

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ლევან ანთაშვილი

**ცეცხლსასროლი იარაღის ლულის ხანგამძლეობაზე თერმული
დაღლილობის გავლენის კვლევა**

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა - მასალათმცოდნეობა

შიფრი - 0412

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

2018 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტზე
მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონების დამუშავების
დეპარტამენტში

ხელმძღვანელები:

ტექ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი მიხეილ ოქროსაშვილი

ტექ. მეცნ. დოქტორი, ეროვნული
აკადემიის აკადემიკოსი, პროფესორი გიორგი თავაძე

რეცენზენტები: _____

დაცვა შედგება 2018 წლის „—“ _____ , _____ საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის

ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,
კორპუსი _____, აუდიტორია _____
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას ქ. №69

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი _____

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. ლითონური კონსტრუქციების დიდი უმრავლესობა ცვალებადი დატვირთვებით მუშაობს. ეს იმას ნიშნავს, რომ ლითონის ყოველ ფიქსირებულ წერტილში ძაბვა რაღაც მინიმალური მნიშვნელობიდან იღებს მაქსიმალურ მნიშვნელობას და კვლავ მინიმალურ მნიშვნელობას, ანუ ძაბვის სიდიდე დროში ოსცილირებს და ამასთანავე არ არის აუცილებელი, რომ ძაბვის მაქსიმუმების ან მინიმუმების მიმდევრობა იყოს მუდმივი, მათი მნიშვნელობები შესაძლებელია იცვლებოდეს. მოცემულ წერტილში ძაბვის ცვლილებას ორ მომდევნო მინიმუმს (მაქსიმუმს) შორის დატვირთვის ციკლი ეწოდება.

ადვილი გასაგებია, რომ ჩვეულებრივ სტატიკურ და დინამიკურ დატვირთვებთან შედარებით ციკლური დატვირთვები გაცილებით უფრო მძიმე პირობებს ქმნის ლითონისთვის. ასეთ პირობებში ლითონი განიცდის რღვევას არამარტო სიმტკიცის ჩვეულებრივ ზღვარზე უფრო დაბალი ძაბვისას, არამედ ხშირად დრეკადობის ზღვარზე უფრო დაბალი ძაბვების დროს. მოვლენას, რომელიც ასეთ რღვევას იწვევს, დადლილობა ეწოდება.

ლითონში განვითარებული ცვალებადი ძაბვის ველის წყაროს შეიძლება წარმოადგენდეს როგორც სხეულის ზედაპირზე მოქმედი ცვალებადი მექანიკური დატვირთვები, ასევე სხეულში არსებული არათანაბარი ტემპერატურული ველი, რომელიც განაპირობებს არასტაციონარული ტემპერატურული გრადიენტების წარმოქმნას. ასევე, შესაძლებელია ამ ორი ფაქტორის ერთდროული ზემოქმედება, რაც კიდევ უფრო ამძიმებს ლითონური კონსტრუქციის სამუშაო პირობებს. ცვალებადი თერმული დატვირთვების შედეგად ლითონის რღვევის პროცესს თერმული დადლილობა ეწოდება.

მე-19 საუკუნეში დადლილობა მასალების მისტიკურ თვისებად ითვლებოდა, რადგან დადლილობის ზიანის დამზერა შეუძლებელი იყო, რღვევას ადვილი ჰქონდა ყოველგვარი წინასწარი გამაფრთხილებელი ნიშნების გარეშე. მხოლოდ მე-20 საუკუნეში გახდა ცხადი, რომ

განმეორებითი დატვირთვები განაპირობებს დადლილობის მექანიზმს სხეულში, რომელიც იწვევს მცირე ბზარების ჩასახვას, რომელსაც თან სდევს ბზარის ზრდის პროცესი და საბოლოოდ სრულდება სრული რღვევით. სტრუქტურათა ინჟინერიის ისტორია დღემდე ინახავს უამრავ დადლილობითი რღვევების მაგალითს მანქანათა მექანიზმებში, სატრანსპორტო საშუალებებში, შენადულ სტრუქტურებში, თვითმფრინავებში და ა.შ. დროდადრო ამგვარი რღვევები განაპირობებდა კატასტროფულ უბედურ შემთხვევებს, როგორცაა მაღალი წნევის ქვეშ მომუშავე ჭურჭლის აფეთქება, ხიდების ნგრევა ან სხვა დიდი სტრუქტურების სრული კოლაფსი. ძალიან ბევრი ამგვარი შემთხვევა ვერ მოხვდა გაზეთების მთავარ გვერდზენაკლებად კატასტროფული შედეგის გამო, მაგრამ დადლილობის რღვევების ეკონომიკური გავლენა იყო მეტად კატასტროფული. ამჟამად სტრუქტურათა დადლილობის ფენომენი აღიარებულია ძალზედ მნიშვნელოვან ტექნოლოგიურ პრობლემად.

ნებისმიერი ლითონური კონსტრუქციის ხანგამძლეობა და საიმედოობა მის დასამზადებლად შერჩეული მასალის გვარობასა და კონსტრუქციულ სიმტკიცეზეა დამოკიდებული. ამ უკანასკნელს კი იმ ძირითადი მახასიათებლების კომპლექსი განსაზღვრავს, რომელიც ნაკეთობის საექსპლუატაციო თვისებებს უზრუნველყოფს. აქედან გამომდინარე, ლითონის ფიზიკო-მექანიკური თვისებები, რომელიც ნაკეთობის ხარისხს განაპირობებს და უშუალო კავშირშია მის საექსპლუატაციო თვისებებთან, არა მარტო ლითონის ქიმიური შედგენილობით განისაზღვრება, არამედ მისი შიგა კრისტალური აგებულებითაც, რომელიც საექსპლუატაციო თვისებების მინიჭების დამამთავრებელი ტექნოლოგიური პროცესებით მიიღწევა, მაგალითად, მზა ნაკეთობის თერმული თუ ქიმიურ-თემული დამუშავებით. ქიმიურ შედგენილობასთან ერთად სწორედ ფორმის შეცვლისა და სტრუქტურული ცვლილებების ტექნოლოგიური პროცესები ანიჭებს ნაკეთობას ბუნებრივ, დაბალ თუ გაზრდილ ტემპერატურებზე იმ ფიზიკურ და მექანიკურ თვისებებს, რომელიც ნაკეთობის საექსპლუატაციო პირობებით არის გათვალისწინებული. ასეთი პირობები მეტად

მრავალფეროვანია – დადლილობითი სიმტკიცე ციკლური დატვირთვებისას, კონსტრუქციული გამძლეობა (ამტანიანობა), ცვეთამდეგობა და კოროზიული მედეგობა, ტემპერატურის მატების შემთხვევაში – ხანგრძლივი სიმტკიცე და ა.შ. დეტალის კონსტრუირებისას ერთ–ერთი ძირითადი მოთხოვნაა აგრეთვე მასალის ეკონომიკური ეფექტიანობა.

