

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი ფოფხაძე

მექატრონიკული სისტემების ეფექტურობის ამაღლება „ინდუსტრია-4.0“-ის
რეფორმის უზრუნველყოფის მიზნით

სადოქტორო პროგრამა - მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგია

შიფრი - 0715

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის
ფინანსური მხარდაჭერით [PHDF-19-2224, “მექატრონიკული სისტემების
ეფექტურობის ამაღლება „ინდუსტრია-4.0“-ის რეფორმის უზრუნველყოფის
მიზნით”]

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში
სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტი
მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი რაულ თურმანიძე

რეცენზენტები: პროფესორი პაატა კერვალიშვილი

პროფესორი ზაურ ჩიტბე

დაცვა შედგება 2022 წლის ” ” , საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის
ინჟინერიის ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი I, აუდიტორია
მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოტეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი ასოც. ფროფ. ირინე უგრეხელიძე

ნაშრომის მოკლე დახასიათება

თემის აქტუალობა: დღეისათვის თითქმის ყველა ქვეყანაში ნებისმიერი მკვლევარი ცალსახად აღიარებს, რომ XXI საუკუნის დასაწყისში, მთელი მსოფლიო იმყოფება მეოთხე სამეცნიერო ტექნიკური რევოლუციის მიჯნაზე, რომელმაც ფუნდამენტურად უნდა შეცვალოს აზროვნების დონე და სტილი ანუ თვითოეული ადამიანის და განსაკუთრებით ახალგაზრდა თაობის ცხოვრების წესი მსოფლიოს ყველა ქვეყანაში. ეს განპირობებულია იმით, რომ მრავალი მეცნიერის და ფართოპროფილიანი კვლევითი ცენტრების თანამშრომელთა მტკიცებით კარსმოდგარი ცვლილება წარმოდგენილი შემოკლებული დასახელებით "ინდუსტრია-4.0" იქნება ერთ-ერთი ყველაზე მსხვილმასშტაბიანი რეფორმა კაცობრიობის ისტორიაში ჩატარებულ რეფორმებს შორის.

პირველი ინდუსტრიული რევოლუციის პერიოდში, რომელიც გრძელდებოდა თითქმის სამი საუკუნე, მრეწველობის სხვადასხვა ოპერაციების მექანიზაციისათვის გამოყენებული იყო მხოლოდ ორთქლის ძრავი ანუ წყალი და ორთქლი.

მეორე რევოლუციის შედეგად ელექტროენერჯის გამოყენების საფუძველზე შეიქმნა მრავალი ნაკეთობების მასიური წარმოებები სახალხო მეურნეობის სხვადასხვა მიმართულებებში.

მესამე რევოლუციის პერიოდში ელექტრონული და ინფორმაციული ტექნოლოგიების საშუალებით საწარმო პროცესები გახდა ავტომატიზირებული. დღეისათვის მესამე რევოლუციის შედეგების საფუძველზე ვითარდება მეოთხე ტექნიკური რევოლუცია, რომელიც ეფუძნება ციფრულ ტექნოლოგიებს. მათი შემუშავება დაიწყო ჯერ კიდევ წინა საუკუნის ბოლო წლებში და გულისხმობს თანამედროვე ტექნოლოგიების შერწყმას და

ფიზიკურ, ციფრულ და ბიოლოგიურ სფეროებს შორის ყოველგვარი საზღვრების გაქრობას ანუ კიბერ-ფიზიკური სისტემების შექმნას.

უკანასკნელი წლების საერთაშორისო კონფერენციებზე, მაღალრეიტინგულ ჟურნალებში, სამეცნიერო კრებულებში და სხვა საინფორმაციო საშუალებებში არსებობს ამ დარგის ცნობილი უცხოელი და ქართველი მეცნიერების უამრავი პუბლიკაცია მაგ: ი. კარაბეკოვიჩის, პ. დაშიჩის, ბ. კარპუშევსკის, ა. ბატაკოს, ი. კუზნეცოვის, გ. პოპოვის, რ. გიორგიევის, ვ. ივანოვის, ა. ზალოგას, ა. ტონკონოვის, ა. გრაბჩენკოს, პ. კერვალიშვილის, რ. თურმანიძის, დ. გუიდას, ა. ავდეენკოს და სხვა სპეციალისტების ნაშრომები, რომლებშიც გაანალიზებულია „ინდუსტრია-4.0“-ის პროგრამებით გათვალისწინებული საკითხების მრეწველობის სხვადასხვა მიმართულების თანამედროვე დარგების საწარმოებში დანერგვის შედეგად მიღებული ეფექტურობა, შედეგების სიღრმისეული ანალიზის საფუძველზე ჩამოყალიბებული თეორიული კანონზომიერების განზოგადოება სხვა ანალოგიური და მონათესავე პროფილის საწარმოებისათვის და მოსალოდნელი ეკონომიური ეფექტურობის წინასწარ გაანგარიშების ძირითადი პრინციპები.

სხვადასხვა მიმართულებით ჩატარებული ანალოგიური სამუშაოების შედეგების საფუძველზე ჩამოყალიბებულია „ინდუსტრია-4.0“-ის მიზნები და მოხაზულია ამ რეფორმების დამთავრების საბოლოო მიახლოებითი კონტურები.

მაგრამ სამწუხაროდ ვერცერთ ლიტერატურაში ან ინფორმაციაში თქვენ ვერ შეხვდებით მოკლე და ღრმად შინაარსიან კომპაქტურ განმარტებას, რომლის მცდელობაც გაკეთებულია ჩვენს მიერ, რომელიც დღემდე მუშაობს და ჯერჯერობით გაუმჯობესებული ვარიანტი არ გამოჩენილა, რომელიც გამოიყურება შემდეგნაირად:

“ინდუსტრია-4.0” რეფორმის საბოლოო მიზანია რთული საწარმოო-ტექნოლოგიური და ადმინისტრაციულ-ფინანსური ოპერაციების სრული ავტომატიზაცია და მათი დისტანციური მართვა სუპერთანამედროვე მექატრონული სისტემების მეშვეობით.

ცნობისათვის აქვე მინდა ავლნიშნო, რომ საინფორმაციო საშუალებებში უკვე გამოჩნდა მწირი მაგრამ ძალიან საინტერესო ინფორმაცია „ინდუსტრია-5.0“-ის წინაშე მდგარი საორიენტაციო ამოცანების შესახებ.

ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ამოცანის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ თუ „ინდუსტრია-4.0“-ში შემსრულებელი ელემენტები ბრძანებებს იღებენ უშუალოდ ადამიანისგან ან რთული პროგრამების მეშვეობით „ინდუსტრია-5.0“-ის შემთხვევაში მათი მართვა განხორციელდება ჭკვიანი რობოტების და სპეციალური სენსორების მეშვეობით ანუ ხელოვნური ინტელექტით.

უდავოა, რომ ასეთი ტიპის ამოცანებზე მუშაობა ნებისმიერი ქვეყნის მეცნიერებისა და განსაკუთრებით მომავალი თაობისთვის იქნება ძალზე საინტერესო და საპატიო.

წარმოდგენილ ნაშრომში მოყვანილია იმ ძირითადი სავარაუდო პრობლემების ანალიზის შედეგები, რომლებიც შეიძლება წარმოშვას "ინდუსტრია-4.0" რეფორმის განხორციელებისას. დადასტურებულია, რომ ამ რეფორმის განხორციელების ტემპი და ხარისხი ძირითადად განისაზღვრება გამოყენებული მექატრონული სისტემების ეფექტურობით.

ასევე დადგენილია, რომ რადიო-ელექტრონული მოწყობილობების, მიკროელექტრონული აპარატურისა და ტექნოლოგიური აღჭურვილობის სისტემატური მინიატურიზაციის შედეგად, ამ რეფორმების მთავარი პრობლემაა კომპლექსური ტექნოლოგიური პროცესების განხორციელების ინსტრუმენტალური უზრუნველყოფა, განსაკუთრებით მჭრელი მიკრო იარაღებით. ამიტომაც ამ მიკრო ინსტრუმენტების მაგალითზე ნაჩვენებია

რადიოელექტრონული აპარატურის საექსპლუატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესების ძირითადი გზები და მეთოდები.

პირველი სამი რევოლუციის შედეგები იყო საერთო და გამოყენებული იქნა თითქმის ყველა ქვეყანაში, ყველა საწარმოში და პრაქტიკულად თითოეული ადამიანის მიერ. მაგრამ, მეოთხე რევოლუციის განვითარების პროცესი და შედეგების პრაქტიკაში გამოყენების ხარისხი მის სხვადასხვა ეტაპებზე იქონიებს თავისებურ ხასიათს მრეწველობის სხვადასხვა დარგებისათვის. საბოლოოდ ძირითადი პრინციპები იქნება საერთო, მაგრამ, რადგანაც საწარმოების თითოეულ კონკრეტულ მიმართულებას აქვს თავისი სპეციფიკური თანამედროვე, მრავალპროფილიანი და მრავალი პარამეტრის მქონე ტექნოლოგიები მათი პროექტირებისა და მართვისათვის აუცილებელია სპეციალური ცოდნა და ინდივიდუალური მიდგომა.

ზემოთ ჩამოთვლილი ისეთი დონის მექატრონული სისტემების შექმნა, რომელიც განსაზღვრავს ინდუსტრია ოთხის რეფორმის ტემპს და მიღწეულ დონეს სხვადასხვა პროფილის საწარმოებში საჭიროებს მაღალი სიზუსტის მქონე დანადგარებს და სპეციალური დანიშნულების სხვადასხვა კონსტრუქციის მიკროინსტრუმენტებს.

უდავოა, რომ ასეთი საექსპლუატაციო მახასიათებლების მქონე მოწყობილობებისა და მიკროინსტრუმენტების შექმნა წარმოადგენს თანამედროვე პრეციზიული მანქანათმშენებლობის ერთ-ერთ ყვლაზე აქტუალურ ამოცანას.

კვლევის მიზანი: მექატრონული სისტემების და მათი საპასუხისმგებლო მოდულების საექსპლუატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესება განსაკუთრებით მინიატურიზაციის ეტაპებით ან სხვა მოთხოვნებით ახალ ტექნოლოგიებზე გადასვლის ექსტრემალურ პირობებში.

კვლევის მეთოდოლოგია და ამოცანები: მჭრელ იარაღებზე ჩატარებული მრავალმხრივი ექსპერიმენტებისა და კვლევების შედეგად დადგენილია, რომ იარაღების ჭრისუნარიანობის და მედეგობის საგრძნობი გაზრდა რაიმე აუცილებელი მიზეზით და მათ შორის მინიატურიზაციის ყოველი შემდგომი ეტაპის განსახორციელებლად შესაძლებელია რამოდენიმე გზით:

1. ახალი საიარაღო მასალების შექმნით;
2. მჭრელი იარაღის გეომეტრიული პარამეტრების ოპტიმიზაციით;
3. მჭრელი იარაღების დამზადების ტექნოლოგიური პროცესის გაუმჯობესებით;
4. მათი ექსპლუატაციის კიდევ უფრო ეფექტური პირობების შექმნით.

იდეალური ვარიანტია თუ ხდება რამოდენიმე ან ყველა პუნქტის ერთდროულად განხორციელება.

მათი აქტუალობიდან გამომდინარე საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ჯერ კიდევ ორი ათეული წლის წინ დაიწყო მოსამზადებელი სამუშაოები და განხორციელებულ იქნა ყველა ძირითადი მიკროინსტრუმენტების კლასიფიკაცია, რომელიც გამოიყენებოდა მიკროელექტრონიკისა და მიკროელექტრონული ტექნოლოგიის საწარმოებში. დადგინდა, რომ ისინი იყოფიან სამ ძირითად ჯგუფად: მჭრელი, სამონტაჟო და საამწყობო. თითოეულ ჯგუფში შედის ინსტრუმენტების ქვეჯგუფები მათი გამოყენების კონკრეტული მიმართულების ტიპებისა და ზომების მიხედვით.

დაიწყო თითოეულ ჯგუფსა და ქვეჯგუფებში შემავალი ინსტრუმენტების საექსპლუატაციო მახასიათებლების გაუმჯობესება, ახალი უფრო ეფექტური კონსტრუქციების შექმნა და მათი დამზადების ეფექტური ტექნოლოგიების შემუშავება, რომლებიც დაწვრილებით არის ნაჩვენები სადისერტაციო ნაშრომში.

ყველა ეს ინსტრუმენტი გამოიყენება ძალიან დიდი რაოდენობით, რადგან თანამედროვე ტექნიკის და ტექნოლოგიების მნიშვნელოვანი ნაწილი, დაწყებული საყოფაცხოვრებო და დამთავრებული კოსმოსური აპარატურით, არის ჰიდრო და პნევმო აპარატურების, მიკროელექტრონული მართვის ბლოკების და მექანიკური კვანძების ერთობლიობა, რაც წარმოადგენს თავისთავად რთულ მექატრონულ სისტემას. მათ დასამზადებლად საჭიროა განხორციელდეს სხვადასხვა პროფილის მრავალი ტექნოლოგიური ოპერაცია, რაც წარმოუდგენელია სათანადო ინსტრუმენტალური უზრუნველყოფის გარეშე.

აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ რადიოელექტრონული ხელსაწყოების საექსპლუატაციო ფუნქციების ინტენსიურად ზრდისა და მათი გაბარიტული ზომების უწყვეტად მინიატურიზაციის გამო გასული საუკუნის ბოლო წლებში ნაბეჭდი პლატებისა და სხვა პრეციზიული დეტალების ბურღვისათვის ძირითადი მოთხოვნა იყო სპირალურ ბურღებზე, რომელთა მუშა ნაწილის დიამეტრი იცვლებოდა დიაპაზონში 0,8-1 მმ. 2000-2010 წლებში მოთხოვნილი ბურღების მუშა დიამეტრი მონოტონურად შემცირდა 0,5 მმ-დე. 2017 წლის საერთაშორისო გამოფენებზე გამოჩნდა უკვე მოთხოვნები სპეციალური დანიშნულების მიკროელექტრონული ხელსაწყოებისთვის საჭირო პლატების დასამზადებლად დიამეტრით 0,2-0,5 მმ. ხოლო მიმდინარე წლის მოთხოვნებში გამოჩნდა ციფრები 0,1-0,15 მმ. ადვილი წარმოსადგენია რა მოხდება მომდევნო თუნდაც უახლოეს წლებში.

ნაბეჭდ ფილებზე ნახვრეტების მისაღებად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდები, მაგრამ პრაქტიკამ აჩვენა, რომ ყველაზე მისაღები მეთოდი, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც მრავალფენიანი პლატების დამუშავება ხდება ნახვრეტების ზედაპირების შემდგომი მეტალიზაციით, დღევანდელ დღემდე შეუცვლელია სალი შენადნობების ბურღებით.

ამ დარგის სპეციალისტებისათვის კარგად არის ცნობილი, რომ სალი შენადნობის ბურღების მუშა დიამეტრის ასეთი ტემპით შემცირება მოითხოვს შესაბამისად, როგორც საიარალო მასალების სალი შენადნობის ფიზიკურ-მექანიკური და სხვა თავისებების სისტემატურად გაუმჯობესებას, ასევე მათგან შემცირებული დიამეტრის ინსტრუმენტების-ბურღების, ფრეზების, კომბინირებული და სხვადასხვა სპეციალური ინსტრუმენტების დამზადების ტექნოლოგიური პროცესების შესაბამისად მუდმივ განახლებას და სრულიად ახალი მახასიათებლების მქონე ტექნოლოგიური აღჭურვილობის პროექტირებას და დამზადებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში შეუძლებელი გახდება ისეთი პარამეტრების მქონე მექატრონული სისტემებისა და სხვა ელექტრონული მოწყობილობების თუ ცალკეული კვანძებისა და დეტალების დამზადება, რომელიც აუცილებელია „ინდუსტრია-4“-ის გამოწვევის ფონზე ტექნიკის განვითარების წინაშე მდგარი პრობლემების წარმატებით გადაწყვეტისათვის.

ამჟამადაც, გრძელდება ლაბორატორიაში სამუშაოები სხვადასხვა მიმართულებით და ერთ-ერთი სამეცნიერო მიმართულებაა ახალი კონსტრუქციის ცვალებადი ასვლის კუთხის (ა) მქონე სპირალურღარიანი ბურღების კონსტრუქციის და დამზადების ტექნოლოგიის სისტემატური გაუმჯობესება. ასეთი კონსტრუქციის ბურღები საშუალებას გვაძლევს თანდათან შევამციროთ ბურღის მუშა ნაწილის დიამეტრი, რადგანაც ბურღის წვერთან (ა) კუთხეს ექნება ისეთი მნიშვნელობა, რომელიც გააუმჯობესებს ჭრის პირობებს და ამ ზონიდან ბურბუშელის გამოტანის პროცესებს, ხოლო შემდეგ (ა) კუთხის მნიშვნელობა თანდათან შეიცვლება და სპირალური ღარის ბოლოს, ანუ ბურღების გატეხვის ადგილზე მიიღებს ისეთ მნიშვნელობას, რაც უზრუნველყოფს ბურღის მაქსიმალურ სიმტკიცეს დამუშავების ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში.

მიღებულია პატენტი ბურღის ასეთ კონსტრუქციაზე და აგრეთვე ცვალებადბიჯიანი სპირალური ღარის მქონე ინსტრუმენტების დასამზადებელ სამარჯვებზე, რომლის თანაავტორი მეც გახლავართ.

შექმნილია სპეციალური, მრავალჯერ გაუმჯობესებული კონსტრუქციის სამარჯვი ასეთი ტიპის სპირალური ღარების მისაღებად. შექმნილია აგრეთვე მიკროინსტრუმენტებით მუშაობის დროს ღერძული ძალების და მგრეხავი მომენტების გამზომი სპეციალური პრეციზიული დინამომეტრები, რომელთა საშუალებითაც ჩატარდა ექსპერიმენტები დამზადებული ბურღების სხვადასხვა პარტიებზე ერთმანეთთან და სტანდარტულ ბურღებთან შესადარებლად.

მინიატურიზაციის ყოველი ეტაპის განხორციელების შემდეგ ყველა ეს სამუშაო ტარდება თავიდან უფრო რთულ პირობებში. ამ სამუშაოებში აქტიურად მონაწილეობენ ლაბორატორიის სხვა თანამშრომლებიც, დოქტორანტები და მაგისტრანტები.

მეცნიერული სიახლე: „ინდუსტრია-4.0“ რეფორმებით გათვალისწინებული პროგრამების მიზნების მრავალმხრივი კვლევისა და შედეგების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ ახალი ტექნოლოგიების განხორციელების ტემპებს და მიღწეული შედეგების დონეს, სხვა ბევრ მნიშვნელოვან საკითხებთან ერთად, მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავენ გამოყენებული მექატრონული სისტემების და მათი ცალკეული განსაკუთრებულად საპასუხისმგებლო მოდულების საექსპლუატაციო მახასიათებლები.

ამავე დროს შემუშავებულია აღნიშნული მახასიათებლების გაუმჯობესების გზები განსაკუთრებით იმ პერიოდებში, როდესაც აუცილებელია მინიატურიზაციის ყოველი შემდგომი ეტაპის განხორციელება და ამ პროცესების მომყოლი პრობლემების გადაწყვეტა სათანადო მიკროინსტრუმენტებისა და ტექნოლოგიური აღჭურვილობის შექმნით.

პრაქტიკული შედეგები და მათი გამოყენების სფეროები: ჩატარებული თეორიული კვლევების საფუძველზე დეპარტამენტის ლაბორატორიებში დაპროექტებული და დამზადებული სხვადასხვა დანიშნულების მიკროიარაღები გამოყენებულია სხვადასხვა დროს, როგორც თბილისის, ასე სხვადასხვა ქვეყნების: მაგალითად უკრაინის, რუსეთის, ბელორუსის და სომხეთის სხვადასხვა საწარმოებში და ქარხნებში, რადიოელექტრონული ხელსაწყოების, საავიაციო ტექნიკის, საიუველირო ნაკეთობების და სხვა პროდუქციის წარმოებისათვის.

სისტემატურად მიმდინარეობს ტექნიკური საშუალებების განახლება, არსებულის მოდერნიზაცია ან ახალი ტექნოლოგიური აღჭურვილობის ადგილზე შექმნა.

ამჟამადაც შემოტანილია უცხოელი კოლეგების მიერ საჩუქრად გადმოცემული პროგრამული მართვის და უნივერსალური დანიშნულების ცხრა ჩარხი, რომლებიც უახლოეს პერიოდში დამონტაჟდება და ლაბორატორიის შესაძლებლობები კიდევ უფრო გაიზრდება. მაგრამ, სამწუხაროდ უნდა აღინიშნოს, რომ დეპარტამენტის ლაბორატორიებში არსებული მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა, ჩვენთვის ხელმისაწვდომი სალი შენადნობების ნამზადების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები და ტექნოლოგიური აღჭურვილობა საშუალებას იძლევა დამზადებული სალი შენადნობის ბურღების მუშა ნაწილის დიამეტრი შემცირდეს 0.2-0.3 მმ-მდე, მაგრამ დღეისათვის უკვე მოსალოდნელია მოთხოვნილება 0.1 მმ და კიდევ უფრო ნაკლები დიამეტრის ბურღებზე. ამიტომ დეპარტამენტის და უნივერსიტეტის ხელმძღვანელობა უკვე დგამს გარკვეულ ნაბიჯებს და მიმდინარეობს მოლაპარაკებები საქართველოში რამოდენიმე საწარმოსგან შემდგარი კონგლომერატის შექმნაზე, სადაც ერთ-ერთი საწარმო იქნება სწორედ აღნიშნული მიმართულების, კერძოდ: „პრეციზიული სამანქანათმშენებლო ნაკეთობების, ტექნოლოგიური

აღჭურვილობების და მექატრონული სისტემების მოდულების პროექტირება და წარმოება“.

ამ პროექტის განხორციელების შემთხვევაში ტექნიკური უნივერსიტეტის რამოდენიმე პროგრამის და პირველ რიგში „მექანიკის ინჟინერიის და საწარმოო ტექნოლოგიის“ სხვადასხვა საფეხურის სტუდენტებს და ახალგაზრდა მეცნიერებს ექნებათ შესანიშნავი ბაზა, როგორც სასწავლო პროცესის ასევე სამეცნიერო საქმიანობის მიმართულებით საინტერესო სამუშაოების შესასრულებლად

სამუშაოს აპრობაცია: შესრულებული სამუშაოს ცალკეული შედეგები მოხსენებულია როგორც საქართველოში, ასევე სხვა ქვეყნებში ჩატარებული მაღალი დონის საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებზე და სემინარებზე ბოლო ხუთ წელიწადში: ინგლისში, იტალიაში, საბერძნეთში, პორტუგალიაში, სერბეთში, ბულგარეთში, ბოსნია-ჰერცეგოვინაში, რუმინეთში, უკრაინაში.

გამოქვეყნებულია აგრეთვე ა.შ.შ.-ის და ამავე ქვეყნების მაღალრეიტინგულ ჟურნალებსა და სამეცნიერო კრებულებში, რომლებიც მითითებულია კონკრეტულად გამოქვეყნებული ლიტერატურის ჩამონათვალში.

ბევრი მათგანი დაჯილდოვებულია სპეციალური დიპლომებით და სერთიფიკატებით, რომელთა ასლები განთავსებულია სადისერტაციო ნაშრომის დანართში.

სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 3 თავისა და დასკვნებისაგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 133 გვერდზე, მოიცავს 13 სურათს, 21 ცხრილს, 19 გრაფიკს, 122 დასახელების გამოყენებულ ლიტერატურას და 2 დანართს 26 გვერდზე.

დისერტაციის შედეგები

პირველ თავში ლიტერატურის მიმოხილვა შესულია არსებული ლიტერატურის ანალიზი იმის შესახებ თუ როგორ მოხდა კაცობრიობის არსებობის 20 საუკუნის მანძილზე სამეცნიერო-ტექნიკური პროგრესის ძირითად ეტაპებად დაყოფა.

2005 წელს შეიკრიბნენ მსოფლიოს მსხვილი სამეცნიერო ცენტრების ხელმძღვანელები, ცნობილი უნივერსიტეტების რექტორები და ტექნიკის სხვადასხვა დარგის დამსახურებული მეცნიერები. მიიღეს გადაწყვეტილება, რომ შექმნილიყო სპეციალური კომისია, რომელსაც დაევალებოდა წარმოდგინა წინადადება თუ რამდენ ძირითად ეტაპად შეიძლება დაყოფილიყო განვითარების მთელი აღნიშნული პერიოდი, რომელიც მოიცავდა განვითარების თითქმის ყველა მნიშვნელოვან ეტაპს და ამავე დროს თითოეულ ეტაპს უნდა მინიჭებოდა თავისი სახელი, თუ რა მნიშვნელოვანი ნაბიჯი გადაიდგა იმ პერიოდში.

განხორციელდა კომისიის ძალიან ბევრი სხდომა, სადაც წარმოდგენილი იქნა რამოდენიმე ახალ-ახალი ვარიანტი რომელთა განხილვაც ტარდებოდა დამაბული მძაფრი კამათის პირობებში. ამ საკითხის გადაწყვეტას და საბოლოო ვარიანტის დადგენას დასჭირდა თითქმის 5 წელი. ოპტიმალურ ვარიანტად ჩაითვალა მთელი პერიოდის დაყოფა ოთხ ეტაპად, ანუ განვლილ პერიოდში განხორციელებული და დასრულებული იყო სამი სამეცნიერო-ტექნიკური რევოლუცია და ამჟამად ვიმყოფებით მეოთხე სამეცნიერო-ტექნიკური რევოლუციის დაწყებით ეტაპზე, რომელსაც შემოკლებულად დაერქვა „ინდუსტრია-4.0“

რომელ ეტაპზე რა ძირითადი სამეცნიერო-ტექნიკური საკითხები გადაწყდა და რა საკითხების გადაწყვეტაა ნავარაუდები ამჟამად დაწყებული „ინდუსტრია-4.0“-ის პერიოდში, მოკლედ განხილულია თემის აქტუალობის ნაწილში. დაწვრილებითი ინფორმაცია თითოეული დასრულებული სამი ეტაპის შესახებ

განხორციელების პერიოდების ჩვენებით მოცემულია სადისერტაციო ნაშრომში. დაწვრილებით არის აღწერილი მიმდინარე „ინდუსტრია-4.0“-ის რეფორმების ფარგლებში ჩასატარებელი სამუშაოების ჩამონათვალი და მათი როლი თითოეული ქვეყნის განვითარების დაჩქარების საქმეში. აქვეა ნაჩვენები, ჩვენს მიერ ჩამოყალიბებული მისი მოკლე განმარტება, რომელშიც მკაფიოდ ჩანს ინდუსტრია-4.0 რეფორმების მიზანი და რამდენად მნიშვნელოვანი თეორიული და პრაქტიკული საკითხების გადაწყვეტაა ჩაფიქრებული და ნებისმიერი მკითხველისათვის ნათელი გახდება რამდენად მნიშვნელოვანი ნახტომისებური განვითარება ხორციელდება მსოფლიოში და ყველა იმ ქვეყანაში, რომელიც აქტიურად იქნება ჩართული აღნიშნული რეფორმების განხორციელების საქმეში. აღნიშნული განმარტება ჟღერს შემდეგნაირად:

“ინდუსტრია-4.0” რეფორმის საბოლოო მიზანია რთული საწარმო-ტექნოლოგიური და ადმინისტრაციულ-ფინანსური ოპერაციების სრული ავტომატიზაცია და მათი დისტანციური მართვა სუპერთანამედროვე მექატრონული სისტემების მეშვეობით.

