფილი. გამოკვეთილია პარალელური ნაფხაჭნები, არხები დაგლეჯილი კიდეებით, შვერილები, ატკეცვის არეები და პლასტიკური დინებით გადაღესილი ბრტყელი მიკრობილიკები და ასევე მიკრობზარები (*სურ.2.ა*). ამასთან, პროფილის მიკროუსწორობათა სხვაობა შეადგენს $\leq 10 \mu$ -ს.

მემ გამოსახულება, მიღებული მოცემული გახეხილი ზედაპირის უმაღლეს სიპრიალემდე მექანიკური პოლირების შედეგად, რომელიც წარმოშობს ბეილბის ფენას, ჩვენს მიერ არჩეული დამუშავების პირველი სქემის მიხედვით, ნაჩვენებია *სურ.2. ბ*-ზე. ნათელია, რომ დადმავალი ზომის მარცვლოვანების ზუმფარის ქაღალდებზე და ფეტრზე პასტით საფინიშო პოლირების სამ საფეხურიანი მექანიკური პოლირების შემდეგ მოხდა უსწორმასწორო გახეხილი ზედაპირის მოგლუვება პლასტიკური დინებისა და საშუალოზე მაღალი შვერილების მიკროარეების ნაჩხაპნების არხების ჩაზნექილ არეებში ჩეჭყლეტის გზით. თუმცა, მიუხედავად პოლირების პროცესის საკმარისად ხანგრძლივი დროისა (~ 20 სთ), შუალედური (პასტის $2 \pm 3 \mu$ მარცვლებით) და განსაკუთრებულად კი საფინიშო ($1 \pm 0.2 \mu$ მარცვლებით) პოლირების სტადიებისას მასალის მცირე მოხსნის გამო სარკესავით პრიალა საბოლოო ზედაპირზე დიდი გადიდებისას შესამჩნევია ცალკეული მაკაწრის კვალი დარჩენილი ჯერ კიდევ წინა

დამუშავებებიდან, თუმცა კი ამოლესილი კიდეებით, რომლებიც ნაწილობრივ შევსებულია მასალის პლასტიკური დინებებით; ასევე, რანდომული ერთეულოვანი მოხვნის ახალი არაღრმა ნაფხაჭნების კვალი, გამოწვეული მაპოლირებელი პასტის აბრაზივების თავისუფალი მიკრომარცვლებით (*სურ.2. ბ*). ამიტომ ნათელია, რომ მოცემულ შემთხვევაში ბეილბის ფენის ქვეშ მნიშვნელოვან ($\sim 1 \mu$) სიღრმეზე შენარჩუნებული იქნება ის დამახინჯებული ფენა, რომელიც წარმოიქმნა საფინიშო (აბრაზივის მარცვლებით $\sim 5 \mu$) ხეხვის პროცესში, რომელიც თავის მხრივ უსწრებდა მექანიკური პოლირების დასაწყისს. იმისათვის, რომ ნიმუშზე მექანიკური პოლირებით წარმოიქმნას ბეილბის ფენა მის ქვეშ მდებარე საფინიშო ხეხვით გამოწვეული დამახინჯებული ფენის გარეშე, ჩვენ ავირჩიეთ ზედაპირის დამუშავების მიმდევრობათა მეორე სქემა. კერძოდ, ნიმუშის ზედაპირიდან საფინიშო ხეხვის შემდეგ ($\geq 5 \mu$ მარცვლებით) ელექტროქიმიურად ანოდური გახსნის მეთოდით შორდებოდა (პოლირების რეჟიმში) $\sim 2 \mu$ სისქის ფენა, და ვიღებდით ახალ ზედაპირს პოლიკრისტალური ნიმუშის საწყისი მარცვლოვანი სტრუქტურით, რომელსაც არ განუცდია გავლენა წინა დამუშავებით (იხ. *სურ.2. გ*).

მოცემული ზედაპირის შემდგომმა ორსაფეხურიანმა მექანიკურმა პოლირებამ მეორე სქემით მოგვცა სარკესავით პრიალა ზედაპირი ნაფხაჭნების შესამჩნევი (დიდი გადიდების პირობებში) კვალის გარეშე; დაიმზირებოდა ბეილბის ფენაში საპოლირებელი პასტის სუბმიკრონული აბრაზიული ნაწილაკების გაჩხერვის მხოლოდ იშვიათი შემთხვევა მოხვნის კვალის დატოვების გარეშე (იხ. *სურ.2. დ*).

იმისათვის რომ დაგვედგინა იმ მოსალოდნელი გარდაქმნების (ამორფიზაცია, პლასტიკური დინება, ციკქედვა, გარემოში არსებული ატომებით გაჯერება და მათი დიფუზია მასალის სიღრმეში, ჟანგვა და ა.შ.) ხასიათი და სიღრმეები, რომელთაც შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეთ მასალის ზედაპირულ და ზედაპირის მიმდებარე ფენებში ბეილბის ფენის ფორმირების პროცესში მექანიკური პოლირებისას, ოჟესპექტრების მიხედვით აგებული იყო ელემენტთა განაწილების პროფილები $\sim 1 \mu$ სიღრმეში ნიმუშებისათვის, რომელთა ზედაპირებზე ბეილბის ფენა ფორმირებული იყო ზემოაღწერილი ორი სქემით. ჟანგბადის, ნახშირბადის, რკინის და ქრომის ატომების განაწილების პროფილების შესაბამისი გრაფიკები აგებული ყოველი ~ 2 წუთის შემდგომ, აღნიშნული ელემენტების ოჟე-პიკების ერთდროული ჩაწერით 2 კვეენერგით აჩქარებული არგონის იონებით ზედაპირის ბომბარდირებით გაფრქვევისას ($\sim 25 \text{ \AA}$ /წთ სიჩქარით), მოცემულია *სურ.3*-ის ა და ბ-ზე.