ცეცხლსასროლი იარაღის ლულის დასამზადებლად განკუთვნილი მასალა იმდენად მძიმე პირობებში განიცდის ექსპლუატაციას, რომ იგი პრაქტიკულად ზემოთ ჩამოთვლილ ყველა კრიტერიუმს უნდა აკმაყოფილებდეს. მსოფლიოს განვითარებული ქვეყნების ერთ–ერთ პირველხარისხოვან ამოცანას თავდაცვის სფეროში სწორედ ცეცხლსასროლი იარაღის ლულის არხის მედეგობის გაზრდა წარმოადგენს, რომელსაც გარდა ფოლადის ფიზიკურ–მექანიკური თვისებებისა, დენტის და მისი აფეთქების შედეგად ფორმირებული აირის ჭავლის მახასიათებლები, ციკლის სიხშირე და მოქმედების ხანგრძლივობა განსაზღვრავს. ცალკე კვლევის საგანს წარმოადგენს აგრეთვე ლულის შიგა ზედაპირისა და მაღალი წნევის მქონე დენტის ჭავლის ურთიერთშეხების ზედაპირზე მიმდინარე ფიზიკურ–ქიმიური პროცესების ბუნების შესწავლა, რის გარეშეც შეუძლებელია მეცნიერების წინაშე დასმული ამ პრობლემური საკითხის გადაჭრა.

სამუშაოს მიზანი. რადგან დადლილობისადმი მედეგობა ძალიან მნიშვნელოვანი მახასიათებელია ნებისმიერი ლითონური კონსტრუქციისა, რომელსაც მუშაობა უწევს ცვალებადი დატვირთვების ქვეშ, ამიტომ, ამ მხრივ (დატვირთვების ხასიათიდან გამომდინარე) გამონაკლისს არც ცეცხლსასროლი იარაღის ლულა წარმოადგენს. აქედან გამომდინარე, პირველ რიგში უნდა შეფასდეს თერმული დადლილობის როლი ლულის მწყობრიდან გამოსვლის მრავალ ფაქტორში, რაც წარმოადგენს სადისერტაციო ნაშრომის ამოცანას.

მოცემული დატვირთვების პირობებში, ლითონური კონსტრუქციის თერმულ დადლილობაზე კვლევის დროს საწყის ეტაპზე უნდა განისაზღვროს მასში განვითარებული ტემპერატურული და თერმული ძაბვების ველები, რომელთა დასადგენადაც შემუშავებულია არაერთი

თეორიული თუ ექსპერიმენტული მეთოდი. სროლის პროცესის ფიზიკური მოდელირება არაერთ სირთულესთან არის დაკავშირებული, როგორცაა, მაგალითად, დენტის აფეთქების მომენტში ტემპერატურის მყისიერი დაფიქსირება და მაღალტემპერატურული დენტის აირის მოძრაობის შედეგად ლულის არხის ზედაპირზე განვითარებული ტემპერატურის გაზომვა, განსაკუთრებით უწყვეტი სროლების პირობებში. ამიტომ ამოცანის გადასაჭრელად ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა ისეთი მათემატიკური მოდელის შემუშავება, რომელიც, რეალურთან მაქსიმალურად ახლოს მყოფი, პირობითი სასაზღვრო პირობების შემოტანის საფუძველზე აღწერს სროლის პროცესში ლულაში ტემპერატურისა და შესაბამისი თერმული ძაბვების განაწილების ხასიათს და ადგენს მისი პრაქტიკული გამოყენების პირობებს.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. ჩვენს მიერ გამოკვეთილი იქნა კალაშნიკოვი AK-74-ის მწყობრიდან გამოსული ლულის არხის მდგომარეობა და მისი მიკროსტრუქტურები მიკროსკოპ „Neophot 32“-ის საშუალებით. ლულის სიგრძის გასწვრივ შესწავლილი იქნა მიკროსისალის ცვლილება მიკროსისალის გამზომი ხელსაწყოს ПМТ-3-ის გამოყენებით, ხოლო მაკროსისალე გაზომილია როკველის ხელსაწყოზე. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად, ლულის სიგრძის გასწვრივ გამოვლენილია სტრუქტურის სავარაუდო ცვლილების ტენდენცია და დადგენილია მაკრო და მიკროსისალის კლების ხასიათი. ამავდროულად, როგორც მაკრო, ასევე მიკროსტრუქტურული ანალიზის შედეგები აშკარად მიუთითებს ისეთ დაზიანებებზე, რომლებიც უფრო ახლოს არის ცვეთის, კავიტაციური რღვევის ან აიროვანი ეროზიის დროს წარმოქმნილ დაზიანებებთან, ვიდრე თერმულ ბზარებთან. ყოველივე ამან განაპირობა თეორიული კვლევის აუცილებლობა, რაც მოგვცემდა საშუალებას მეცნიერულად აგვეხსნა მწყობრიდან გამოსული ლულის შესწავლისას გამოვლენილ დაზიანებათა შორის თერმული ბზარების არ არსებობა და შეგვეფასებინა ზოგადად თერმული დაღლილობის გავლენა ლულის მწყობრიდან გამოსვლის პროცესზე.

თეორიული კვლევის ფარგლებში დასმული მათემატიკური ამოცანა ტექნიკურად რთულად გადასჭრელ პრობლემათა ჯგუფს მიეკუთვნება. შესაბამისად, მისი ამოხსნის პროცესში მთელი სიმძლავრით გამოიყენება ისეთი მათემატიკური დისციპლინები, როგორებიცაა მათემატიკური ანალიზი, ჩვეულებრივი და კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებები, ინტეგრალური გარდაქმნები და სხვ. მიღებული ამონახსნების გრაფიკული წარმოდგენისა და კვლევის პროცესში სხვადასხვა ტიპის გამოთვლებისთვის საჭირო პროგრამული კოდების ასაგებად ინტენსიურად გამოიყენებოდა ისეთი პროგრამული პაკეტები და ინტეგრირებული გარემოები, როგორებიცაა MATLAB, Visual Studio და დაპროგრამების ენა C++.