განმარტებიდან კარგად ჩანს რამდენად მნიშვნელოვანი იქნება აღნიშნულ თანამედროვე ტექნოლოგიებში ჩართვა ნებისმიერი პიროვნებისათვის და განსაკუთრებით ახალგაზრდა თაობის იმ წარმომადგენლებისათვის, რომლებსაც საბაზისო განათლება და პროფესიული უნარები მისცემენ ამის საშუალებას.

აღსანიშნავია კიდევ ერთი გარემოება. იმისათვის, რომ ამა თუ იმ ქვეყანაში წარმატებით დაინერგოს „ინდუსტრია-4.0“-ის რეფორმებით გათვალისწინებული ტექნოლოგიები, აუცილებელია, როგორც მოსახლეობა ასევე საწარმოების დიდი ნაწილი სრულ მზადყოფნაში იყვნენ აღნიშნული ტექნოლოგიების დანერგვასა და მათ მომსახურებისათვის.

მეორე თავში გაანალიზებულია იმ მეთოდოლოგიის ძირითადი პრინციპები, რომლითაც ევროგაერთიანების სპეციალური კომისია პერიოდულად აფასებს ევროპის თითქმის ყველა ქვეყანაში, როგორც მოსახლეობის, ასევე ძირითადი საწარმოების მომზადების დონეს, რათა უპრობლემოდ განახორციელოს თანამედროვე ტექნოლოგიების ფართოდ დანერგვა და მათი ეფექტური მომსახურება.

სადისერტაციო ნაშრომში დაწვრილებით არის ნაჩვენები ამ უახლესი კვლევების მეთოდოლოგიის ძირითადი პრინციპები, რომლებიც ყოველწლიურად იხვეწება, იზრდება სიტუაციების შეფასების კრიტერიუმების რაოდენობა, რითაც მუდმივად ზუსტდება სხვადასხვა ქვეყნებში საინფორმაციო ტექნოლოგიების დანერგვის ტემპები, ფასდება საწარმოებში, ორგანიზაციებსა და ხელმძღვანელ ორგანოებში გამოყენებული ელექტრონული მმართველობის გამოყენების დონე და ა.შ.

დღეისათვის, უკვე თერთმეტამდე გაიზარდა ამ კოეფიციენტებისა და პარამეტრების რაოდენობა და მომავალში ალბათ კიდევ უფრო გაიზრდება. ამავე თავში ნაჩვენებია რომელი პარამეტრებია უფრო მნიშვნელოვანი და მინიმალურად საკმარისი ამა თუ იმ ორგანიზაციაში შესასწავლი საკითხის სწრაფი შეფასებისათვის.

სამუშაოში დაწვრილებით არის აღწერილი ჩვენი ქვეყნის ბოლო 8-10 წლის სტატისტიკური მონაცემები, რომლებიც აღებულია ევროკომისიის კვლევებიდან და ჩვენს მიერ ჩატარებულია სტატისტიკური ანალიზი წლების მიხედვით. ამის საფუძველზე შექმნილია საუკეთესო გრაფიკული მასალა და გაკეთებულია სათანადო დასკვნები. აქვე მოვიყვანთ ჩვენთვის ძალიან მნიშვნელოვან დასკვნას, რომ საქართველო ბოლო წლების განმავლობაში მყარად იკავებს საპატიო ადგილს პირველ ათეულში 200-მდე ქვეყანას შორის. ეს ნიშნავს, რომ საქართველოში ახალგაზრდა თაობა და ძირითადი მოქმედი

საწარმოები პრაქტიკულად მომზადებულია "ინდუსტრია-4.0"-ის პროგრამებით გათვალისწინებული რეფორმების ჩასატარებლად, რაც თავის მხრივ საგრძნობლად შეუწყობს ხელს აღნიშნული მიმართულებით ქვეყნის კიდევ უფრო განვითარებისათვის საჭირო შეღავათიანი კრედიტების და გრანტების მოპოვების პროცესებს.

ამავე თავში მოყვანილია ანალიზი იმ მიზეზებისა, რომლებიც განსაზღვრავენ თუ რამდენად მნიშვნელოვანია ნებისმიერი ქვეყნისათვის „ინდუსტრია-4.0“-ის პროგრამებით გათვალისწინებული ტექნოლოგიების დროულად ათვისება. სათანადო მაგალითების მოყვანით მტკიცდება, რომ თუ რომელიმე ქვეყანაში უკვე დანერგილია აღნიშნული ახალი ტექნოლოგიები ბევრ სხვა უპირატესობებთან ერთად, ასეთი ქვეყნები გაცილებით უფრო მარტივად უმკლავდებიან ნებისმიერი პანდემიით გამკაცრებულ რეგულაციებს. საქმე იმაშია, რომ „ინდუსტრია-4.0“-ის პროგრამებით დანერგილი ტექნოლოგიები საგრძნობლად აუმჯობესებენ კომუნიკაციებს პიროვნებებსა და კოლექტივებს შორის ონლაინის მეშვეობით. საწარმოების მუშაკთა დიდი ნაწილი მუშაობს სახლში და შესრულებული სამუშაოს მასალებს აწვდის ხელმძღვანელობას, სატრანსპორტო და სასაწყობო სამსახურების ავტომატიზაცია ამცირებს მომსახურე პერსონალის რაოდენობას, რობოტების და ავტომატური ხაზების ფართოდ დანერგვა და კიდევ ბევრი სხვა ღონისძიებები საგრძნობლად ამცირებს ინფექციის გავრცელების ტემპს და შესაბამისად დაავადებულ თანამშრომელთა რაოდენობას და ა.შ.

სადისერტაციო ნაშრომში მოყვანილი კიდევ სხვა ბევრი მაგალითები ნათლად მეტყველებენ თანამედროვე ტექნოლოგიების ფართოდ დანერგვასა და მათი ეფექტურობის კიდევ უფრო გაზრდაზე.

ამ საკითხების განხორციელებას ემსახურება სამუშაოს შემდგომ ძირითად ნაწილში ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები და მათ საფუძველზე ჩამოყალიბებული დასკვნები და რეკომენდაციები.

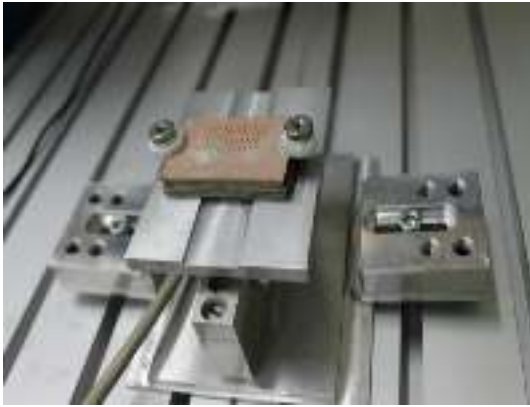
მესამე თავში მოცემულია სამუშაოს შედეგები და მათი განსჯა, სადაც აღწერილია მიკრობურლების დამზადების თავისებურებები და გაანალიზებულია განახლებულ მოწყობილობებზე მათი დამზადების ცალკეული ოპერაციები და მათი გამოცდის ძირითადი შედეგები.

კვლევები დაიწყო პროცესის ძალოვანი მაჩვენებლების პარამეტრების ცვლილების შესწავლით - მგრეხავი მომენტი და ღერძული ძალა, რაც დამოკიდებულია ბურღვის სიღრმეზე და ჭრის რეჟიმზე მინაბოჭკოსგან დამზადებულ ნაბეჭდ ფილებზე ნეხვრეტების მიღებისას.

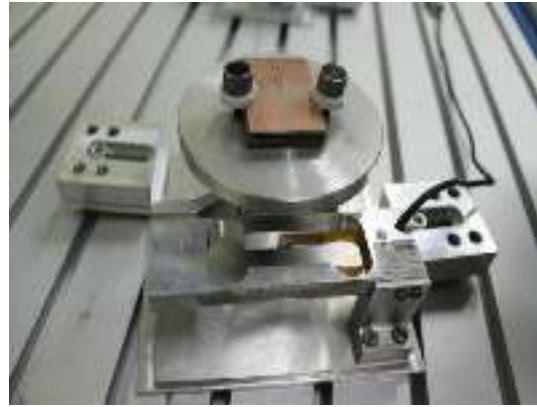
ღერძული ძალის შესაფასებლად, დამზადდა მოწყობილობა ცნობილი მეთოდებისა და არსებული ანალოგების საფუძველზე, საზომი ელემენტით, რომელიც ტენზომეტრული სისტემაა დამაგრებული კორპუსის დრეკად ელემენტებზე.

რაც შეეხება მგრეხი მომენტის გაზომვას, ჩვენ შემთხვევაში არსებული ირიბი მეთოდის გამოყენება, რომელიც დაფუძნებულია ჭრის პროცესის სიმძლავრის გაზომვაზე, გაუმართლებელია, ვინაიდან ბურღვისას სიმძლავრის მაჩვენებლები იმდენად დაბალია, რომ მათი დაფიქსირება დღეს არსებული სტანდარტული აპარატურით პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამდენად გამოყენებულ უნდა იქნას მეთოდი, რომელიც მოგვცემს საშუალებას გაიზომოს უშუალოდ მგრეხავი მომენტი ამასთანავე მაღალი სიზუსტით. ამ მიზნით ჩვენს მიერ დაპროექტებული და დამზადებულია სპეციალური მოწყობილობა, სადაც ნამზადების მაგიდა დამაგრებულია ვერტიკალურ ღერძზე კუთხური მობრუნების შესაძლებლობით. თავის მხრივ მაგიდის ღერძი აღჭურვულია ღარით, რომლის სიბრტყე გადის ღერძის სიმეტრიულად და განსაზღვრული

მხრით მოქმედებს დრეკად გამზომ ელემენტზე. გამზომ ელემენტად აქ გამოიყენება დრეკად მაგიდაზე დამაგრებული ტენზომომენტული მალალი გამზომი სიზუსტით.(მგრძნობელობა 0.1 გრამი) (სურ. 1-2)



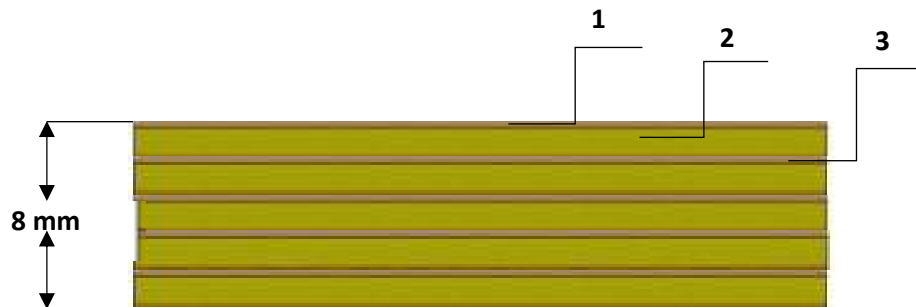
ნახ.1. დრეკული ძალის გამზომი მოწყობილობა.



ნახ.2. მგრეხი მომენტის გამზომი მოწყობილობა

ექსპერიმენტები ჩატარდა BK60M მარკის სალი შენადნობის ბურღებით 0,9 მმ დიამეტრის, მუშა ნაწილით 10 მმ. წინა კუთხე და შესაბამისად, სპირალური ღარის დახრის კუთხე არის 30° და უკანა კუთხის 17°.

განხორციელდა ბურღვა 1.6 მმ სისქის მქონე მინაბოჭკოსგან შემდგარ ნაბეჭდ ფილებზე, რომელიც შედგებოდა 8 მმ სისქის 5 ფირფიტისგან (ნახ. 3) ექსპერიმენტები ხორციელდებოდა გერმანული წარმოების პროგრამული მართვის ჩარხზე AL 640 (ნახ. 4)

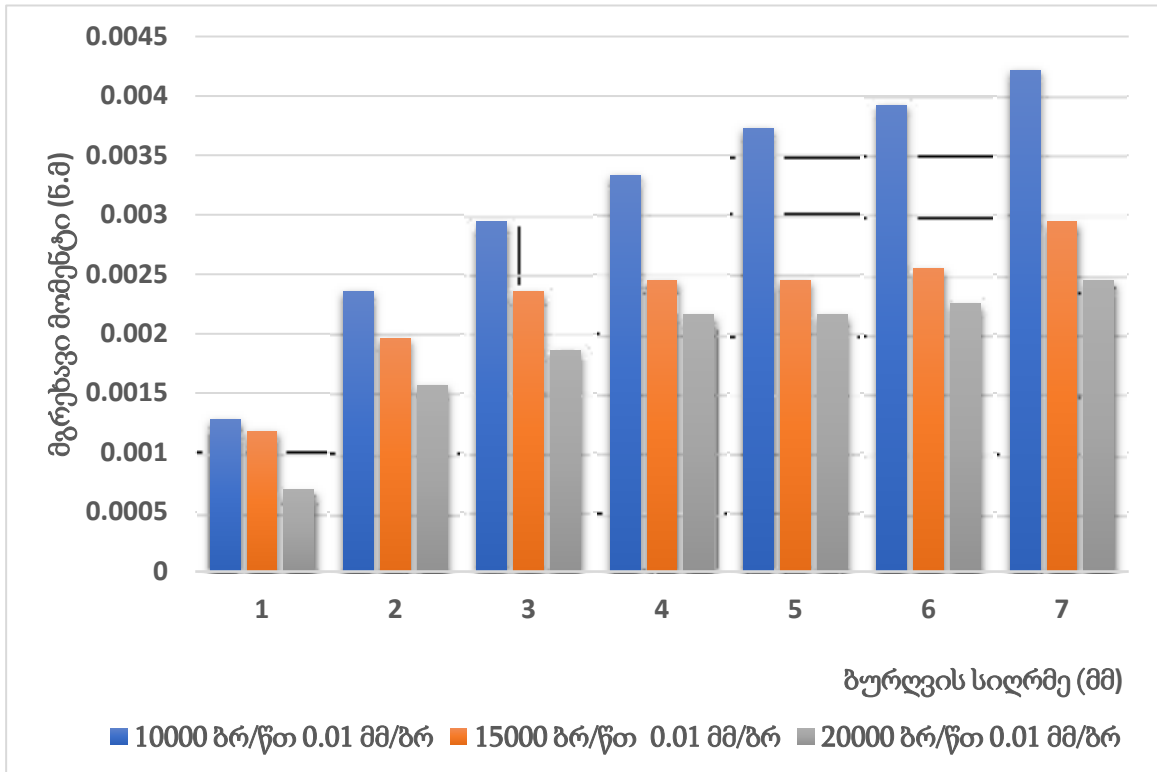


ნახ.3. 5 ფირფიტისგან შემდგარი ნაბეჭდი ფილების სქემა 1-სპილენძის ფირფიტა, 2- მინაბოჭკო, 3- სპილენძის ფირფიტის ორმაგი ფენა.