ჩანს, რომ პირველი სქემით დამუშავებული ზედაპირისათვის $\sim 0.2 \mu$ სიღრმემდე, მკვეთრად იკვეთება ოთხი მახასიათებელი ზონა ელემენტთა თანაფარდობის მიხედვით (*სურ.2. ა*): I – ზონა სისქით $\sim 30 \text{ \AA}$ შეესაბამება ატმოსფერული აირის ელემენტთა (ძირითადად C, O, S, Cl, N) მოლეკულების ადსორბირებულ ფენას ნიმუშის ზედაპირზე. მას არავითარი კავშირი არ გააჩნია ზედაპირის დამუშავების პროცესთან და როგორც წესი ყოველთვის არსებობს ნებისმიერი ნიმუშის ზედაპირზე, რომელიც ჩატვირთულია ჰაერიდან ოჟესპექტრომეტრის კამერაში. II – ზონა $\approx 230 \text{ \AA}$ სისქით წარმოადგენს ბეილბის ამორფულ ზონას გაჯერებულს ძალიან მაღალ კონცენტრაციამდე ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომებით. შემდეგი III ზონა $\approx 350 \text{ \AA}$ სისქით, ასევე შეიცავს ჟანგბადისა და ნახშირბადის მაღალ კონცენტრაციებს და სავარაუდოდ გააჩნია ნანოზომებამდე

დეზაგრეგირებული კრისტალური სტრუქტურა. აღნიშნული ზონა შესაძლებელია ჩავთვალოთ ბეილბის ფენის ორგანულ შემადგენელ ნაწილად. მოცემული ფენის ქვეშ განლაგებულია პოლირების წინმსწრები ხეხვის პროცესით გამოწვეული, ციკქედვის გამო პლასტიკურად დეფორმირებული, დაწვრილმარცვლოვანებული ტექსტურირებული მატრიცის შრე $\sim 1200 \text{ \AA}$ სისქით IV ზონის სახით, რომელშიც ბეილბის ფენიდან და გადალესვის პროცესში მიკროფორებში დარჩენილი არეებიდან დიფუნდირებული ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომების კონცენტრაციები ექსპონენციალურად მცირდება შენადნობის მატრიცაში მათი შემცველობის მინიმალურ მუდმივ დონეებამდე. ეს უკანასკნელი ზონა გარდამავალი არით გადაფარავს მატრიცის სტრუქტურას, რომელიც არ ყოფილა დაქვემდებარებული გარე ზემოქმედებას. ჟანგბადის, ნახშირბადის, რკინის და ქრომის ატომების განაწილების პროფილების კვლევამ, ჩატარებულმა ბეილბის ფენისათვის საკვლევი შენადნობის მეორე სქემით მექანიკურად პოლირებული ზედაპირისა, უჩვენა დამუშავების ფენის ანალოგიური სამზონიანი აღნაგობა, გარე ზემოქმედებას დაუქვემდებარებელი მატრიცის სტრუქტურასთან გადაფარვამდე, მაგრამ აღნიშნული ზონების შეცვლილი პარამეტრებით (*სურ.3*. ბ). კერძოდ, ყველა ოთხი (აღსორბირებული ზედაპირული ფენის გათვალისწინებით) გამოყოფილი ზონის ჯამური სისქე მექანიკური პოლირების მეორე სქემის განხორციელების შემთხვევაში მცირდება თითქმის ორჯერ.

ასევე შეიცვალა ბეილბის ფენაში თავად ზონების სისქეების ურთიერთ თანაფარდობა (ძირითადად შიდა ფენის სისქის ვარიაციის ხარჯზე) მათი დაახლოებით ერთნაირი ჯამური სისქისას მექანიკური პოლირების განხორციელების ორივე სქემისათვის (შეადარე *სურ.2*. ა და ბ). საწყისი ზედაპირის (და ზედაპირთან მიმდებარე ფენების) სხვადასხვა კონდიციის გავლენის ეს თვალნათელი შედეგები, მექანიკური პოლირების ორ უკანასკნელ (შუალედურ და საბოლოო) სტადიამდე, დამუშავების ფენის ქვეზონების ნაზ სტრუქტურასა და კომპოზიციებზე განპირობებულია დამუშავების პარამეტრებით, რომლებიც წინ უსწრებენ მექანიკურ პოლირებას. აღნიშნული ზონები, გამოვლენილი ელემენტთა კონცენტრაციული განაწილების მრუდებზე, ასევე ცალსახად აისახა შესაბამისი, თითოეული ზონისათვის დამახასიათებელი სტრუქტურული თავისებურებებით, რომლებიც გამოვლენილი იქნა ჩქარი ელექტრონების “არეკვლაზე” მიღებული დიფრაქციული სურათებით (*სურ.4*. ა-დ).

გახეხილი ზედაპირების მექანიკური პოლირების შედეგად სტრუქტურული ცვლილებების სქემატური სურათები შესრულებული $\text{Fe-44\%Cr-4\%Al-0.3\%La}$ შენადნობის ნიმუშების ზედაპირებზე ბეილბის ფენის ფორმირების შემოადწერილი დამუშავების ორი სქემისათვის, და აგებული მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე, მოყვანილია *სურ.5*. ა და ბ-ზე. უნდა აღინიშნოს, რომ ოთხი გამოვლენილი ზონის სისქე (აღსორბირებული ფენის პირველი ზონის გარდა, რომელსაც ოთახის ტემპერატურაზე ყოველთვის აქვს პრაქტიკულად ერთნაირი სისქე ($\sim 30 \text{ \AA}$) ყველა ლითონურ ზედაპირზე და კავშირი არ აქვს მისი დამუშავების პროცესებთან) სხვადასხვა რიგით დამოკიდებული არის პოლირების ხანგრძლივობასა და საწყისი ზედაპირის (და ზედაპირთან ახლო მდებარე ფენების) მდგომარეობაზე, რომელიც ფორმირებულია მექანიკური პოლირების წინმსწრები დამუშავებით.