შემუშავებულმა მათემატიკურმა მოდელმა მოგვცა საშუალება შეგვეფასებინა ლულაში მხოლოდ დენტის აირის ტემპერატურული ზემოქმედების შედეგად განვითარებული ტემპერატურისა და აღძრული თერმული ძაბვების ხასიათი და მნიშვნელობები, რომელთა განსაზღვრაც ექსპერიმენტული მეთოდებით ძალზედ რთულად გადასაჭრელ საკითხს წამოადგენს.

მათემატიკური მოდელირებისას მიღებული შედეგების და მწყობრიდან გამოსული ლულის შესწავლისას აღმოჩენილი დაზიანებების ერთიანი ანალიზის საფუძველზე გამოირიცხა თერმული დადლილობის გავლენა და წინა პლანზე წამოიწია ცვეთის როლმა ლულის მწყობრიდან გამოსვლის პროცესში. აქედან გამომდინარე, ჩვენს მიერ დამუშავებული იქნა სპეცდანიშნულების, საკონტრუქციო ფოლადების მაღალი სიხშირის ინდუქციურ ღუმელში გამოდნობის ტექნოლოგია სალულე ფოლადების ცვეთამედეგობის გაზრდის მიზნით.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და სიახლე. თეორიული კვლევის შედეგად მიღებული იქნა ანალიზური ამონახსნი სრულიად დინამიკური პრობლემისა, რომელიც გულისხმობს როგორც ტემპერატურული ველის პოვნას დინამიკური სითბოგამტარობის განტოლების ამოხსნით, ისე თერმული ძაბვების განსაზღვრას დრეკადი სხეულის წონასწორობის დინამიკური ამოცანის გადაჭრით.

ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად, თერმული დაღლილობის პროცესი გამოირიცხა ლულის მწყობრიდან გამოსვლის ფაქტორებიდან.

დამუშავდა სპეცდანიშნულების ფოლადების მაღალი სიხშირის ინდუქციურ ღუმელში გამოდნობის ტექნოლოგია. ფოლადის მიღების ასეთი ტექნოლოგია წარმატებით იქნა განხორციელებული აგრეთვე 50კგ-იან ინდუქციურ ღუმელში, რაც გვაძლევს უფლებას დავასკვნათ, რომ სპეცდანიშნულების ფოლადებზე მცირე მასშტაბებით მოთხევენის შემთხვევაში სრულიად შესაძლებელია გამოყენებული იქნას 10-50 კგ-იანი მაღალი სიხშირის ინდუქციური ღუმელები. ჩვენს მიერ გამოდნობილი ფოლადის 35 მმ დიამეტრის მქონე მრგვალი ძელაკები გადაგზავნილია სამხედრო სამეცნიერო-ტექნიკურ ცენტრში „დელტა“ შემდგომი კვლევების გასაგრძელებლად.

შედეგების გამოყენების სფერო. უნდა აღინიშნოს, რომ შემუშავებული მათემატიკური მოდელის პერსპექტივა ზოგადი ხასიათის მატარებელია. იგი არ იზღუდება ამ კონკრეტული შემთხვევით და შესაძლებელია მისი გავრცობა მრავალ ფიზიკურ პროცესზე, რომლებსაც ადგილი აქვს ღერძული სიმეტრიის მქონე მყარ სხეულებში, რადგან ტემპერატურისა და წნევის ცოდნა გარემოში მნიშვნელოვანია მასში მიმდინარე პროცესების შეფასებისათვის. გარდა ამისა, ვიმედოვნებთ, რომ ზოგადად თეორიული კვლევის მეთოდოლოგია და სტრატეგია სასარგებლო იქნება შესადარებლად იმ მეცნიერთათვის, რომლებიც სწავლობენ დაღლილობის სხვადასხვა სახეებს, კერძოდ ენერგეტიკულ დანადგარებში, მილგაყვანილობებში, ატომურ ენერგეტიკაში.

ჩვენს მიერ პრობლემისადმი მიდგომის ანალოგიური კონცეფცია გამოენებული იქნა თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზისა (თმს) და ელექტრო გლინვის შერწყმულ პროცესში ტემპერატურული ველის მოდელირებისთვის. აღნიშნული ტექნოლოგია გულისხმობდა გლინების გავლით დეფორმაციის ზონაში ელექტრული დანის გატარებას, რადროსაც, გასაგლინი მასალის მაღალი ელექტროწინააღობის გამო,

გამოყოფილი ჯოჯოხეთის სიტბო უზრუნველყოფს გლინვის პროცესის იზოთერმულ რეჟიმს. მოხერხდა ცივი გლინების გახურებულ კაზმთან შეხებისას დაკარგული სიტბოს რაოდენობის განსაზღვრა და პროცესის იზოთერმულობის შესანარჩუნებლად საჭირო დენის ძალის მნიშვნელობის დადგენა. უნდა აღინიშნოს თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების კარგი თანხვედრა.

სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს სტუ-ის მოთხოვნათა შესაბამისად შესრულებულ 136 ნაბეჭდ გვერდს. იგი შედგება შესავალისა და 3 ძირითადი თავისგან, რომელთაგან ზოგიერთი მათგანი წარმოდგენილია რამდენიმე ქვეთავის სახით. ნაშრომში წარმოდგენილია 73 ილუსტრაცია და 8 ცხრილი.

სადისერტაციო ნაშრომის აპრობაცია და პუბლიკაციები. დისერტაციის ძირითადი შედეგები მოხსენდა სტუდენტთა 84-ე და 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე, რომელიც ჩატარდა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში; მათემატიკური მოდელის აპრობაციის შედეგები თმს-ელექტრო გლინვის პროცესში წარმოდგენილი იყო თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზის XIV საერთაშორისო სიმპოზიუმზე, რომელიც გაიმართა 2017 წლის 25-28 სექტემბერს თბილისში, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიაში.