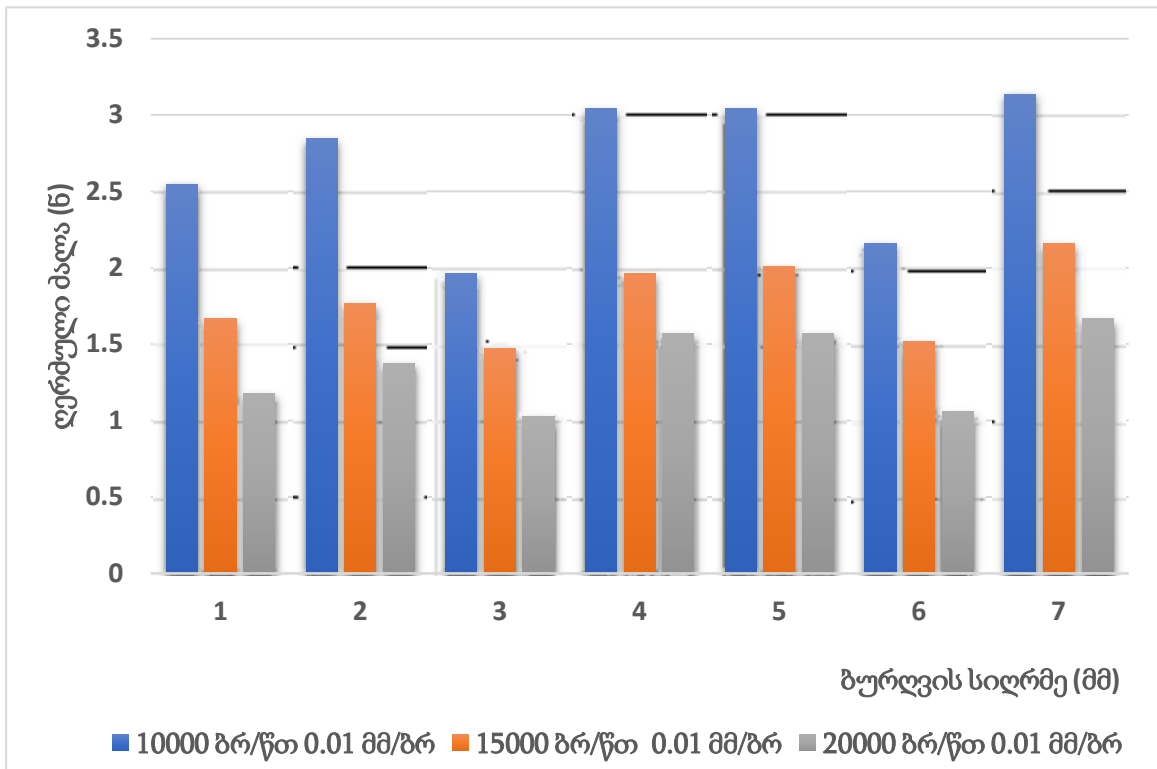


ნახ. 4. პლატების საბურღი სპეციალური გერმანული წარმოების პროგრამული მართვის ჩარხი მოდ. AL640

საბურღი სამუშაოები განხორციელდა სხვადასხვა ჭრის რეჟიმებზე და ყოველი 1 მმ სიღრმეზე ფიქსირდებოდა საზომ მოწყობილობებზე. ექსპერიმენტების შედეგები ნაჩვენებია. 5 და 6. ნახაზზე



ნახ. 5. მგრები მომენტის ცვალებადობის გრაფიკი სტანდარტული ბურღებისთვის



ნახ.6. ღერძული ძალის ცვალებადობის გრაფიკი სტანდარტული ბურღებისთვის

ამ შედეგებისგან ნათლად ჩანს, რომ, როგორც მოსალოდნელი იყო, ჭრის პროცესის ზემოქმედების ძალა თანდათანობით იზრდება სიღრმის გაზრდისას. ამ შემთხვევაში, თუ ღერძული ძალა იზრდება დაახლოებით 1.5-ჯერ, მგრეხავი მომენტის მაჩვენებელი იზრდება 3-4 ჯერ.

ძალის ასეთი მაჩვენებლის ზრდა განპირობებულია იმით, რომ ბურღის წიბო ბურღვისას სიღრმის მატებასთან ერთად არ იცვლება, ერთადერი მიზეზი ამისა შეიძლება იყოს დამუშავებული ნახვრეტის ზედაპირთან მტვრისებური ბურბუშელის ფართობის ზრდა და ამის შედეგად გაზრდილი ხახუნის ძალა.

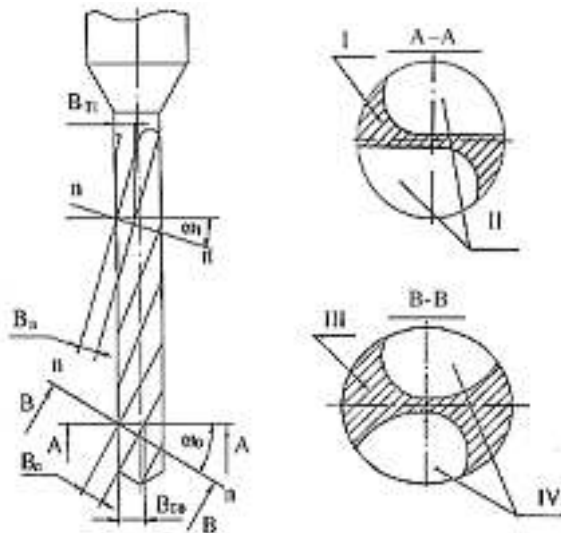
აღსანიშნავია, რომ ღერძული ძალის მკვეთრი ვარდნა 2-3 და 5-6 სიღრმის უბნებზე განპირობებულია სპილენძის ფენის ამ უბნებზე არ არსებობით (ნახ. 6)

მჭრელი ინსტრუმენტის მყიფე რღვევის შესაძლებლობის ზრდის მთავარი ფაქტორი ამ ორი სიმძლავრის მაჩვენებლიდან შეიძლება იყოს არა ღერძული ძალის ზრდა არამედ მგრეხავი მომენტის პროგრესული ზრდა, იმის გამო, რომ სალი შენადნობის მასალის მაჩვენებლები კუმშვაზე გაცილებით მეტია ვიდრე გრეხვაზე.

ჭრის ზონიდან ბურბუშელას გამოტანის პროცესის აჩქარება დაეხმარებოდა ხახუნის ძალის შემცირებას და შესაბამისად ბურღვის პროცესის საიმედოობის გაზრდას. ღრმა ნახვრეტების ბურღვისას ბურბუშელას ამოღების პრობლემას წყვეტენ სახვადასხვა გზებით. მაგ: მსხვილი ზომის ბურღებით ბურღვა ხდება გამორეცხვის მეთოდით საცხებ გამაგრილებელი სითხის მეშვეობით, რომელიც შეყავთ ნახვრეტში ბურღის სხეულში არსებული არხებით. სხვა შემთხვევაში, როდესაც ბურღების ზომა არ იძლევა შესაძლებლობას ზემოთაღნიშნული მეთოდით გამაციებელი სითხის მიწოდებისა, ბურბუშელას მოცილების მიზნით იყენებენ წყვეტილი ბურღვის მეთოდს, რომლის დროსაც გარკვეული სიღრმის გაბურღვის შემდგომ პერიოდულად ხდება ბურღის მოცილება ნახვრეტიდან სწრაფად.

ამ მეთოდების გამოყენება ჩვენს შემთხვევაში მიუღებელია ვინაიდან საქმე გვაქვს მიკრობურლებთან და საცხებ-გამაგრილებელი სითხეების გამოყენება ნაბეჭდი ფილების წარმოებაში დაუშვებელია. არამიზანშეწონილია წყვეტილი ბურღვის მეთოდიც, რადგანაც ამან შეიძლება მიგვიყვანოს წარმოების ძლიერ დაცემამდე. მიკრობურლებით ღრმა ნახვრეტების დამუშავებისას ბურბუშელის მოცილების ამაჩქარებელი ფაქტორი შეიძლება გახდეს ბურღის სპირალური ღარის ბიჯის გაზრდა, ანუ დახრის კუთხის შემცირება. ბურღის წინა კუთხის შემცირებამ შეიძლება მიგვიყვანოს ჭრის პირობების გაუარესებამდე. თუ ბურღის კონსტრუქციას შევასრულებთ იმგვარად, რომ წვერთან შევინარჩუნებთ ჭრის პროცესისათვის მაქსიმალურად ეფექტურ წინა კუთხეს და შესაბამისად ა კუთხეს, ხოლო სპირალური ღარის ბოლოსკენ თანდათან შევამცირებთ მის მნიშვნელობას, მივიღებთ ბურღს სპირალურ ღარის ცვალებადი დახრის კუთხით, რაც უზრუნველყოფს ბურბუშელის მოცილების პროცესის აჩქარებას და ამავე როს ბურღვის პირობების გაუმჯობესებას. 7-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ბურღის სპირალური ღარის ცვალებადი დახრის კუთხის სქემა, სადაც ღარის დახრის კუთხე ბურღის წვერთან α_0 , ხოლო მუშა ნაწილის ბოლოს α_1 . ღარის სიგანე ღარის პერპენდიკულარულ კვეთაში B_n მთელ სიგრძეზე არ იცვლება, მაგრამ იცვლება ტორსულ კვეთაში და წვერთან შეადგენს

$$: B_{T_0} = \frac{B_n}{\cos \alpha_0}, \text{ ხოლო სამუშაო ნაწილის ბოლოში: } B_{T_1} = \frac{B_n}{\cos \alpha_1}.$$



ნახ. 7. სპირალური ღარის ცვალებადი დახრის კუთხის სქემა,
 A-A – ბურღის ღერძის პერპენდიკულარული სიბრტყის ჭრილი:
 I - ბურღის მუშა ნაწილი, II – ღარის პროფილი.
 B-B – ბურღის ღარის პერპენდიკულარული სიბრტყის ჭრილი:
 III - ბურღის მუშა ნაწილი, IV – ღარის პროფილი.

იცვლება ბურღის სასარგებლო ტორსული კვეთიც, რომლის მნიშვნელობა წვეროსთან:

$$S_o = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_0} , \quad (1)$$

ხოლო მუშა ნაწილის ბოლოში:

$$S_1 = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_1} , \quad (2)$$

სადაც S_n ღარის ფართობია პერპენდიკულარულ კვეთში, d - ბურღის მუშა ნაწილის დიამეტრი.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\alpha_0 > \alpha_1$ ზე გამოდის რომ მუშა ნაწილის ბოლოსკენ ბურღის სასარგებლო კვეთი ძლიერდება, ანუ ასეთი ბურღები სტანდარტულ ბურღებთან შედარებით უნდა გაუძლოს უფრო მეტ დატვირთვებს.