კონკრეტულად კი, ბეილბის ფენის შემადგენელი ჭეშმარიტად ამორფული (II ზონა) და “რენტგენოამორფული” (III ზონა) ნაწილების ჯამური სისქე, რომელიც შეადგენს დაახლოებით $\sim 550 \text{ \AA}$, პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული საწყისი ზედაპირის კონდიციაზე და პოლირების ხანგრძლივობაზე. რა თქმა უნდა ამ უკანასკნელ შემთხვევაში საუბარია ბეილბის ფენის ფორმირებისათვის პოლირების საკმარისი რაოდენობის ხანგრძლივობაზე უფრო დიდ დროებზე. ბეილბის ფენის აღნიშნული ქვეზონების სისქეების თანაფარდობა (მუდმივი ჯამური სისქისას), რომლებიც განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან სტრუქტურული მდგომარეობით და ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომებით გაჯერების ხარისხით, გარკვეულ წილ შესაძლებელია იყვნენ დამოკიდებულნი პოლირების რეჟიმებზე და საწყისი ზედაპირის მდგომარეობაზე მექანიკურ პოლირებამდე.

რაც შეეხება მეოთხე ზონას, ძირითადად როგორც მექანიკური პოლირების სტადიების წინმსწრები ხეხვის პროცესის პროდუქტი, მისი სისქე (სიღრმის მიხედვით განვრცობა) გარკვეულ წილ დამოკიდებულია წინასწარი და შუალედური პოლირების სტადიების ხანგრძლივობაზე, როდესაც მასალის მოხსნა პოლირების პროცესში (ბეილბის ფენის შექმნამდე) ჯერ კიდევ შესაძლებელია იმ დონეზე, რომ წინასწარ შემცირებულ იქნას დამუშავებისას ტექსტურირებული ფენის სისქე, დარჩენილი საფინიშო პოლირების შემდეგ. რაც დასტურდება ჩვენი ექსპერიმენტების რეზულტატებით ბეილბის ფენის ფორმირების პოლირების მეორე სქემით (*სურ.3. ბ* და *სურ.4. დ*), როცა საფინიშო ხეხვით წარმოქმნილი დამუშავების ფენები პრაქტიკულად სრულიად მოხსნილნი იყვნენ მექანიკური პოლირების პროცესის დაწყებამდე.

მოყვანილი მონაცემები მოწმობენ მექანიკური პოლირებისას ბეილბის ფენის (და მის ქვეშ განლაგებული ფენების) ფორმირების წარმოდგენათა სასარგებლოდ, როგორც ბლანტ-პლასტიკური ზედაპირული (არასელექტიური) მასის გადატანის და პლასტიკური დეფორმაციების თანმხლები კრისტალური სტრუქტურის დეფექტების დაგროვების კომბინირებული პროცესების პროდუქტი. თუმცა, ოთახის ტემპერატურაზე (შესაძლოა უფრო მაღალ ტემპერატურებზეც) თავად სტაბილურ მდგომარეობაში არსებობა ზედაპირთან ახლოს მდებარე ფენებისა ჭეშმარიტად ამორფული და “რენტგენოამორფული” ზონების სახით, რომლებიც ასე არაწონასწორულნი არიან ქვეშ განლაგებული კრისტალური სტრუქტურის მიმართ, როგორც ჩანს განპირობებულია ამ ფენების ჟანგბადისა და ნახშირბადის (და ასევე გარემოში არსებული სხვა) ატომების გახსნით, რომელთა შეღწევა დამუშავების ფენის სიღრმეებში დამტკიცებული იყო ზემოთ მოყვანილი ექსპერიმენტებით პოლირებული ზედაპირების ელემენტთა განაწილების პროფილების შესწავლასთან დაკავშირებით (*სურ.3. ა, ბ.*). ჭეშმარიტად ამორფული, “რენტგენოამორფული” და დეფექტური კრისტალური ზონებისაგან შემდგარი დამუშავების დამახინჯებული ფენის სტრუქტურული არაერთგვაროვნების დადგენილი ფაქტიდან გამომდინარე გამოკვლეული იყო გარემოდან შეღწეული ატომების მდგომარეობა ყოველ ზონაში და მათი საკვლევი შენადნობის მყარი ხსნარის ატომებთან ურთიერთქმედება. ამ მიზნით ჩაწერილი იყო მეორე სქემით პოლირებული ნიმუშის ზედაპირების დიფერენციალური ოქსიდოქტონული სპექტრები იმ ფენებისათვის, რომლებიც განლაგებულია სხვადასხვა სიღმეებზე ჩვენს მიერ დადგენილი ოთხი ზონიდან თოთოეულში.

მექანიკურ პოლირებამდე საწყისი ზედაპირის კონდიციაზე და პოლირების ხანგრძლივობაზე გამოვლენილი ზონების სისქეთა ცვლილებების ხასიათის დამოკიდებულებების დამზერილ თავისებურებათა საფუძველზე ვითარდება წარმოდგენები ბეილბის ფენის (და მის ქვეშ განლაგებული ფენების) ფორმირების იერარქიულ თანმიმდევრობათა სტადიების შესახებ, როგორც პროდუქტი ბლანტ-პლასტიკური მასის გადატანისა და პლასტიკური დეფორმაციის თანმხლები კრისტალური სტრუქტურის დეფექტების დაგროვების კომბინირებული პროცესისა. ზედაპირთან ახლოს მდებარე ფენების ოთახის ტემპერატურაზე სტაბილურ მდგომარეობაში არსებობა ქვემარტად ამორფული და “რენტგენომორფული” ზონების სახით, რომლებიც არაწონასწორულნი არიან ქვეშ განლაგებული კრისტალური სტრუქტურის მიმართ, ახსნილია ამ ფენების ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომების გახსნითა და მათი საკვლევი შენადნობის შემადგენელი კომპოზიციის საბაზისო ატომებთან ურთიერთქმედებით. კომპლექსური კვლევები მაღალი კონცენტრაციის ქრომის ($> 40\%$) შემცველობის Fe-Cr-Al-La შენადნობის ზედაპირზე ბარიერული ჟანგის ფენების ფორმირების საწყის სტადიებზე განხორციელებული იყო მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპიის (მემ), რენტგენოდიფრაქციული ანალიზის (რდა) და ოჟე-ელექტრონული სპექტომეტრიის მეთოდების გამოყენებით. ბარიერული ფენების მორფოლოგია, ქიმიური და ფაზური შემადგენლობები შესწავლილი იყო ბრტყელი ნიმუშების ზედაპირებზე მათი ჰაერზე მაღალტემპერატურული, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ და $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე ჟანგვის შემდგომ. დაყოვნების დრო აღნიშნულ ტემპერატურებზე იცვლებოდა ციკლურად 1-დან 10 საათის ($1+4+5$) განმავლობაში. რის შემდგომაც საკვლევი ნიმუშების ციკლირებას ვახდენდით 5 და 1 საათების განმავლობაში $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ და $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე შესაბამისად ფურჩში მიმდინარე რეკრისტალიზაციური პროცესების (სტრუქტურული ტრანსფორმაციების) შესწავლის მიზნით. დადგენილ იქნა, რომ, საკვლევი შენადნობის მაღალტემპერატურული ჟანგვის საწყის სტადიებზე ფორმირებული ფურჩის ზედაპირის მორფოლოგია მნიშვნელოვან დამოკიდებულებაშია პოლიკრისტალური ნიმუშის საწყისი ზედაპირის სტრუქტურულ კონდიციასთან; მექანიკური პოლირების (ბეილბის ფენა) ან იონური ბომბარდირების შედეგად ამორფიზებული ზედაპირული ფენის არსებობისას, ფურჩი ვითარდება მიკრონაოჭების წყობის მოდულირებული სტრუქტურის ფორმირებით, რომელსაც გააჩნია ერთნაირი სისქე ნიმუშის მთელ ზედაპირზე (იხ. დანართი, *სურ.6*).