შინაარსი

ფოლადის ლულის თერმული დაღლილობისადმი მედეგობის აღსაწერად, უპირველეს ყოვლისა, საჭიროა სროლის პროცესში ლულის სიგრძეზე და განივ კვეთში ტემპერატურისა და თერმული ძაბვების განაწილების ხასიათის დადგენა. რადგან ზუსტად რეალური პროცესის აღმწერი მათემატიკური მოდელის შექმნა ფაქტიურად შეუძლებელია, ამიტომ ხშირ შემთხვევებში გამართლებულია გარკვეული დაშვებებისა და მიახლოების გაკეთება, რათა შევძლოთ ჩვენთვის საინტერესო პროცესის ანალიზი. ქვემოთ მოცემულია ის მოსაზრებები და მიდგომები, რომლებიც, თეორიული კვლევის ფარგლებში, გამოყენებული იქნა პროცესის იდეალიზაციისთვის:

პიველ რიგში ჩვენ ლულას განვიხილავთ, როგორც ერთგვაროვან და იზოტროპულ ღერძული სიმეტრიის გარემოს, რომლის თერმო-მექანიკური თვისებებიც: სითბოგამტარობის კოეფიციენტი, კუთრი სითბოტევადობა, სიმკვრივე, იუნგის მოდული და პუასონის კოეფიციენტი, არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. ამით ჩვენ თავიდან ავიცილეთ პროცესის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებების არაწრფივობა. წინააღმდეგ შემთხვევაში შეუძლებელი იქნებოდა ანალიზური ამონახსნების მიღება.

რაც შეეხება ლულის გეომეტრიას. ცნობილია, რომ ლულას შიგა ზედაპირზე აქვს სპირალისებური ჭრილი, რომელიც არხში მოძრავ ტყვიას აიძულებს შეასრულოს ბრუნვითი მოძრაობა საკუთარი სიმეტრიის ღერძის გარშემო. გარდა ამისა, ლულის კედლის სისქეც განსხვავებულია სხვადასხვა განივ კვეთშიც, ანუ ლულას აქვს წაკვეთილი კონუსის ფორმა. მიუხედავად ამისა, პირველი მიახლოებით, ჩვენ მას განვიხილავთ, როგორც მუდმივი კედლის სისქის მიღს, იდეალური ცილინდრული ფორმის შიგა და გარე ზედაპირებით.

შემდეგ განვიხილოთ დაშვებები, რომლებიც გაკეთებულია სასაზღვრო პირობების დასასმელად, რომელთა გარეშეც საერთოდ შეუძლებელია სივრცეში მიმდინარე ნებისმიერი მოვლენის მათემატიკური

აღწერა. პირველ რიგში აღვნიშნავთ, რომ რადგან ჩვენს ამოცანას წარმოადგენს თერმული დალილობის გავლენის შეფასება ლულის ხანგამძლეობაზე, ამიტომ არ განვიხილავთ ლულაზე დენტის აფეთქების შედეგად წარმოქმნილი წნევის ზემოქმედებას, რომელიც ლულის შიგა ზედაპირზე მოქმედი მექანიკური დატვირთვის ანალოგიურია. რეალურ პროცესში დენტის აირი ასრულებს მუშაობას როგორც ტყვიის ასაჩქარებლად, ასევე მომდევნო ვაზნის მოსათავსებლად ლულის არხში. გარდა ამისა, იგი თბური ენერჯის გარკვეულ ნაწილს გადასცემს მასთან შეხებაში მყოფ გარემოს, ანუ ტყვიასა და ლულის კედლებს. აქედან გამომდინარე, ცხადია, რომ მისი ტემპერატურა იცვლება დროში და კლებულობს ლულის სიგრძის გასწვრივ, ანუ ლულაზე დენტის აირის ტემპერატურული ზემოქმედების ხარისხი განსხვავებულია ლულის სიგრძის სხვადასხვა წერტილში, კერძოდ, მისი გავლენა ლულის თავში, ანუ დენტის აფეთქების ადგილზე, მეტია, ვიდრე მისი გავლენა ლულის ბოლოში. მიუხედავად ამისა, ჩვენ უგულებელვყავით ტემპერატურის ეს ვარდნა ლულის სიგრძის გასწვრივ და დენტის აირის ტემპერატურას განვიხილავთ როგორც მხოლოდ დროზე დამოკიდებულ ფუნქციას, ანუ, სხვა სიტყვებით, დენტის აირი ლულის გასწვრივ ინარჩუნებს ტემპერატურის იმ მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რომელიც ჰქონდა დენტის აფეთქების წერტილში. ამით ჩვენ, ერთის მხრივ, გავიმარტივეთ მათემატიკური ამოცანა იმ სივრცული ცვლადის გამორიცხვით, რომელიც შეესაბამება ლულის სიგრძეს და, მეორეს მხრივ კი, დავამძიმეთ ლულის საექსპლუატაციო პირობები ტემპერატურული დატვირთვების კუთხით, ანუ განვიხილავთ ლულაზე მოქმედ ტემპერატურულ დატვირთვას ზედა ზღვარს და ვსწავლობთ მისი გამძლეობის საკითხს ამგვარ პირობებში.

ამ დაშვებების საფუძველზე პროცესის აღმწერი იდეალიზირებული მათემატიკური ამოცანა ფორმულირდება შემდეგნაირად:

განვიხილოთ $T = 0^{\circ}\text{C}$ საწყისი ტემპერატურის მქონე ერთგვაროვანი და იზოტროპული მასალისგან დამზადებული მილი, რომლის შიგნითაც მოძრაობას იწყებს ნივთიერება, რომლის ტემპერატურა აღიწერება ცნობილი

$f(t)$ ფუნქციით, რომელიც თავისი ცვლადის მინიმუმ ორჯერ უწყვეტად წარმოებადი ფუნქციაა და აკმაყოფილებს $f(0) = 0$ პირობას. დაუშვათ, რომ მილის r რადიუსი იცვლება a -დან b -მდე. მილის გარე $r = b$ ზედაპირზე ადგილი აქვს კონვექციურ თბომიმოცვლის პროცესს ასევე ნულოვანი ტემპერატურის გარემოსთან. შევისწავლოთ ამ პირობებში მომუშავე მილის ტემპერატურული ველისა და მასში განვითარებული თერმული ძაბვების დინამიკა.