ასეთი ბურღების დამზადება გარკვეულ სირთულეებთანაა დაკავშირებული. სტანდარტული ბურღების დამზადებისას სპეციალური სამარჯვი ახორციელებს ორი მოძრაობის ურთიერთშეთანხმებას- ნამზადის ბრუნვას და მის გადაადგილებას ღერძული მიმართულებით ისე, რომ თვითოეულ ბრუნზე ნამზადი გადაადგილდება თანაბარი სიჩქარით სპირალური ღარის ერთ ბიჯზე. ცვალებადი ბიჯის შემთხვევაში მიწოდება ხორციელდება განსაზღვრული აჩქარებით, ისე რომ უზრუნველყოფილ იქნეს სპირალური ღარის დახრის კუთხის თანაბარი შემცირება მთელ სიგრძეზე. ამის გამო საჭირო შეიქმნა არსებული სამარჯვის მოდერნიზირება და მიწოდების მუშტა მექანიზმში არქიმედეს სპირალიანი მუშტა შეცვლილ იქნა მუშტათი, რომლის პროფილი დამზადდა სპირალური ღარის დახრის კუთხისა და შესაბამისად ბიჯის ცვალებადობის კანონიდან გამომდინარე გაანგარიშების მიხედვით. გარდა ამისა სპირალური ღარის დახრის კუთხის ცვალებადობის გამო ასეთი ღარების ხეხვისას აუცილებელია დამუშავების პროცესში იცვლებოდეს სახეხი ქარგოლის ორიენტაცია ბურღის ღერძის მიმართ ღარის დახრის კუთხის

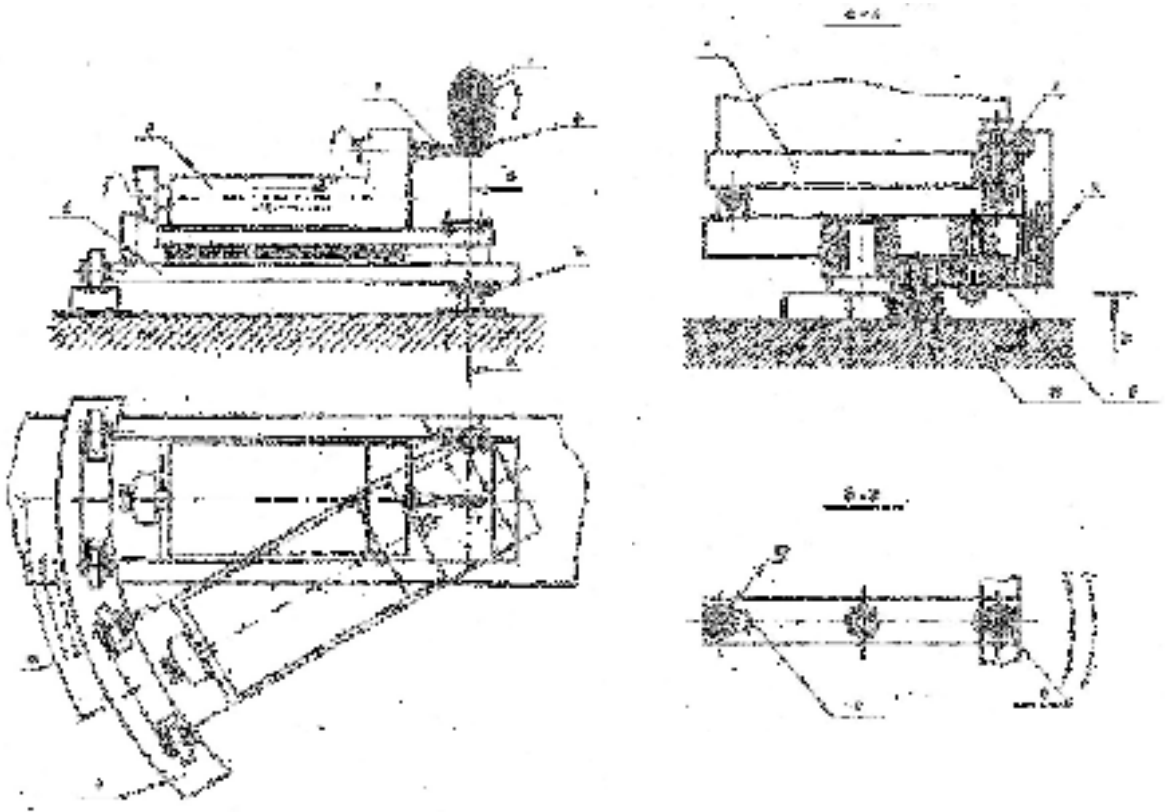
ცვალებადობის შესაბამისად. ეს შეიძლება განხორციელდეს ორი მეთოდით: სახეხი ქარგოლის ღერძის უძრავობისას შემობრუნდეს ნამზადის შპინდელის ღერძი ამ ღერძების გადაკვეთის წერტილის ირგვლივ კუთხეზე, ან უძრავად დარჩეს ნამზადის შპინდელის ღერძი და შემობრუნდეს სახეხი შპინდელის $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ ღერძი.

მობრუნების ბერკეტულმექანიზმიანი ასეთი მოდერნიზირებული სამარჯვის სქემა ნაჩვენებია ნახ.23. უნდა აღინიშნოს, რომ უფრო მაღალი სიზუსტის მიღწევის მიზნით ბერკეტული მექანიზმის ნაცვლად შესაძლებელია ლარტყა-კბილანური წყვილის გამოყენება.

სპირალური ღარების ამოსახეხი სამარჯვი ბურღის ნამზადის 1 მხარეს დასმულია საამლესო ჩარხის მოდ. 3Д642 მაგიდაზე დამონტაჟებულ ბრუნვის ღერძზე 2. ამასთან სამარჯვის ბრუნვის ღერძი აუცილებლად უნდა გადიოდეს ბურღის ნამზადის ღერძისა და სახეხი ქარგოლის 3 ვერტიკალური სიმეტრიის ღერძის გადაკვეთის "O" წერტილზე. სამარჯვის მეორე მხარე ეყრდნობა წრიულ მიმმართველს 4. შემობრუნება ხორციელდება ბერკეტული მექანიზმით, რომლის საყრდენი ღერძი 5 უძრავადაა დამაგრებული სამარჯვის კუძეზე 6. ზედა ციგის 7 და შესაბამისად ბურღის ნამზადის ღერძული გადაადგილებისას მასზე ხისტად დამაგრებული თითი 8 შემოაბრუნებს ბერკეტის 9 მარჯვენა მხარს. ბერკეტის მარცხენა მხარე დაკავშირებულია თითთან 10, რომელიც უძრავადაა დამაგრებული ჩარხის მაგიდაზე ამგვარად ბერკეტის შემობრუნება იწვევს მთელი სამარჯვის შემობრუნებას. ამასთან ბერკეტული მექანიზმის ელემენტები ისეა გათვლილი, რომ ბურღის ნამზადის ხრახნული ნაწილის სიგრძეზე გადაადგილებისას სამარჯვი შემობრუნდება სპირალური ღარის დახრის კუთხის ცვალებადობის $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$. კუთხეზე.

ამისათვის გამოითვლება მანძილი მარცხენა უძრავ თითსა და სამარჯვის

ბრუნვის ღერძს შორის ფორმულით:
$$R = l \cdot \frac{L_n}{L_n} \cdot \frac{360}{2\pi\Delta\omega}$$



ნახ.8. ბურღის ნამზადის ღერძის სახეები ქარგოლის სიბრტყის მიმართ შემობრუნების მექანიზმის პრინციპიული სქემა ცვალებადი დახრის კუთხის მქონე სპირალური ღარების ამოხეხვისათვის.

სადაც l - ბურღის სპირალური ნაწილის სიგრძეა. მმ;

L_n - ბერკეტის მარცხენა მხრის სიგრძე;

L_n - ბერკეტის მარჯვენა მხრის სიგრძე;

$\Delta\omega$ - სპირალური ღარის დახრის კუთხის ცვლილების სიდიდე.

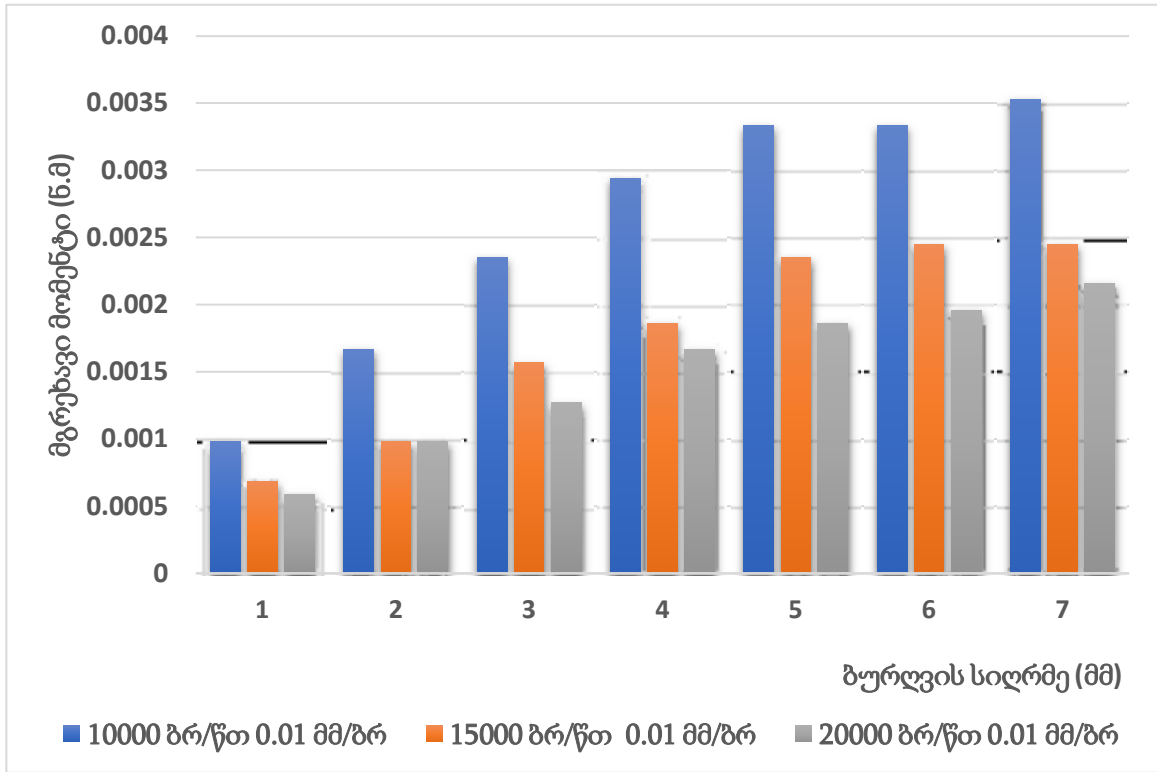
კონსტრუქციული მოსაზრებებიდან გამომდინარე უპირატესობა მივანიჭეთ პირველ ვარიანტს და მოდერნიზაციისას მოწყობილობა აღჭურვილ იქნა დამატებითი მობრუნების მექანიზმით, რომელიც სპირალური ღარების მოჭრისას უზრუნველყოფს ბურღის ნამზადის ღერძის შემობრუნებას სახეხი ქარგოლის სიბრტყის მიმართ $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ კუთხეზე. დახრის კუთხის მიმდინარე სიდიდე განისაზღვრება $\omega_x = \omega_0 - \ell_x \cdot K_\omega$, ფორმულით სადაც ω_x – დახრის კუთხის მიმდინარე სიდიდეა, ω_0 – დახრის კუთხე ბურღის წვეროსთან, ბურღის მჭრელი ნაწილის სიგრძის მიმდინარე კოორდინატა, დახრის კუთხის ცვლილების სიდიდე ბურღის მუშა ნაწილის სიგრძის 1 მმ- ზე.

მოწყობილობის კონსტრუქციაში გათვალისწინებულია ასევე ნამზადის ღერძული მიწოდებისა და წვეროსთან საწყისი ω_0 კუთხის გარკვეულ დიაპაზონში რეგულირების შესაძლებლობა. ამან საშუალება მოგვცა დაგვეპროექტებინა და დაგვეზადებინა ბურღების საცდელი ნიმუშები სპირალური ღარის დახრის კუთხის ცვალებადობის სხვადასხვა დიაპაზონით:

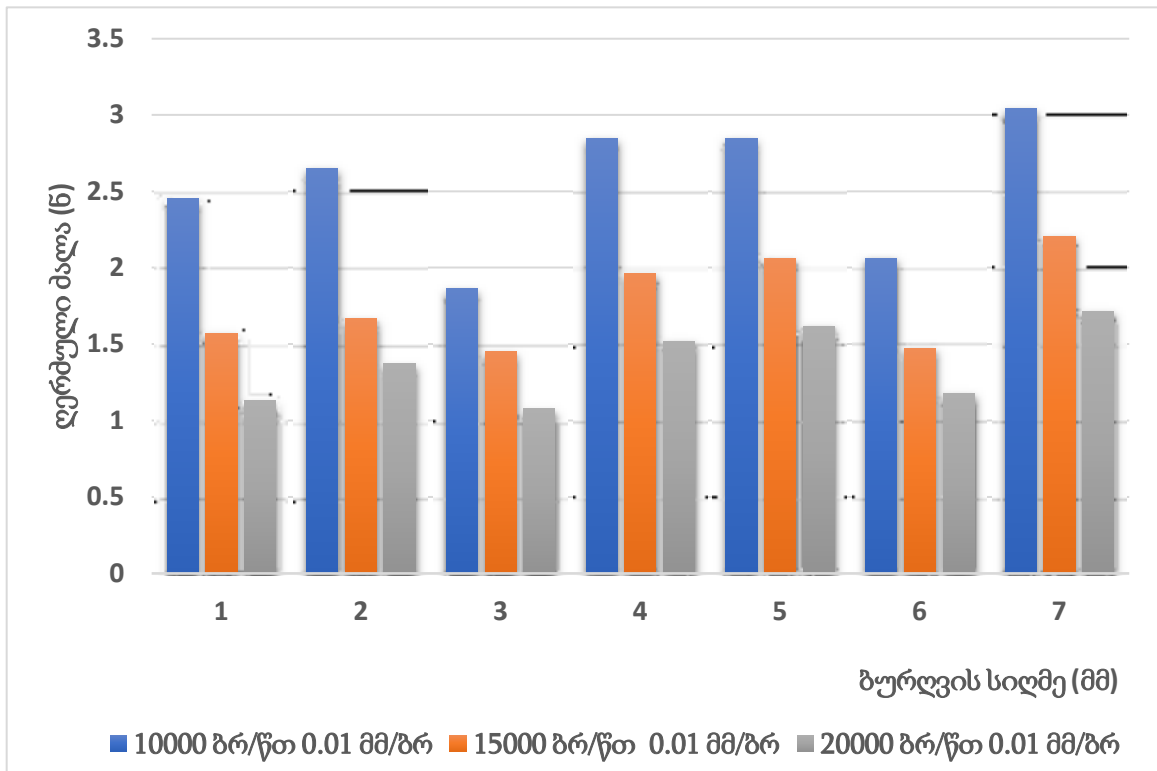
$$\omega = 30-17^\circ, \quad \omega = 35-20^\circ, \quad \omega = 40-22^\circ \quad \text{და} \quad \omega = 43-23^\circ.$$