ამასთან, მოცემულ შემთხვევაში არ დაიმზირება ჟანგის “ქიმების” ფორმირება, რომელიც გარს ერტყმის მატრიცის მარცვალთა საზღვრებს, განსხვავებით მცირედლეგირებული ქრომისა და ასე ფართოდ გამოკვლეული Fe-20%Cr-5%Al-RE სისტემის შენადნობებისაგან .

$1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე ჟანგვის პირველ საათებში ფორმირდება ფურჩის ისეთი სტრუქტურა, რომელიც ყველაზე გამოკვეთილი მოდულაციის კონტურებით ხასიათდება და რჩება სტაბილური (შესამჩნევი ცვლილებების გარეშე) ხანგრძლივი დროის (> 10 სთ) განმავლობაში ფურჩის როგორც სისქის ასევე სტრუქტურის მიხედვით. ამასთან, ფურჩის დამახასიათებელი თავისებურებაა ის, რომ მისი სტრუქტურა შედგება Al_2O_3 -ის, Cr_2O_3 -ის და კომპლექსური ოქსიდის ნანოკრისტალიტების ($\leq 500\text{nm}$) ნარევისაგან.

რეკრისტალიზაციური პროცესები გახეხილ ზედაპირზე და 1200 °C-ზე (1+4+5)სთ ჟანგვის ციკლებისას ფორმირებულ ფურჩში მიმდინარე განშრეგების პროცესები, ინტენსიურად ვითარდებიან დამატებით შემდგომი ჟანგვისას 1400 °C -ზე 1სთ-ში. ამასთან, აღნიშნულ პროცესებს თან ახლავს ასევე ფურჩის გარე ფენების განშრეგებაც. *სურ.7.* ა და ბ-ზე მოყვანილია იმ ნიმუშის გახეხილი ზედაპირის მემ გამოსახულებები, რომელმაც განიცადა დამატებითი ჟანგვა 1400 °C-1სთ მისი 1200 °C-(1+4+5)სთ ციკლების ჟანგვის შემდგომ. ატკეცილი ჟანგის არეზე დაიმზირება ფენის სამი დონე (*სურ.7.* ა) აღნიშნული როგორც ფურჩის ქვედა ფენა – A, შუალედური ფენა – B და გარეთა ფენა – C. A-არის გადიდებული გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ქვეფენას გააჩნია უფორებო პოლიკრისტალური აღნაგობა მარცვალთა ზომებით $2 \div 4 \mu$, რაც 1200 °C-ზე ფორმირებულ ანალოგიურ ქვეფენასთან შედარებით მოწმობს, რომ მოხდა ალუმინის ჟანგის მარცვალთა წამოზრდა 1400 °C -ზე. კრისტალების შეზრდის მარცვალთაშორის საზღვრებზე კონტრასტის მომატება, რომელიც დაიმზირება ყველა მარცვლის კონტურზე, როგორც ჩანს, დაკავშირებულია ამ კრისტალთაშორისი არეების (1400 °C-ზე რეკრისტალიზაციისას) გამდიდრებით მინარეული ატომების ოქსიდებით (შესაძლოა ლანთანის ქრომიტებით).

ამ მონაცემებიდან ცხადი ხდება, რომ Fe-Cr-Al-La სისტემის ექვიატომურთან მიახლოებული, ქრომის მაღალი შემცველობის შენადნობებისათვის, ზედაპირული დამცავი ფურჩის ფორმირების საქმეში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს დასაჟანგი ზედაპირის მდგომარეობა (მისი სტრუქტურა, ტოპოგრაფია, კომპოზიციური შედგენილობა) და დაჟანგვის ტემპერატურების ციკლების კომბინაცია. რაც შეეხება ამ უკანასკნელს, ის უნდა იმყოფებოდეს იმ ტემპერატურათა დიაპაზონში, როდესაც შედარებით არაკონკურენტული (ერთნაირად ალბათური) იქნება ქრომის, ალუმინის და რკინის ჟანგების ჩასახვა და ზრდა ზედაპირულ ფენაში. წინააღმდეგ შემთხვევაში (შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე ≤ 1000 °C, ან ძალიან მაღალ ტემპერატურებზე ≥ 1400 °C) ადგილი ექნება ჟანგვისას ფურჩის განშრეგების პროცესს საწყის ეტაპზევე სხვადასხვა ჟანგულებისათვის (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 ...) კონკურენტული ჩასახვისა და ზრდის განსხვავებული პირობების გამო. (ამ კონკურენტული პროცესის გაძლიერებას შეუწყობს ხელს აგრეთვე ზედაპირის არაერთგვაროვნება გამოწვეული დამუშავების პროცესით (მაგალითად ხეხვა), ცხადია ეს უკანასკნელი ფაქტორი განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს საწყისი სტადიებისათვის დამცავი ფენის ფორმირებისას. აქ მნიშვნელოვანია გამოყენებულ იქნას ამორფიზებული ზედაპირის (მექანიკური პოლირებით, იონური ბომბარდირებით, “სქინ” ეფექტის გამოყენებით, ინდუქციური დამუშავებით შექმნილი ზედაპირისა და ზედაპირთან ახლოს მდებარე ფენების) ენტროპიულ-ენერგეტიკული “დატუმბვის” პოტენციალი. საქმე ის არის, რომ საწყის სტადიებზე ეს პოტენციალი შესაძლებელია გამოვლენილ იქნას მაღალტემპერატურული ჟანგვისას სტრუქტურის წარმოქმნის იერარქიულ თანმიმდევრობასა და სტრუქტურის ევოლუციაზე მნიშვნელოვან ზეგავლენაში, რადგან ისინი ექვემდებარებიან მასშტაბური იერარქიის და თვითორგანიზაციის კანონზომიერებებს. ამასთან, თვითორგანიზაცია ხორციელდება ქვესისტემებს (ფაზებს) შორის და მათ შიგნით დისიპაციური დინებების განაწილების ოპტიმიზაციის გზით, რასაც მივყავართ (უმოკლესი გზით) რელაქსაციასა და სტაბილურ მდგომარეობამდე.