მილში ადგილი აქვს ღებულ სიმეტრიას, ამიტომ მასში მიმდინარე პროცესების აღსაწერად მოსახერხებელია გამოვიყენოთ ცილინდრული კოორდინატთა სისტემა. პირველ რიგში შევნიშნოთ, რომ რადგან $f(t)$ ფუნქცია არ არის დამოკიდებული θ პოლარულ კუთხეზე და z მილის სიგრძეზე, ამიტომ ცხადია, რომ არც მილის ტემპერატურა და არც მისი შესაბამისი გადაადგილების ველი არ იქნება ამ ორ სივრცულ ცვლადზე დამოკიდებული, ანუ ადგილი ექნება ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევას. გადაადგილების ველისთვის ჩაწერილ დრეკადი სხეულის მოძრაობის ერთგანზომილებიან განტოლებას, რომელიც შეესაბამება სხეულზე მოქმედ ნულოვან მოცულობით ძალას, აქვს შემდეგი სახე:

$$(2\mu + \lambda) \left[\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} \right] - (3\lambda + 2\mu)\alpha \frac{\partial T}{\partial r} = \rho \ddot{u},$$

სადაც $u(r, t)$ დრეკადი დეფორმაციის შედეგად სხეულის წერტილთა გადაადგილებაა; λ და μ ლამეს - კოეფიციენტები; α - სხეულის ტემპერატურული წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი; ∇^2 - წრფივი დიფერენციალური ოპერატორი:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}; \quad (1)$$

წერტილი ობიექტზე აღნიშნავს დროით წარმოებულს იმდენჯერ, რამდენი წერტილიც არის დასმული ობიექტზე, ხოლო $T(r, t)$ სხეულის ტემპერატურაა, რომელიც აკმაყოფილებს სითბოგამტარობის ერთგვაროვან განტოლებას:

$$\dot{T} - M \nabla^2 T = 0, \quad (2)$$

რომელშიც

$$M = \frac{k}{\zeta\rho}, \quad (3)$$

k სხეულის სითბოგამტარობის კოეფიციენტი; ζ - სხეულის კუთრი სითბო-ტევადობა და ρ სხეულის სიმკვრივე.

ამ კონკრეტული შემთხვევისთვის ნაჩვენებია, რომ $u(r, t)$ გადაადგილების ველი შესაძლებელია წარმოდგინდეს $\varphi(r, t)$ თერმოდრეკადი სკალარპოტენციალის საშუალებით შემდეგნაირად:

$$u = \frac{\partial\varphi}{\partial r}, \quad (4)$$

სადაც $\varphi(r, t)$ აკმაყოფილებს არაერთგვაროვან ტალღურ განტოლებას:

$$\nabla^2\varphi - \frac{1}{c^2}\ddot{\varphi} = \beta T, \quad (5)$$

რომელშიც

$$\frac{1}{c^2} = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu}, \quad \beta = \frac{(2\lambda + 3\mu)\alpha}{\lambda + 2\mu}.$$

ღერძული სიმეტრიის ბრტყელი დეფორმაციის შემთხვევაში, ჰუკის კანონის თანახმად, პოლარულ კოორდინატთა სისტემაში ჩაწერილ ძაბვისა და გადაადგილების თანაფარდობას აქვს შემდეგი სახე:

$$\sigma_r = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T, \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = 2\mu \frac{u}{r} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T, \quad (7)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - E\alpha T, \quad (8)$$

სადაც $\sigma_r(r, t)$, $\sigma_\theta(r, t)$ და $\sigma_z(r, t)$ შესაბამისად რადიალური, მხები და აქსიალური ძაბვებია, ხოლო ν და E კი - მასალის პუასონის კოეფიციენტი და იუნგის მოდული, რომლებიც ლამეს კოეფიციენტებთან დაკავშირებულია შემდეგი თანაფარდობებით:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

(4) ტოლობის ჩასმა (6-8) ტოლობებში გვაძლევს თერმული ძაბვების დამოკიდებულებას $\varphi(r, t)$ თერმოდრეკად პოტენციალზე:

$$\sigma_r = 2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T, \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2\mu}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) - (3\lambda + 2\mu)\alpha T, \quad (10)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - E\alpha T. \quad (11)$$

მაშასადამე, ეხლა უკვე ცხადია, რომ (5) განტოლებიდან $\varphi(r, t)$ პოტენციალის განსაზღვრის შემდეგ, (9-11) ტოლობათა სისტემა მოგვცემს თერმულ ძაბვებს, რომლებიც შეესაბამება სხეულის $T(r, t)$ ტემპერატურას.

(5) განტოლების ამოსახსნელად, ისევე როგორც ნებისმიერი არასტაციონარული კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლების შემთხვევაში, საჭიროა დავსავათ ჩვენთვის საინტერესო პროცესის შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობები. როგორც ზემოთ იყო ნახსენები, დროის საწყის მომენტში ლულას (მილს) აქვს გარემოს ტემპერატურა, რომელიც პირობითად ნულის ტოლად არის მიჩნეული. აქედან გამომდინარე ცხადია, რომ დროის საწყისი მომენტისთვის, ანუ სროლის დაწყებამდე, ლულაში არ გვაქვს არანაირი დამაბული მდგომარეობა და შესაბამისად, მისი წერტილთა გადაადგილებებიც ნულის ტოლია. მაშასადამე, (4) ტოლობის გათვალისწინებით, (5) განტოლებისთვის შესაძლებელია დავსვათ ერთგვაროვანი საწყისი პირობები:

$$\varphi|_{t=0} = \dot{\varphi}|_{t=0} = 0. \quad (12)$$

რაც შეეხება სასაზღვრო პირობებს. ზემოთ, სადაც აღწერილი გვაქვს ჩვენს მიერ გაკეთებული დაშვებები, ლულის შიგა და გარე ზედაპირებზე მოქმედი წნევა უგულებელვყავით, ანუ $\sigma_r|_{r=a} = \sigma_r|_{r=b} = 0$. (9) ტოლობის გათვალისწინებით, ამ დაშვების მათემატიკური ჩანაწერი გვაძლევს (5) განტოლების სასაზღვრო პირობებს. კერძოდ:

$$2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \Big|_{r=a} + \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \Big|_{r=a} = (3\lambda + 2\mu)\alpha T|_{r=a}, \quad (13)$$

$$2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \Big|_{r=b} + \lambda \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \Big|_{r=b} = (3\lambda + 2\mu)\alpha T|_{r=b}, \quad (14)$$

(გავიხსენოთ, რომ წნევა წარმოადგენს ზედაპირის ფართის ერთეულზე მართობულად მოქმედ ძალას, რაც ცილინდრული ფორმის ზედაპირის შემთხვევაში რადიალური ძაბვის იდენტურია).