ყველა ამ ბურღებზე ჩატარებული იქნა ისეთივე ექსპერიმენტები, როგორც სტანდარტულ ბურღებზე. ექსპერიმენტების შედეგები $\omega = 30-17^\circ$ და $\omega = 35-20^\circ$ -ისთვის ნაჩვენებია (ნახ. 9-12) ამ გრაფიკების ანალიზი გვიჩვენებს შემდეგს:

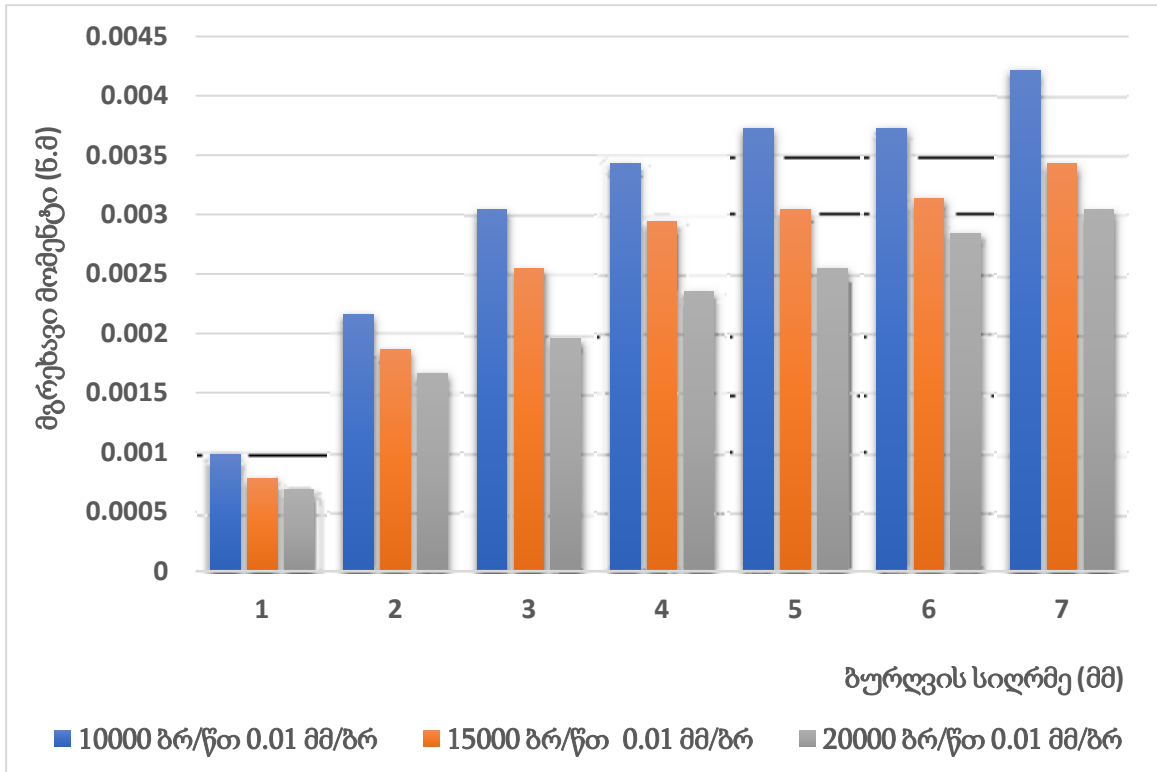
$\omega = 30-17^\circ$ ბურღებისთვის ღერძული ძალის მაჩვენებლები თითქმის არ განსხვავდება სტანდარტული ბურღისაგან რაც ისედაც $\omega = 30^\circ$ მოსალოდნელი იყო, რადგანაც ამ ბურღებს ერთნაირი წინა კუთხე და შესაბამისად მჭრელ წიბოსთან ერთნაირი ჭრის პირობები გაჩნიათ. რაც შეეხება მგრები მომენტის სიდიდეს ჭრის რეჟიმებისგან დამოკიდებულებით 12-16% ით $\omega = 30-17^\circ$ დაბალია.



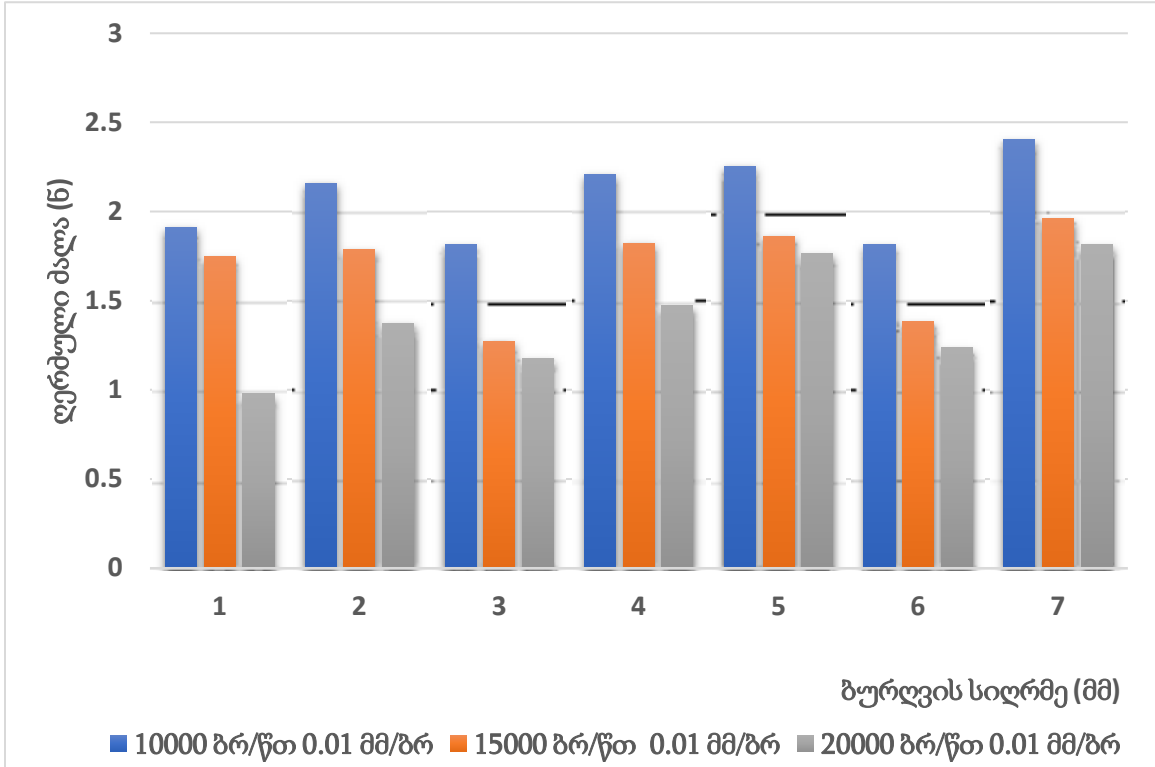
ნახ.9. მგრები მომენტის ცვლილების გრაფიკი $\mu = 30-17\%$, ბურღებისთვის



ნახ.10. ლერძული ძალის ცვლილების გრაფიკი $\mu = 30-17\%$, ბურღებისთვის



ნახ.11. მგრები მომენტის ცვლილების გრაფიკი $\alpha = 35-20^\circ$ ბურღებისთვის

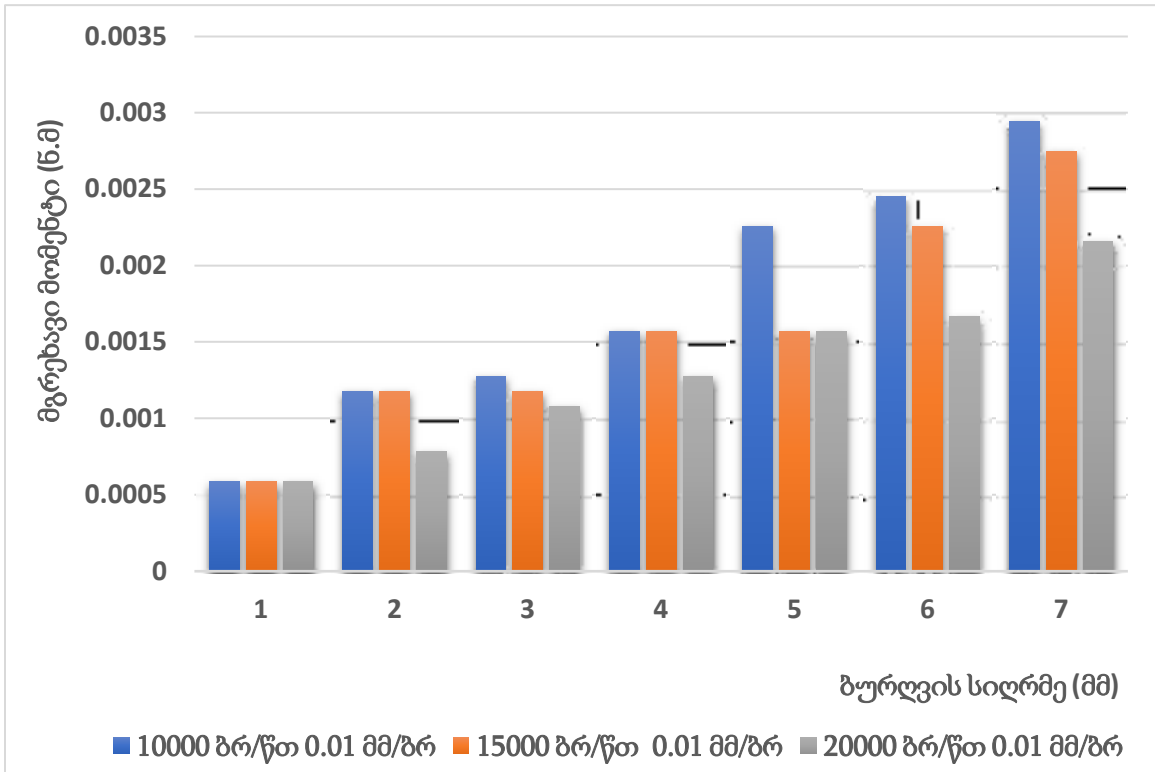


ნახ.12. ღერძული ძალის ცვლილების გრაფიკი $\alpha = 35-20^\circ$ ბურღებისთვის

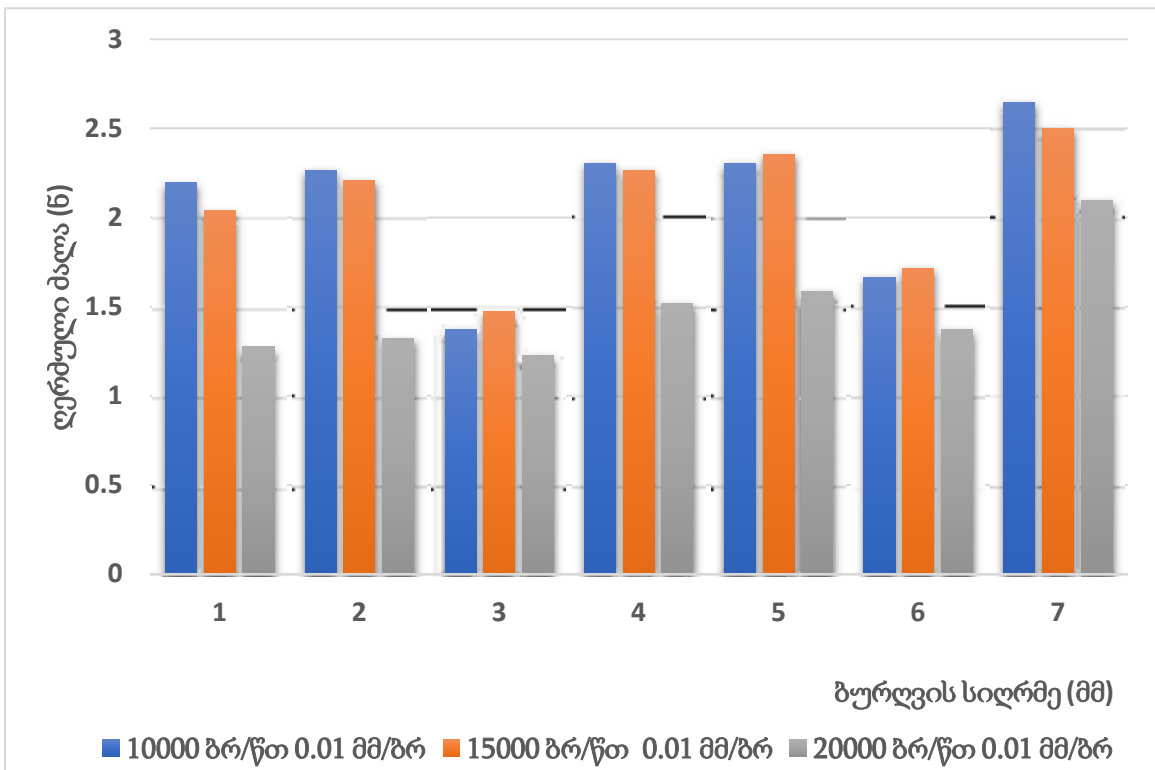
$\omega = 35 - 20^\circ$ ბურღებისთვის ღერძული ძალის სიდიდის მაჩვენებლები შედარებით დაბალია, რაც იმით აიხსნება, რომ წინა კუთხე გადიდებულია 5° -ით, რითაც გაუმჯობესებულია ჭრის პირობები, რაც შეეხება მგრები მომენტის სიდიდის მაჩვენებლებს, ბურღვის სიღრმის გაზრდისას უფრო ინტენსიურად იზრდება და ჭარბებს ორივე წინამორბედი ნიმუშის მაჩვენებლებს. ნათელია, რომ მგრები მომენტის მაჩვენებლების შემცირება $\omega = 30 - 17^\circ$ ბურღებისთვის $\omega = 30^\circ$ სტანდარტულთან შედარებით განპირობებულია სპირალური ღარის ბიჯის თანდათანობითი ზრდით და შესაბამისად დასამუშავებელი ნახვრეტის ზედაპირთან აბრაზიული ბურბუშელის კონტაქტის ფართობის შემცირებით. დახრის კუთხის ზრდა და შესაბამისად სპირალის ბიჯის შემცირება $\omega = 35 - 20^\circ$ ბურღებზე ისევ იწვევს უკუპროცესს- მგრები მომენტის მაჩვენებლები ინტენსიურად იზრდება.