დამზერილი სტრუქტურის ფორმირება 1200 °C-ზე ჩვენს მიერ საკვლევი შენადნობის პოლირებულ ზედაპირზე შესაძლებელია წარმოვადგინოთ როგორც სტრუქტურის ევოლუცია ზედაპირულ (~50 ნმ) და ზედაპირთან ახლოს მდებარე ($\leq 1 \mu$) ფენებში, რომელიც თვის თავში მოიცავს ენტროპიული “დატუმბვის” (ამორფიზება მექანიკური პოლირებისას ან/და იონური ბომბარდირებისას, იმპლანტაციისას), დისიპაციური ფაზების ფორმირების და მათი ოპტიმალური იერარქიული ნაკრების (ჟანგბადით გაჯერება, ოქსიდების ჩასახვა), ფურჩის თვით-წარმოქმნადი ოპტიმალური მაკროგეომეტრიის ფორმირების ეტაპებს.

აღნიშნული ფაქტორების კომბინაციით, გარკვეულ ტემპერატურათა ინტერვალში Fe-Cr-Al-RE სისტემის ექვიატომურთან მიახლოებულ ქრომის მაღალი შემცველობის (> 40 %) შენადნობებისათვის შესაძლოა შეიქმნას ფურჩის წარმოქმნის ისეთი პირობები, რომ საწყის სტადიებზევე, როდესაც ფურჩის სისქე ჯერ კიდევ არ ჰარბობს რამოდენიმე მიკრონს, წარმოიქმნას მისი ისეთი სტრუქტურა, რომელიც იქნება ბარიერული კათიონებისა და ანიონების შემხვედრი დიფუზიისათვის, რაც საბოლოო ჯამში მოგვცემს სისქეში ძალიან ნელა მზარდი, ადპერენტული (შესაბამისი ელემენტებით მიკროლეგირებისას) მაღალტემპერატურული კოროზიისაგან ლითონური მატრიცის დამცავი ფენის მიღებას.

დასკვნები

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები შეიძლება ჩამოყალიბებულ იქნას შემდეგი დასკვნების სახით:

1. მაღალი გარჩევის უნარისა და მგრძნობიარობის მქონე თანამედროვე მეთოდების (მემ, ოეს, ჩედ, ტდს, ედს) კომპლექსური გამოყენებით გამოკვლეულია მცირედლეგირებული ქრომისა და ქრომის მაღალი შემცველობის (> 40 %) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მოდიფიცირებულ ზედაპირებზე მაღალტემპერატურული კოროზიისაგან დამცავი (ბარიერული) ოქსიდური ფირების ფორმირების კანონზომიერებათა სტრუქტურული ასპექტები მიკრონულ, სუბმიკრონულ და ნანომეტრულ დონეებზე.

2. დადგენილია, რომ ქრომისა და მცირედლეგირებული ქრომის ზედაპირების მოდიფიცირება ლანთანის იონების იმპლანტაციით, კომბინაციაში წინასწარ თერმო-ქიმიურ დამუშავებასთან, იძლევა საშუალებას გაიზარდოს მათი მხურვალმედგობა 1200-1300 °C ტემპერატურებზე ერთი რიგით და მეტად, რაც განპირობებულია ზედაპირის იმპლანტაციისას მოდიფიცირების ორმაგი ეფექტით – ერთი, ზედაპირულ შრეში ლანთანის კონცენტრაციის თანაბარი გაზრდით მისი ხსნადობის ზღვარზე მეტი რაოდენობით, და მეორე – იმპლანტაციის თანმხლები ზედაპირული ფენის ამორფიზაციის პროცესით.

3. პირველად იქნა დადგენილი, რომ ქრომის მაღალი შემცველობის (> 40 %) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობის მექანიკურად პოლირებული ზედაპირული შრე შედგება ოთხი განსხვავებული სტრუქტურისა და კომპოზიციის მქონე ზონისაგან, რომელთაგან გეომეტრიული ზედაპირის მიმდებარე ორი ქვეზონა წარმოადგენს

ბეილბის ფენის ერთმანეთთან ორგანულად შერწყმულ ჭეშმარიტად ამორფულ და “რენტგენოამორფულ” შრეებს ჯამური სისქით ~60 ნმ, და ის პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული საწყისი ზედაპირის კონდიციაზე და პოლირების ხანგრძლივობაზე.

4. პირველად იქნა ნაჩვენები, რომ Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის მაღალტემპერატურული ჟანგვის საწყის სტადიებზე ფორმირებული ფურჩის მორფოლოგია მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ნიმუშის საწყისი ზედაპირის სტრუქტურულ კონდიციაზე; დადგენილია, რომ მექანიკური პოლირების (ბეილბის ფენა) ან იონური ბომბარდირების შედეგად ამორფიზებული ზედაპირული ფენის არსებობისას, ფურჩი ვითარდება მიკრონაოჭების წყობის მოდულირებული სტრუქტურის ფორმირებით, რომელსაც გააჩნია თანაბარი სისქე მთელ ზედაპირზე.