ამჯერად უკვე ცხადია, რომ საწყის ეტაპზე უნდა დავადგინოთ სხეულში ტემპერატურის განაწილება (2) განტოლების ამოხსნით, შემდეგ ეტაპზე (5), (12), (13), (14) ამოცანის გადაჭრით ვიპოვოთ $\varphi(r, t)$ პოტენციალს, ხოლო შემდეგ კი (9-11) ტოლობები მოგვცემს შესასწავლი პროცესის დროს სხეულში აღძრულ თერმულ ძაბვებს.

იმისათვის, რომ ამოვხსნათ (2) განტოლება, აუცილებელია დროის საწყის მომენტში ლულის ტემპერატურის ცოდნა და ინფორმაცია ლულის სასაზღვრო ზედაპირების ტემპერატურის შესახებ მთელი პროცესის განმავლობაში. ამ ინფორმაციის მოპოვება, უმეტეს შემთხვევებში, ექსპერიმენტით ხდება. ადვილი მისახვედრია, რომ ჩვენი ამოცანის შემთხვევაში ამგვარი ექსპერიმენტის ჩატარება ან შეუძლებელია, ან საკმაოდ რთულია, ამიტომ სასაზღვრო პირობები დავსვათ შემდეგ მოსაზრებებზე დაყრდნობით:

ცნობილია, რომ ზედაპირის ერთეულზე მოსული სითბოს დანაკარგი ზედაპირისა და მასთან შეხებაში მყოფი გარემოს ტემპერატურათა სხვაობის პროპორციულია. პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც კონვექციურ სითბოგამტარობის კოეფიციენტს უწოდებენ, დამოკიდებულია ზედაპირის გვარობასა და მდგომარეობაზე. ავლნიშნოთ ეს კოეფიციენტი H -ით. ამავდროულად, სითბოს ეს რაოდენობა ტოლი უნდა იყოს $-k \frac{\partial T}{\partial n}$ სითბური ნაკადისა, სადაც \vec{n} ზედაპირის გარე ნორმალაა. მაშასადამე $r = a$ და $r = b$ ზედაპირებზე სასაზღვრო პირობებს ექნებათ სახე:

$$H_1(T|_{r=a} - f) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=a}$$

$$H_2(T|_{r=b} - 0) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=b}$$

სადაც, $f(t)$ დნეთის აირის ტემპერატურაა. ცხადია, რომ ლულის შიგა და გარე ზედაპირებზე შესაბამისად ადგილი აქვს ტოლობებს $\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{\partial T}{\partial r}$ და $\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial r}$, მაშინ ჩვენი სასაზღვრო პირობები ამ ზედაპირებზე მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=a} - h_1 T|_{r=a} = -h_1 f,$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} + h_2 T|_{r=b} = 0,$$

სადაც

$$h_1 = \frac{H_1}{k}, \quad h_2 = \frac{H_2}{k}.$$

რაც შეეხება საწყის პირობას მარტივია იმის მიხვედრა, რომ ჩვენი ამოცანისთვის დროის საწყის მომენტში ლულის ტემპერატურა იქნება:

$$T|_{t=0} = 0.$$

მაშასადამე მივიღეთ სითბოგამტარობის მათემატიკური ამოცანა არა-ერთგვაროვანი სასაზღვრო პირობებით:

$$\dot{T} - M\nabla^2 T = 0, \quad a < r < b$$

საწყისი პირობა:

$$T|_{t=0} = 0,$$

სასაზღვრო პირობები:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=a} - h_1 T|_{r=a} = -h_1 f,$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} + h_2 T|_{r=b} = 0,$$

სადაც ოპერატორი ∇^2 განმარტებულია (1) ტოლობით, ხოლო კოეფიციენტი M კი - (3) ტოლობით.

ჩვენს მიერ დამუშავებული ცვეთამედეგი, მაღალი სიმტკიცის საკონსტრუქციო ფოლადების გამოდნობის ტექნოლოგია გულისხმობს თხევადი ფოლადის რაფინირებისთვის სინთეზური წიდის გამოყენებას, რომლის ძირითადი კომპონენტებია CaO (40-45%), CaF_2 (25-30%) და Al_2O_3 (30-35%). ასეთი წიდის დნობის ტემპერატურაა 1350-1400 °C.

საკვლევი ფოლადების დნობებს ვაწარმოებდით 12 კგ მოცულობის, ფუძე ამონაგიან (მაგნეზიტი), მაღალი სიხშირის ინდუქციურ ღუმელში. საკაზმე მასალებად გამოიყენებოდა არმკო რკინა, ფოლადები Y7 და Y8, ჩვენს მიერ სპეციალურად გამოდნობილი თუჯი (C=3,5 - 4,0%) გოგირდისა და ფოსფორის მინიმალური (0.01%) შემცველობით. კვლევის პროცესში გადასადნობად გამოიყენებოდა აგრეთვე ფოლადები 45, 50, და 40X.

კაზმის გაანგარიშებას ვაწარმოებდით 10 კგ-იან დნობაზე, დნობის პროცესში მალეგირებელი ელემენტების დანაკარგების (ამოწვის) გათვალისწინებით. ლეგირებისათვის ვიყენებდით სუფთა ელექტროლიტურ ნიკელს

(99,9%), სუფთა ქრომს და ფეროქრომს (65%Cr), ფერომოლიბდენს (60%Mo), ფეროსილიციუმს (90%Si და 75%Si), სუფთა ელექტროლიტურ მანგანუმსა და ფერომანგანუმს (76%Mn), ფეროვანადიუმს (35%V), ფერობორს (30%B).

ლითონის გადნობის შემდეგ თხევადი ლითონის ზედაპირზე ვაყრიდით წინასწარ 800°C-მდე გახურებულ სინთეზურ წიდას, სადნობ ტიგელს ზემოდან ვახურავდით გრაფიტისაგან დამზადებულ სარქველს და ასეთ მდგომარეობაში ვაყოვნებდით 10-15 წუთს. მალეგირებელი ელემენტების შეყვანას თხევად ფოლადში ვაწარმოებდით რკინის ძელაყზე დამაგრებული თხელი თუნუქის პაკეტებით. ლითონის შხეფების თავიდან ასაცილებლად და ტენის მოსაცილებლად პაკეტებს წინასწარ ვახურებდით 200-300°C-მდე. გამონაკლისს წარმოადგენდა FeMo და Ni, რომლებიც ღუმელში შეგვყავდა კაზმთან ერთად, რადგან ეს ელემენტები რკინასთან შედარებით უფრო პასიურია და დანაკარგებიც უმნიშვნელო (0,5-1,0%).