$\omega = 40 - 22^\circ$ და $\omega = 43 - 23^\circ$ ბურღებით ბურღვისას ძალოვანი მახასიათებლები შედარებით დაბალია (იხ. სურ 13-16.), რაც აიხსნება წინა კუთხის მნიშვნელოვანი ($5-8^\circ$) გაზრდით და შესაბამისად ჭრის პირობების გაუმჯობესებით. თუმცა მჭრელი წიბოს წაწვეტების კუთხის შემცირება შემდგომი ექსპლუატაციისას იწვევს ცვეთის ინტენსივობის გაზრდას და ასეთი ბურღები გადალესვის გარეშე მუშაობენ არაუმეტეს 600-800 ნახვრეტისა.

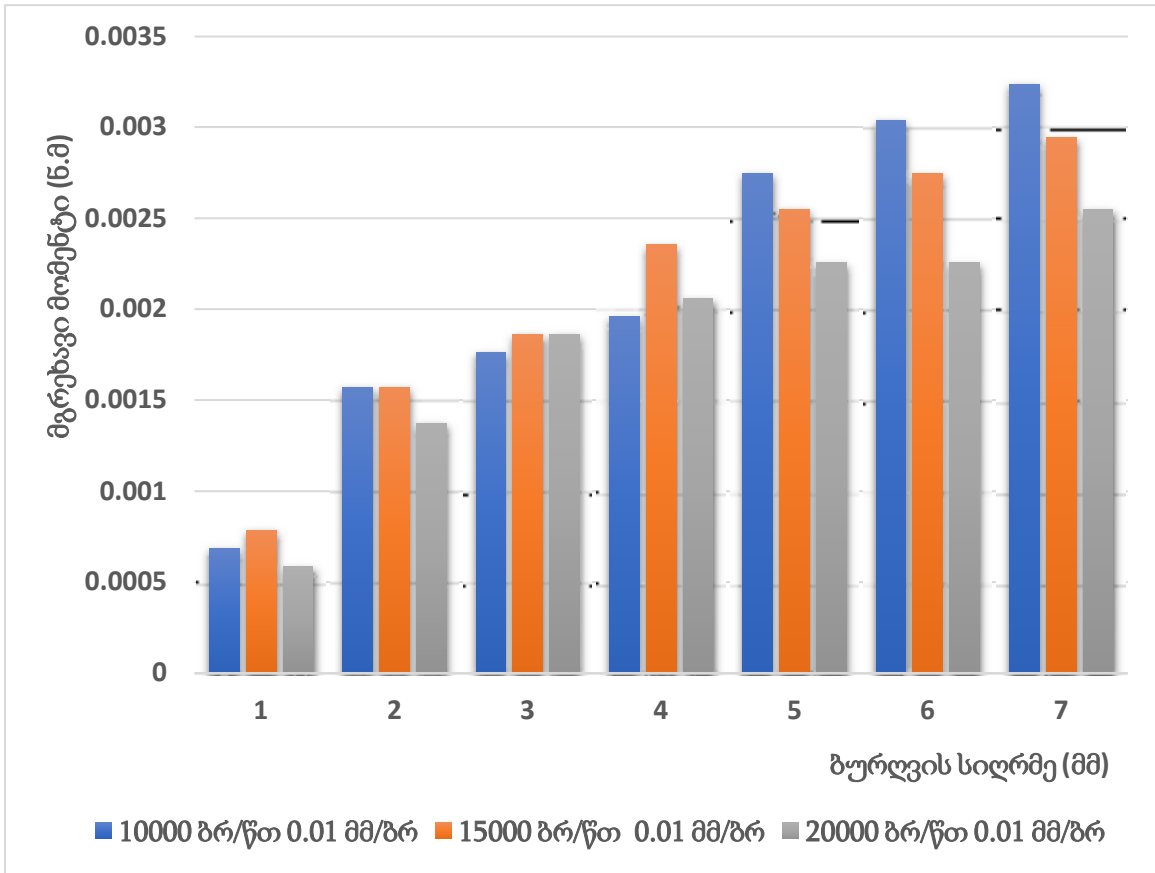
ამკარაა, რომ უფრო ნათელი სურათის მისაღებად საჭიროა გაგრძელდეს შედარებითი ანალიზი $\omega = 30^\circ$ სტანდარტული და ცვალებადბიჯიანი $\omega = 30 - 17^\circ$ ბურღებით. გაგრძელებულ იქნა ექსპერიმენტები ბურღვის გატეხვამდე. ამასთან ყოველი 200 ნახვრეტის შემდეგ მოწმდებოდა ძალოვანი მახასიათებლები, რომლებიც მჭრელი წიბოს ცვეთის სიდიდის ზრდასთან ერთად მუდმივად იზრდება.



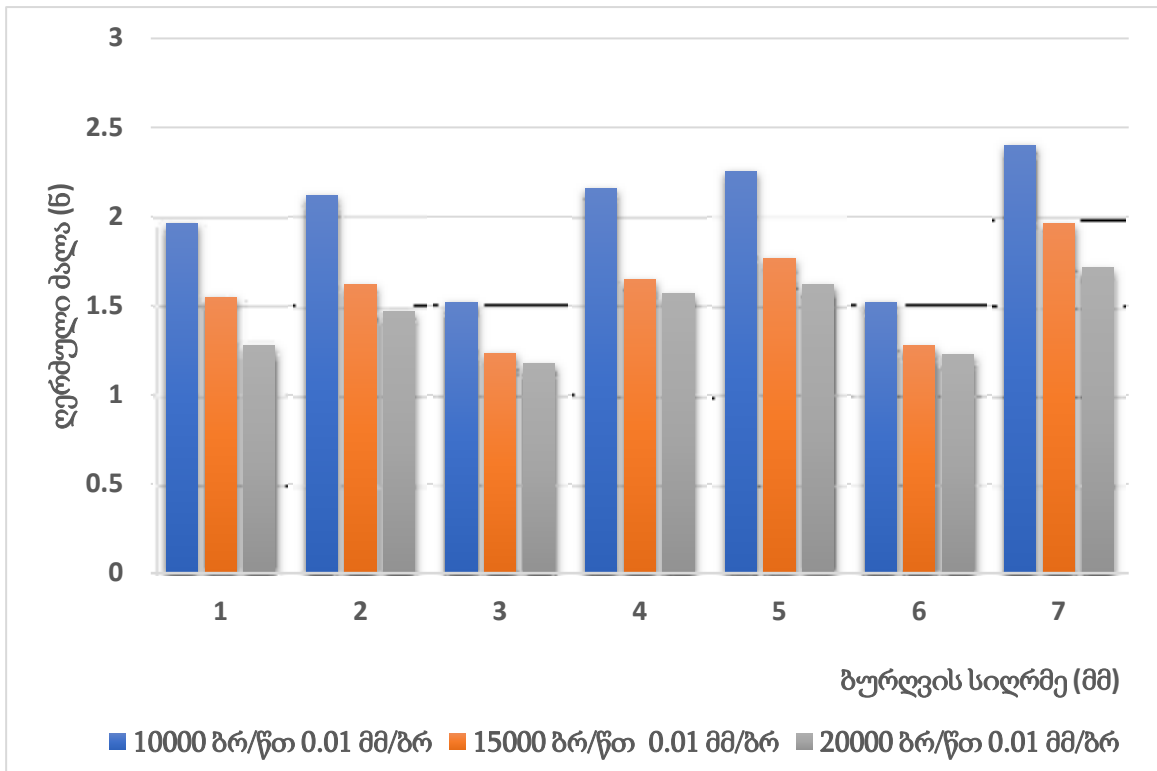
ნახ.13. მგრეხი მომენტის ცვლილების გრაფიკი $\sigma = 40 - 22^{\circ}$, ბურღებისთვის



ნახ.14. ღერძული ძალის ცვლილების გრაფიკი $\sigma = 40 - 22^{\circ}$, ბურღებისთვის



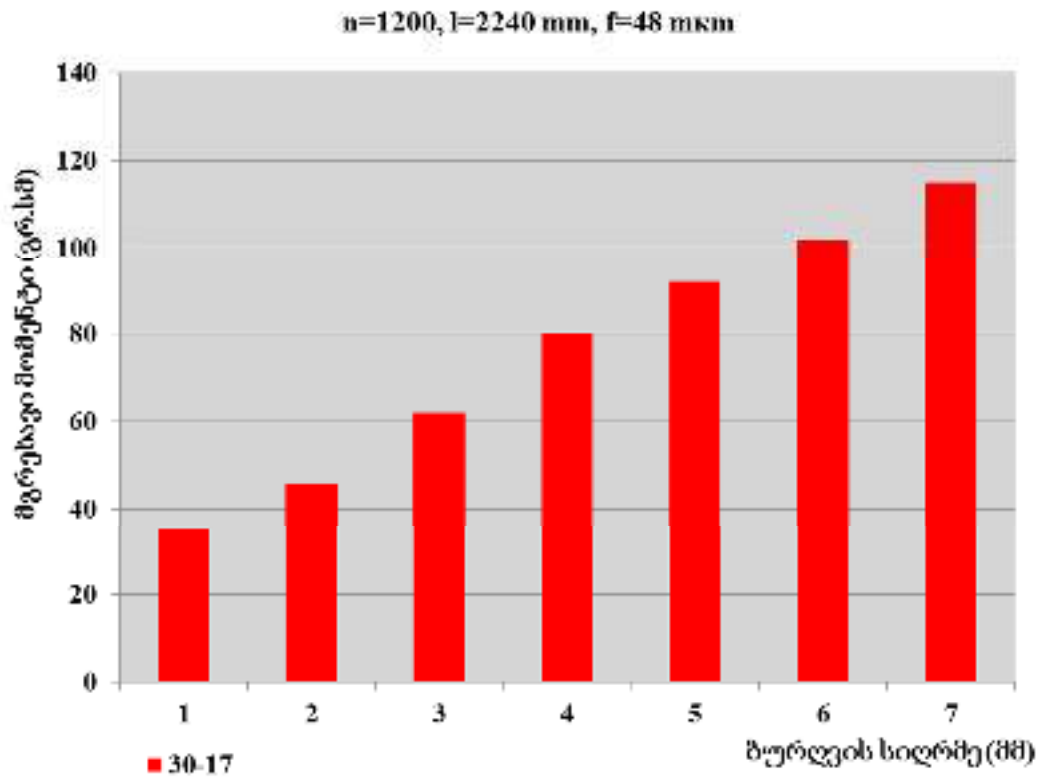
ნახ.15. მგრები მომენტის ცვლილების გრაფიკი $\mu = 43 - 23^{\circ}$ ბურღებისთვის



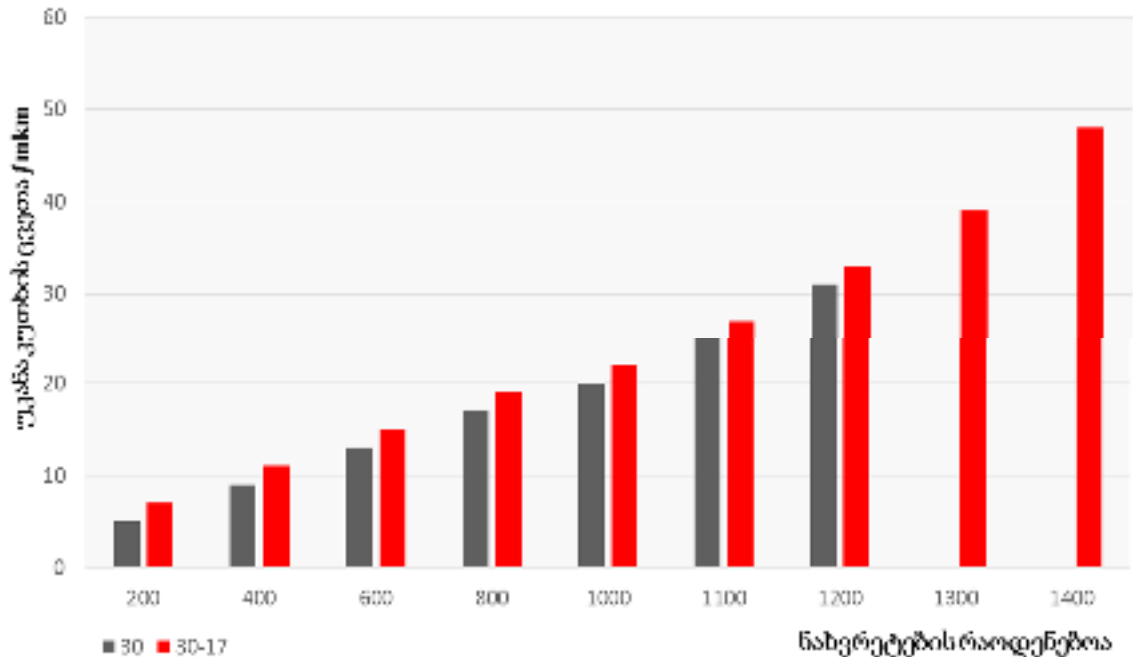
ნახ.16. ღერძული ძალის ცვლილების გრაფიკი $\mu = 43 - 23^{\circ}$ ბურღებისთვის

1000 ნახვრეტის შემდეგ შემოწმება ხორციელდებოდა ყოველი 100 ნახვრეტის შემდეგ იმდენად რამდენადაც იზრდება ბურღის გატეხვის ალბათობა. ექსპერიმენტების მთელი სერიის განმავლობაში ორივე ტიპის ბურღებისთვის თითქმის ერთნაირი რჩება მჭრელი წიბოს ცვეთისა და ღერძული ძალის სიდიდის მაჩვენებლები. რაც შეეხება მგრეხ მომენტს მისი მაჩვენებლები სტანდარტულ ბურღებზე ყოველთვის ჭარბობს ცვალებადბიჯიანი ბურღებისას.