5. დადგენილია, რომ Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის პოლირებული ნიმუშის ზედაპირზე 1200 °C-ზე ჟანგვის პირველ საათებში ფორმირდება ფურჩი გამოკვეთილი მოდულირებული სტრუქტურით, რომელიც რჩება სტაბილური ხანგრძლივი დროის განმავლობაში როგორც სისქის ასევე აღნაგობის მიხედვით; ამასთან ფურჩის დამახასიათებელ თავისებურებას შეადგენს მისი ნანოკრისტალური (≤ 500 ნმ) აღნაგობა Al_2O_3 -ის, Cr_2O_3 -ის და კომპლექსური ოქსიდის კომპოზიციური ნარევისა.

6. პირველად იქნა ნაჩვენები, რომ Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის პოლირებულ ზედაპირზე 1200 °C-ზე ჟანგვისას ფორმირებული მოდულირებული სტრუქტურის მქონე ფურჩი ჟანგვის ტემპერატურის 1400 °C-მდე გაზრდისას განიცდის რეკრისტალიზაციას შემადგენელ ნანონაწილაკებს შორის მყარფაზოვანი რეაქციების თანხლებით, რომელიც მთავრდება ლითონურ მატრიცაზე ფურჩის განშრევებით და Al_2O_3 -ის თხელი ერთგვაროვანი ფენის (მარცვლოვანებით 1 ± 3 μ) ფორმირებით, რომელსაც თავის მხრივ ახასიათებს ძლიერი ადჰერენტულობა ლითონურ სუბსტრატთან და დამცავი თვისებები როგორც მაღალტემპერატურული (1200 °C-ზე) კოროზიის, აგრეთვე აბრაზიული ცვეთის წინააღმდეგ.

7. დადგენილია, რომ დაჟანგვის ციკლების შერჩევით, საწყის ზედაპირზე ენტროპიულად “დატუმბული” შრის შექმნით და წინასწარი თერმო-ქიმიური დამუშავების კომბინაციით Fe-Cr-Al-La სისტემის ქრომის მაღალი შემცველობის (>40 %) შენადნობებისათვის შესაძლებელია შეიქმნას ფურჩის წარმოქმნის ისეთი პირობები, რომ საწყის სტადიებზევე, როდესაც ფურჩის სისქე ჯერ კიდევ არ ჭარბობს რამოდენიმე მიკრონს, დაფორმირდეს მისი ისეთი სტრუქტურა, რომელიც იქნება ბარიერული კათიონებისა და ანიონების შემხვედრი დიფუზიისათვის, რაც საბოლოო ჯამში მოგვცემს სისქეში ძალიან ნელა მზარდი, ადჰერენტული, მაღალტემპერატურული (~1200 °C) კოროზიისაგან ლითონური მატრიცის დამცავი ფენის მიღების საშუალებას.

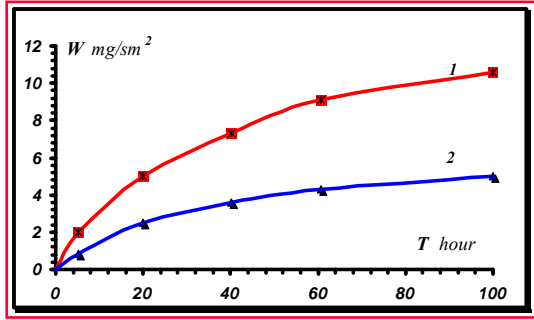
8. ქრომის მაღალი შემცველობის (>40 %) Fe-Cr-Al-La სისტემის შენადნობზე ენტროპიულად “დატუმბული” ზედაპირული ფენის (ბეილბის ფენა, იმპლანტირებული ფენა) თვითორგანიზაციის გზით მოცულობითი დიფუზიის დაბალი პარამეტრების მქონე თხელი (~1 μ) ოქსიდური (ბარიერული) დამცავი ფენების ფორმირების პრინციპიდან გამომდინარე განსაზღვრულია მისი

ეფექტურად გამოყენების პერსპექტივა განსაკუთრებული მხურვალმედგობის მქონე ახალი მხურვალმტკიცე კომპოზიციების მისაღებად.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. Микадзе О.И., Цурцумия О.О., Берадзе Д.Л., Булия Б.П., Кутелия Э.Р. “Эффект поверхностного обогащения нелегированного и малолегированного хрома высокоактивными элементами”, *Georgian Engineering News №2*, 2003, с.105-107.
2. Mikadze O., Tsurtsunia O., Bulia B. “Improvement in Corrosion Resistance of Low-Alloyed Chromium by Thermo-Chemical Treatment”, *Abstracts of conference JuniorEuromat 2004*, Lausanne, Switzerland, 6-9 September 2004
http://webdb.dgm.de/dgm_lit/program.htm?tnr=682,Token1=150607,Token2=adress.edate=09.09.2004,db=w_review
3. E.Kutelia, O.Tsurtsunia, B.Eristavi, O.Mikadze, B.Bulia “Auger-Spectroscopic and SEM Investigation of Scale Formation at High Temperature Oxidation of Fe-Cr-Al-RE Alloy with High Chromium (>40%) Content” *Georgian Engineering News №1*, 2005, p.19-25.
4. O.Tsurtsunia, E.Kutelia, O.Mikadze, B.Bulia, “Surface Finishing Influence on the Scale Formation at High Temperature Oxidation of Fe-Cr-Al-RE Alloys with High Chromium Content”, *Proceedings of Congress EuroCorr 2005*, Lisbon, Portugal, 4-8 September 2005
5. E.Kutelia, O.Tsurtsunia, S.I.Bakhtiyarov, H.Adanir, D.L.Beradze, B.Eristavi, “Investigation the depth and the character of transformations during mechanical polishing of ground surface of Fe-Cr-Al-La alloy”, *Georgian Engineering News №2*, 2006, p.44-54.
6. E. R. Kutelia, O. O. Tsurtsunia, B. G. Eristavi, H. Adanir, S. I. Bakhtiyarov, “Structure and Elemental Distribution in Beilby Layer on the Surface of Fe-Cr Al-La Alloy”, *Journal on Engineering and Technology*, 2006, Vol. 1, No. 4, pp. 61-71.
7. Kutelia E., Tsurtsunia O., Adanir H., Bakhtiyarov S. and Eristavi B., Structure and Elemental Distribution in Beilby Layer on the Surface of Fe-Cr-Al-La Alloy, *Abstracts of the Congress JuniorEuromat 2006*, Lausanne, Switzerland, 4-8 September 2006
http://webdb.dgm.de/dgm_lit/prg/FMPro?-db=w%5fprogram&-lay=standard&TB=%3d%3d755&autorentext=tsurtsunia &tg%5fsymposium%5fund%5fnr=755&-max=20&-token.0=755&-token.1=755&-token.4=tsurtsunia&-Format=allabstracts.htm&-token.0=755&-token.1=Junior%20Euromat%202006&-Find=
8. Кутелия Э.Р., Цурцумия О.О., Микадзе О.И., Демиркиран К., Булия Б.П., «Особенности кинетики высокотемпературного окисления сплава Fe-44%Cr-4%Al-1%Ni-0.3%La» *Georgian Engineering News №3*, 2006, с. 52-56.