დნობის ბოლო ეტაპზე თხევადი ლითონის ზედაპირს ვანთავისუფლებდით გამდნარი წიდისგან სპეციალური რკინის კოვზებით, ვაწარმოებდით ლითონის განჟანგვას სუფთა ალუმინით და ამის შემდეგ ლითონის ჩამოსხმას ვანხორციელებდით ვერტიკალურად გახსნად ცილინდრულ ან მართკუთხა ფორმის ბოყვებში. ბოყვში ჩამოსხმულ თხევად ლითონს ზემოდან ვაყრიდით თბოსაიზოლაციო ფხვნილებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაჯდომის ნიჟარის ზოდის ზემო ნაწილში განთავსებას და ჯანსაღი სხმულის მიღებას.

ჩამოსხმული ზოდის სრულ ჰომოგენიზაციას ვახდენდით 850-900°C-ზე 2 საათიანი დაყოვნებით, გაცივებას ვაწარმოებდით ღუმელთან ერთად. ზოდების თავური გადაჭრისა და ქიმიური ანალიზისათვის ნიმუშების აღების შემდეგ ზოდებს ვამზადებდით გლინვისთვის. მართკუთხა ზოდები იგლინებოდა 20 მმ სისქის ფურცლებად, ხოლო ცილინდრული – 35 მმ დიამეტრის მქონე მრგვალ ძელაკებად. გლინვის შედეგად მიღებული ფურცლოვანი ნაგლინიდან ვამზადებდით ნიმუშებს მექანიკური თვისებების შესასწავლად როგორც გრძივ, ასევე განივი კვეთის მიმართულებით. ნიმუშებს ვამზადებდით ასევე მეტალოგრაფიული კვლევისათვის.

მექანიკური თვისებების შესასწავლად და მეტალოგრაფიული კვლევისათვის
ნიმუშებს ვამზადებთით ასევე ლითონის მრგვალი ნამზადებიდანაც.

დასკვნა

ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად მიღებული შედეგები და ზოგადი დასკვნები შესაძლებელია შეჯამდეს შემდეგნაირად:

1. თეორიული კვლევის ფარგლებში ამოხსნილია არცთუ მთლად ტრივიალური მათემატიკური ამოცანა. ამოხსნის პროცესში გადაჭრილია შემდეგი ტექნიკურად რთული საკითხები:

- ❖ მიღებულია ინტეგრალური გარდაქმნებისთვის საჭირო შესაფერისი ორთოგონალური ფუნქციების ბაზისები;
- ❖ მოინახა მოხერხებული მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს რეალური პროცესის შესაბამისი რთული სასაზღვრო ამოცანის ისეთ სახემდე დაყვანას, რომლის ამოხსნის მეთოდებიც, მიუხედავად მათი სირთულისა, ცნობილი და საკმარისად შესწავლილია;
- ❖ შემუშავებული იქნა გარდაქმნის მატრიცის გამოთვლის ორიგინალური მეთოდი, რომელიც ერთფუნქციონალურ სივრცეს ასახავს მეორეში.

2. მიღებული ანალიზური ფუნქციები, რომლებიც აღწერს სროლის დროს ლულაში განვითარებული ტემპერატურისა და თერმული ძაბვების ცვლილებას, მათემატიკური აზრით საკმარისად მდგრადი ფუნქციებია, რადგან ყოველი მათგანი წარმოდგენილია სწრაფად კრებადი მწკრივის სახით.

3. მათემატიკური ამოცანის ამოხსნის დროს განვიხილეთ ლულაზე მოქმედ თერმულ დატვირთვათა ზედა ზღვარი და შევაფასეთ მისი გამძლეობის საკითხი ამგვარ პირობებში. თეორიული კვლევის შედეგები შემდეგი დასკვნების გაკეთების შეაძლებლობას იძლევა:

- ❖ მიჯრით სროლის პროცესში, ლულის შიგა ზედაპირი, რომელზეც მიიღწევა მაქსიმალური ტემპერატურა მხოლოდ დენტის აირის ტემპერატურული ზემოქმედებით, ხურდება მაქსიმუმ 400-450°C-მდე (აქ გათვალისწინებული არ არის ტყვიის ლულის კედელთან ხახუნის შედეგად წარმოქმნილი სითბოს წვლილი);
- ❖ განსხვავება ლულის მაქსიმალურ და მინიმალურ ტემპერატურებს შორის, რომელიც განაპირობებს მასში თერმული ძაბვების წარმოქმნას, არ აღემატება 5°C-ს;
- ❖ გამოვლენილია სროლის დროს ლულაში აღმრული რადიალური და აქსიალური ძაბვების ნიშაცვლადი ხასიათი, რომელთა აბსოლუტური მნიშვნელობა არ აღემატება 10 მგპა-ს;
- ❖ მხები ძაბვის მნიშვნელობა ლულაში აღწევს 70 მგპა-ს და იგი ყოველთვის გამჭიმავი მოქმედებისაა.

4. გამოვლინდა ზოგადი ხასიათის მქონე ფაქტი. კერძოდ, თუ მილში მოძრაობს ნივთიერება, რომლის ტემპერატურაც დროში პერიოდულად იცვლება და ამავდროულად პროცესის დროს შესაძლებელია მილის შიგა ზედაპირზე მოქმედი წნევის უგულებელყოფა, მაშინ მილის კედლის სისქეში არსებობს ფენა, რომელიც რადიალური და აქსიალური მიმართულებით, სხვა ფენებთან შედარებით, განიცდის ექსტრემალურ დატვირთვებს და ეს ფენა არ არის კედლის შიგა ზედაპირული ფენა. კერძოდ, ჩვენი კონკრეტული

ამოცანის შემთხვევაში, ეს ფენა განთავსებულია შიგა ზედაპირიდან 0.46 მმ-ის სიღრმეში და მისი სისქეა 1.18 მმ.

5. თეორიული ანალიზით ნაჩვენებია, რომ თერმული დაღლილობა არ წარმოადგენს ლულის მწყობრიდან გამოსვლის მთავარ მიზეზს, რადგან სროლის დროს ლულაში განვითარებული თერმული დაბრუნებები ძალზედ მცირეა ფოლადი 50-ის გამძლეობის ზღვართან შედარებით.