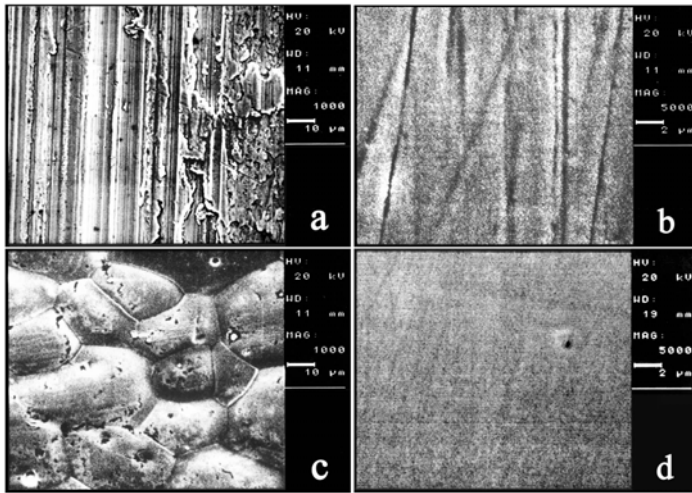
შემაჯავებელი:
Appendix:



სურ.1. მცირედლეგირებული ქრომის ჟანგვის კინეტიკა 1300 °C ტემპურატურაზე: 1 – იმპლანტაციამდე და 2 – იმპლანტაციის შემდეგ

Fig.1. Oxidation kinetic of low alloyed chromium at 1300 °C: 1 – before implantation and 2 – after

implantation

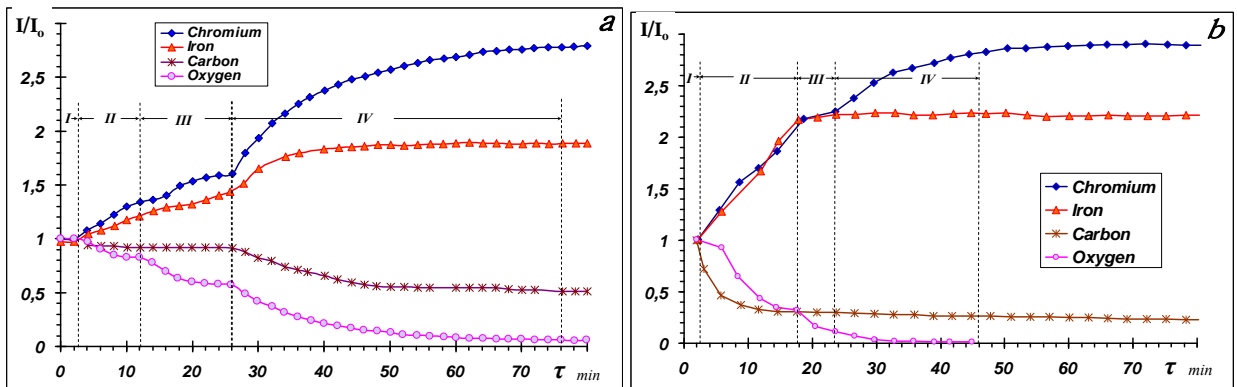


სურ.2. Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის ნიმუშის ზედაპირის მეტამოსახულებები: a) 20±10 μ ზომის მარცვლოვანების აბრაზივის დამყვანი რგოლით საფინიშო ხეხვის შემდეგ; b) იგივე ზედაპირი პირველი სქემის სამსაფეხურიანი მექანიკური პოლირების შემდეგ; c) 7÷5 μ მარცვლოვანების ზუმფარის ქალაღით საფინიშო ხეხვით გამოწვეული დამახინჯებული ზედაპირის ფენის (~2μ) ელექტრო-

ქიმიური პოლირებით მოხსნის შემდეგ;

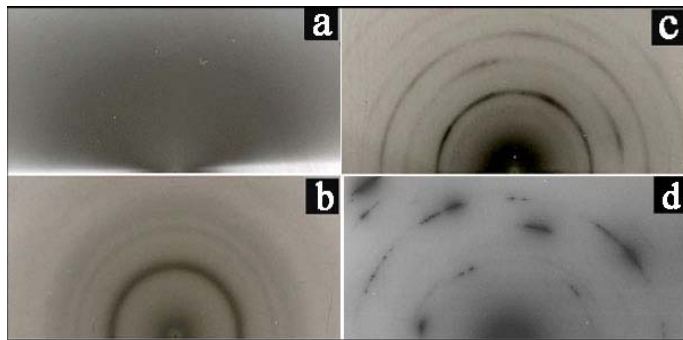
d) იგივე ელექტროქიმიურად პოლირებული ზედაპირი ორსაფეხურიანი მექანიკური პოლირების შემდეგ;

Fig.2. SEM images of the surface of Fe-44 %Cr-4 %Al-0.3 %La alloy specimen: a) after finish grinding with the lap disc with abrasive grain sizes of 20±10 μ; b) the same surface after three-stage mechanical polishing according to the first scheme; c) after removal of the surface layer (~ 2 μ) distorted during finish grinding by sandpaper with graininess of 7÷5 μ by electrochemical polishing; d) the same electrochemically polished surface after two-stage mechanical polishing (the second treatment scheme, see text).



სურ.3. ელემენტური განაწილების პროფილები ბეილბის ფენაში მექანიკურად პოლირებულ Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობში: a) ზედაპირისათვის რომელიც დამუშავებული იყო ბეილბის ფენის ფორმირების პირველი სქემის მიხედვით; b) ბეილბის ფენის ფორმირების მეორე სქემის მიხედვით დამუშავებული ზედაპირისათვის.

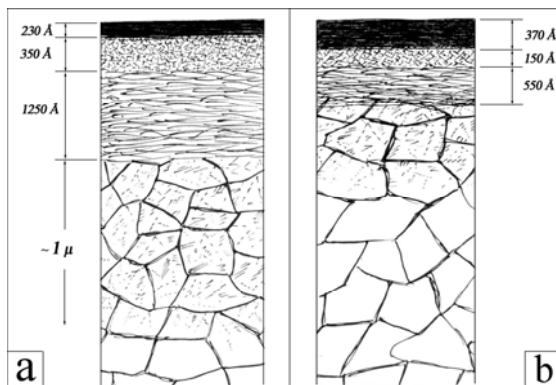
Fig.3. Elemental distribution profiles in the Beilby layer of mechanically polished specimens of Fe-44 %Cr-4 %Al-0.3 %La alloy: a) for the surface treated according to the first scheme of Beilby layer formation; b) for the surface treated according to the second scheme of Beilby layer formation.



პოლირებული ნიმუშის ზედაპირიდან, რომელიც დამუშავებული იყო მეორე სქემით 1200 Å სისქის ფენის მოხსნის შემდეგ.

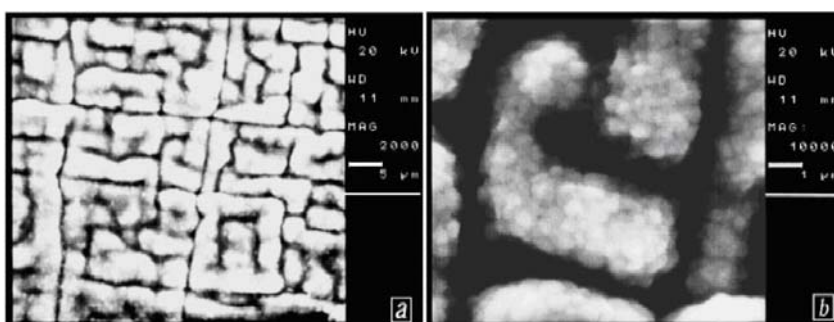
სურ.4. ელექტრონოგრამები მიღებული “არეკლაზე” მექანიკურად პოლირებული (პირველი სქემის მიხედვით) Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის ზედაპირიდან სხვადასხვა სისქის ფენის მოხსნის შემდეგ: a) 50 Å ; b) 500 Å ; c) 1300 Å ; d) ელექტრონოგრამა მიღებული

Fig.4. The electronograms obtained “in reflection” from the mechanically polished (according to the first scheme) surface of the Fe-44 %Cr-4 %Al-0.3 %La alloy after removal of layers of different thickness: a) 50 Å; b) 500 Å; c) 1300 Å; d) the electronogram obtained from the polished specimen surface treated according to the second scheme after removal of the layer with 1200Å thickness.



სურ.5. მექანიკურად პოლირებული ზედაპირის სტრუქტურის ცვლილების სქემატური სურათი სისქის მიხედვით: ა) პირველი სქემით დამუშავების შემდეგ; ბ) მეორე სქემით დამუშავების შემდეგ.

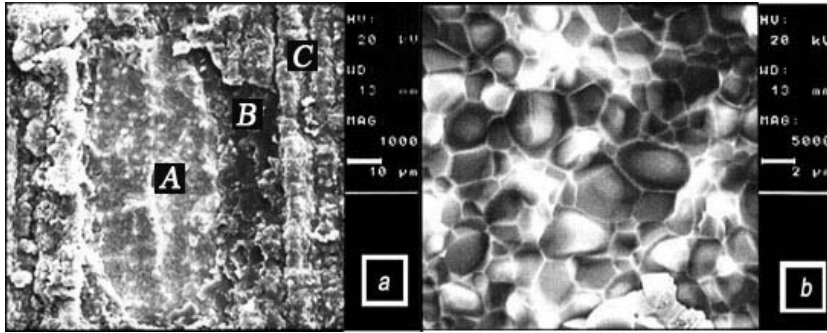
Fig.5. Schematic picture of structure changes in the thickness of the mechanically polished surface: a) after surface treatment by the first scheme; b) after treatment by the second scheme.



სურ.6. Fe-44%Cr-4%Al-0,3%La შენადნობის მინუშების ზედაპირთა მემ გამოსახულებები:

a) და b) ჰაერზე 1200 °C-ზე 5სთ-იანი ჟანგვის შემდეგ.

Fig.6 SEM images of surface of Fe-44 %Cr-4 %Al-0.3 %La specimen: a) and b) after oxidation at 1200 °C during 5 hours in air;



სურ.7 Fe-44%Cr-4%Al-0.3%La შენადნობის გახეხილი ზედაპირის მქონე ნიმუშის მემ გამოსახულებები 1200 °C/(1+4+5)სთ+1400 °C/1სთ ციკლური ჟანგვის შემდეგ: a) ატკეცილი ფურჩის არის

გამოსახულება, *A*-ქვედა შრე, *B*-შუალედური ფენა, *C*-ფურჩის გარე ზედაპირი; b) *A*-არის მორფოლოგია;

Fig.7. SEM images of specimen of Fe-44 %Cr-4 %Al-0.3 %La alloy with the ground surface, after cycles of oxidation 1200 °C / (1+4+5) hours+1400 °C / 1 hour: a) image of the area with spalled scale, *A*- lower sub-layer, *B*- mediate interlayer and *C*- superficial of scale; b) morphology of the area *A*;