6. ლულის სიგრძის გასწვრივ გამოკვლეულია ლითონის მაკროსტრუქტურა, მიკროსტრუქტურა და სისალის განაწილების ხასიათი. სტრუქტურისა და სისალის ცვლილების (კლებადი) შედეგები მიუთითებს ცვეთით ლულის მწყობრიდან გამოსვლის ხასიათზე და გამორიცხავს მასზე თერმული დაღლილობის გავლენას, რომელიც სრულ შესაბამისობაშია მათემატიკური გამოთვლის შედეგებთან.

7. მწყობრიდან გამოსული ლულის შესწავლისა და მასში მიდინარე პროცესების თეორიული ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ შემუშავებულია ტექნოლოგია და გამოდნობილია ცვეთამდეგი, მხურვალმტკიცე ფოლადების საცდელი პარტია. ჩატარებულია მათი მეტალოგრაფიული კვლევა, თერმული დამუშავება და დადგენილია მექანიკური თვისებები. მიღებული ნიმუშები გადაგზავნილია სამხედრო სამეცნიერო-ტექნიკურ ცენტრში „დელტა“ შემდგომი კვლევების გასაგრძელებლად.

კვლევის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგი პუბლიკაციების სახით:

1. Antashvili L., Okrosashvili M., Tavadze G., Beradze B., Tsitsishvili M. Mathematical model of changing temperature distribution in gun burrel while shooting process. *Proceedings of I. Vekua Institute of Applied Mathematics*, 2015, 65, 3-11;
2. Namicheishvili T., Antashvili L., Oniashvili G., Tavadze G., Melashvili Z., Tutberidze A., Zakharov G., Aslamazashvili Z. Modeling of thermal field during SHS-electric rolling. *XIV International Symposium on Self-Propagating High Temperature Synthesis, Book of Abstarcts*, 2017, 170-174;
3. ლ. ანთაშვილი, მ. ოქროსაშვილი, გ. თავაძე. სპეცდანიშნულების საკონსტრუქციო ფოლადების მაღალი სიხშირის ინდუქციურ ღუმელში გამოდნობის ტექნოლოგიის დამუშავება და მიღებული ნამზადების კომპლექსური შესწავლა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, №2(504), 2017, 98–106;
4. ანთაშვილი ლ. სასრული სისქისა და სიგრძის მილში ტემპერატურული ველის განაწილება არასტაციონარული წერილოვანი სითბოს წყაროს შემთხვევაში. სტუდენტთა 84-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, თეზისების კრებული, თბილისი, 2017, 161;

Abstract

Majorities of metal constructions work under cyclic loads. It is clear, that cyclic loads make more severe conditions for metal to work than static and dynamic loads. In such conditions, metallic structure ruptures under stress that is sufficiently below not only ordinary ultimate stress but also elastic limit. The phenomenon that causes such failure of the structure is known as a fatigue.

The source of the field of an alternating stress developed inside the metal could be alternating loads acting on the surface of the sample as well as non-homogenous temperature field existing in the body, which causes creation of non-stationary thermal gradients. Simultaneous influence of the both factors is also possible that makes working conditions more severe. Failures in metallic structures due to alternating thermal loadings are called thermal fatigue.

Since fatigue resistance is one of the most important characteristic of any metallic structure, gun barrel also isn't an exception taking into account the loads acting on it. Improvement of durability of the barrel is one of the actual problems in the developed countries of the world. Based on the mentioned above, while studying of endurance of the barrel the role of thermal fatigue among the factors causing damage in the barrel should be estimated firstly.

We have investigated structure, macro and microhardness of the damaged barrel. During macroscopic study of barrel noticeable cracks typical for the thermal fatigue have not been found. Furthermore, cracks were not found during microscopic analysis of the structure and inner surface of the barrel. Experimental investigations showed the tendency of the structural transform and decrement in the values of macro and microhardness was established along the length of the barrel.

As a lot of complexities are connected to physical modeling of the shooting process, elaboration such mathematical model, which, on the base of conditional boundary conditions close to the real process, describes distributions of temperature and corresponding thermal stresses, was our object.

By the first approach, barrel can be considered as pipe with finite length and thickness, whose inner surface is subject to the nonstationary thermal loads. Problems of our study can be divided and described as follows: The first problem implies analytical solution of the heat conduction equation with radiation nonhomogeneous boundary conditions, and the second problem deals with obtaining of analytical solution of the displacement equation of motion of nonisothermal elastodynamics for homogeneous isotropic elastic body, when inner and outer surfaces of the body are considered as traction free (we have neglected pressure impact of gunpowder on the barrel since we have investigated influence of thermal fatigue on the endurance of the barrel). The last equation is known as Navier's equation. Generalized Hankel transform is used to solve the problems. Two basis of orthogonal functions necessary for integral transform are obtained. The first corresponds to the boundary conditions written for the heat conduction equation and the second fits the boundary conditions of Navier's equation. We have also calculated matrix mapping one functional space to another.

Using theoretical analysis, it was shown that thermal fatigue is not a prime reason of damages in barrel since thermal stresses developed in barrel during shooting process is quite less than the fatigue limit of steel C50. Thus, absence of thermal cracks at the inner surface and in structure of barrel is explained reasonably.

Elaborated mathematical model carries general character. It is not restricted by this problem only and can be generalized for many physical problems taking place in the solid bodies with axial symmetry as knowledge of the temperature and pressure of the media is an important information to estimate processes ongoing in it.

The concept of the approach to problem have been used in combined process of self-propagating high temperature synthesis and electric rolling for modeling of temperature field. The technology implies the current passing into deformation zone through mills when, due to high electric resistance of the rolling material, produced Joule heat provides isothermal regime of the rolling process. The amount of heat, which is lost due to interaction between heated material and cold rolls, was calculated and the current, necessary for isothermal regime of rolling process was found. It should be mentioned that the mathematical model showed good coincidence with experimental results.

Based on combined analysis of theoretical results and the facts obtaining during researching of damaged barrel, impact of thermal fatigue on durability of barrel was excluded and influence of the wear took the first place. Hence, to improve the wear resistance of the steel used for a barrel we have developed a technology of steel smelting process into high frequency induction furnace. Samples with 35 mm in diameter were sent in State Military Scientific-Technical Center Delta for conducting further investigations.