სტატისტიკამ აჩვენა, რომ სტანდარტული $\omega = 30^\circ$ ბურღების მსხვრევა ხდება 1200-1300 ნახვრეტის შემდეგ ხოლო $\omega = 30-17^\circ$ ბურღებისა -1400-1500 ნახვრეტის შემდეგ (ნახ. 17, 18).



ნახ. 17. მგრეხი მომენტის ცვლილების გრაფიკი $\omega = 30-17^\circ$ ბურღებისთვის გატეხვამდე



ნახ. 18. გაბურღული ნახვრეტების რაოდენობის გავლენა უკანა ზედაპირის ცვეთის სიღიბეზე $\omega = 30^0$ და $\omega = 30 - 17^0$ -ისთვის

ჩატარებული სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების აქტუალობა და ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდის სრულყოფის აუცილებლობა დროთა განმავლობაში უფრო და უფრო საჭირო და აუცილებელი ხდება. ეს განპირობებულია იმით, რომ რადიო-ტექნიკური აპარატურისა და კომპიუტერული ტექნიკის კვანძებისა და დეტალების განუწყვეტელი მინიატურიზაცია დაპროექტების დარგისა და დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესების სპეციალისტებს აიძულებს შესაბამისად შეამცირონ ძირითადი შემსრულებელი ზედაპირების ზომები. ამაზე მეტყველებს ის ფაქტი, რომ თუ 10-15 წლის წინ ნაბეჭდი ფილების ბურღვისას გამოიყენებოდა ბურღები 0.5-0.6 მმ მინიმალური ზომით დღეისათვის ეს ზომები 0.2-0.3 მმ -მდე შემცირებული. მინიატურიზაციის პროცესი კვლავ გრძელდება და ძნელი არაა წარმოვიდგინოთ დაახლოებითი სიტუაცია, რომელიც 20-30 წლის შემდეგ შეიქმნება. ამ დროისათვის ბურღების გეომეტრიული პარამეტრების

ოპტიმიზაციის საკითხი უფრო მნიშვნელოვანი გახდება, რამეთუ საჭირო შეიქმნება მაქსიმალურად ეფექტურად იქნას გამოყენებული ბურღის მუშა დიამეტრის თითოეული მიკრონი. იგივე მეთოდები შეიძლება იქნას გამოყენებული სხვა ინსტრუმენტების ექსპლუატაციის ეფექტურობის ამაღლების მიზნითაც.

დღეისათვის მსგავსი ექსპერიმენტები ცვალებადბიჯიანი ბურღების ეფექტურობის დადგენის მიზნით ტარდება მრეწველობაში ფართოდ გამოყენებადი ლითონური მასალების დამუშავებისას, როგორებიცაა ტიტანისა და ალუმინის შენადნობები, ფერადი და მრავალი ლითონური მასალა სხვადასხვა ფიზიკო-მექანიკური დამუშავებადობის თვისებებით.

უახლოეს მომავალში პერიოდულად გამოქვეყნდება ამ სამუშაოების შედეგები დასამუშავებელი მასალების სხვადასხვა ჯგუფებისათვის.

ყოველი გარკვეული დროის მონაკვეთის შემდგომ, როგორც ამ, ისე სხვა მიმართულებებში პერიოდულად ჩნდება საპასუხისმგებლო დეტალებისა და ინსტრუმენტების ოპტიმალური პარამეტრებისა და ასევე მათი დამზადების ტექნოლოგიური დაგეგმარების ოპტიმალური პარამეტრების გაანგარიშების პროცესების უფრო ზუსტი და უფრო მისაღები მეთოდების შექმნის აუცილებლობა.

სწორედ ამაში მდგომარეობს აღნიშნული სამეცნიერო და ტექნიკური მიმართულებების დღეს არსებული მაღალი აქტუალობა და ის ფაქტი, რომ ტექნიკის განვითარებასთან ერთად ეს აქტუალობა სულ უფრო და უფრო მზარდი იქნება.

უნდა აღინიშნოს ის ფაქტიც, რომ ზემოთაღწერილი სიტუაცია მოითხოვს ახალგაზრდა საინჟინრო კადრების მომზადების დონის საგრძნობ ამაღლებას და ამ დონის არამარტო შენარჩუნებას არამედ მის სისტემატურად ზრდას.

ამისათვის კი აუცილებელია ტექნიკური დარგის უმაღლესი სასწავლებლების მატერიალურ-ტექნიკური ბაზისა და პედაგოგიური შემადგენლობის სისტემატური განახლება. ეს პროცესი იქნება ძალზე რთული, მაგრამ აუცილებელი ნებისმიერი ნორმალური ქვეყნისათვის.

დასკვნები

1. დადგენილია, რომ „ინდუსტრია-4“ის რეფორმის განვითარების ტემპი დიდად არის დამოკიდებული გამოყენებული მექატრონული სისტემების საექსპლუატაციო მახასიათებლების ეფექტურობაზე.
2. ექსპერიმენტებით დამტკიცებულია, რომ მექატრონული სისტემების ხარისხი და ეფექტურობა შეიძლება გაუმჯობესდეს გამოყენებული ინსტრუმენტების კონსტრუქციულ-გეომეტრიული პარამეტრებისა და დამზადების პროცესების ოპტიმიზაციით. მაგალითად მუშა ნაწილის 1მმ-ზე ნაკლები დიამეტრის მქონე სალი შენადნობის ბურღების სიმტკიცე შეიძლება გაიზარდოს მინიმუმ 25-30%-ით, რა გზითაც შესაძლებელია პლატების ბურღვის პროცესის წარმადობის შესაბამისად გაზრდა.
3. სალი შენადნობის ბურღების გეომეტრიული პარამეტრების ოპტიმიზაციით შესაძლებელია გაუმჯობესდეს ბურბუმელას წარმოქმნის პროცესი და ჭრის ზონიდან მისი თავისუფლად მოცილება ნაბეჭდი პლატების ბურღვისას, რაც დადებითად იმოქმედებს დამუშავებული ზედაპირისა და მისი შემდგომი მეტალიზაციის ხარისხზე, რასაც მიკროელექტრონიკაში აქვს გადაწყვეტი მნიშვნელობა ნაკეთობების საიმედო მუშაობის მიზნით.
4. დეპარტამენტის ლაბორატორიებში არსებული მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა, ჩვენთვის ხელმისაწვდომი სალი შენადნობების ნამზადების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები და ტექნოლოგიური აღჭურვილობა საშუალებას იძლევა დამზადებული სალი შენადნობის ბურღების მუშა ნაწილის დიამეტრი შემცირდეს 0.2-0.3 მმ-მდე, მაგრამ დღეისათვის უკვე მოსალოდნელია მოთხოვნილება 0.1 მმ და კიდევ უფრო ნაკლები დიამეტრის ბურღებზე. ამიტომ დეპარტამენტის და უნივერსიტეტის

ხელმძღვანელობა უკვე დგამს გარკვეულ ნაბიჯებს და მიმდინარეობს მოლაპარაკებები საქართველოში რამდენიმე საწარმოსგან შემდგარი კონგლომერატის შექმნაზე, სადაც ერთ-ერთი საწარმო იქნება სწორედ აღნიშნული მიმართულების, კერძოდ: „პრეციზიული სამანქანათმშენებლო ნაკეთობების, ტექნოლოგიური აღჭურვილობების და მექატრონული სისტემების მოდულების პროექტირება და წარმოება“.

5. ევროპელი ექსპერტების მიერ საქართველოში ჩატარებული კვლევების შედეგების მიხედვით, საინფორმაციო და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების და ინტერნეტ ინფრასტრუქტურის განვითარების მაჩვენებლები ბოლო წლებში მუდმივად იზრდება. დადგენილია, რომ ბოლო ათწლეულში საქართველო მყარად იკავებს ღირსეულ ადგილს პირველ ათეულში 200-ამდე ქვეყანას შორის.
6. ინდუსტრია-4.0-ის რეფორმებით გათვალისწინებული ახალი ტექნოლოგიების აქტუალობაზე და შედეგების პრაქტიკული რეალიზაციის ღირებულებაზე მეტყველებს ის ფაქტიც, რომ სხვადასხვა ცნობილ მეცნიერთა მიერ ჩატარებული კვლევების შედეგების მიხედვით იმ ქვეყნებში, სადაც ოპერატიულად ინერგება აღნიშნული ტექნოლოგიები, მოსახლეობა გაცილებით უმტკივნეულოდ უმკლავდება ნებისმიერი სახის პანდემიით გამოწვეულ მძიმე პროცესებს.

Abstract

In the work it is analyzed the expected problems in the implementation of the 4th Scientific Technical Revolution "4.0", the scale of which is quite huge, and an enormous part of them requires the use of modern achievements of science and a great deal of effort.

During the first industrial revolution, which lasted longer than two centuries, water and steam were used to mechanize certain industrial operations.

As a result of the second revolution, on the basis of the use of electricity, mass production of many products was created in various areas of the national economy.

During the third revolution, through the use of electronic and information technology, production processes became automated. Nowadays, based on the results of the third revolution, the fourth revolution is developing, which relies on digital technologies; the development of which was started in the second half of the last century. It implies the merge of several modern technologies and the disappearance of any boundaries between the physical, digital and biological spheres, that is, the creation of cyber - physical systems.

It is confirmed that the implementation of the industry-4.0 reform can not be achieved without the creation of super-modern mechanical systems that require the rapid development of such important fields of technology as microelectronics, informatics, precision mechanical engineering, material science and the latest technologies.

The biggest challenge is to continuously and intensively increase the functionality of electronic devices and their speed of operation. This in turn leads to an even higher pace of minimization of merchandise and their constituent elementary base dimensions and thus reduce the surfaces of tools and technological equipment used in their manufacturing process to a level, that almost every operation of these instruments is carried out using optical tools, because such operations are virtually impossible to be controlled by naked eyes.

Industrial Technological Process Department has conducted analyzes of the work in this direction ,in addition to that there was also made the classification of instruments used in the production of electronic devices according to their usage and purpose.At the same time the optimal paths for constructive-geometric parameters and technological processes are evolved for the purpose of improving the performance characteristics of each group.

On the example of spiral drills which is one of the most common representatives of cutting tools is conducted specific research works. In particular: less than 1 mm of working diameter made of carbide and patented a new structure with variable angle of

inclination of the spiral grooves, which allows the drilling process to be improved by selecting the proper value of the corners of the drill head, and then gradually decreasing the variable angle in the end of the groove zone, where the drills are broken down, improve the strength of the drill.

It is also designed and patented a spiral groveling tool with a rotating angle, of which I'm co-authore too.

Parties of the new constructions drills are made of the different parts of a range of 0.3-1 mm diameter and with various variable angle of inclination of the spiral grooves.

Experiments on drilling of different materials have been carried out on a special software control drilling machine for the purpose of comparing borers of new construction with each other and standard drills. Based on the analysis of the obtained results, each specific material is drawn to the optimal values of the geometric parameters of the drum and the proposals are designed to solve the problems arising in the further reduction of the drilling worker diameter.

These problems are mainly related to improve physical-mechanical properties with new composition hard alloys for driers, diamonds with new features and precise carriages and technologies that carry different operations with new technical requirements.

Therefore, reduction of each new step of measurement of the work component requires a scientific-research work cycle of the contents until the production of reduced measurement instruments with the desired operational characteristics.

The results of a survey conducted by a special commission set up by the European Union on the readiness of the population and enterprises to be able to carry out the work envisaged by the Industry-4.0 reform are analyzed. It is known that Georgia has firmly taken its honorable place in the top ten in recent years, which is very important even for facilitating the process of obtaining a large amount of new soft loans.

The results of important works are also examined, which confirms that in any country, where the introduction of technologies provided by the industry-4.0 reforms is intensively carried out, it is much easier to solve any problems during pandemic.

დანართი 1

გამოქვეყნებული შრომების სია

დანართი 1

1	New Ways to improve the geometric parameters and technology of manufacturing hard metal micro tools for processing of printed circuit boards and other details of mechatronic sistem.	Materials of the 7 th International Conference “Economics and Management - Based On New Technologies”, EMoNT -2017/ Vrnjačka Banja, Serbia, 15-18 June 2017.	1-9	V.Bachanadze, G.Popkhadze R. Turmanidze
2	Basic technological processes required to create mechatronic systems to meet today's needs and problems of their instrumental support of “Industry 4.0” challenges	International saintific journal “Inovations”. Year V, Issu 3/2017, Sofia, Bulgaria, ISSN Print 1314-8907 ISSN WEB 2534-8469	123 - 128	V.Bachanadze, G.Popkhadze R. Turmanidze
3	Survey of the role of modern requirement mechatronic systems in the process of implementation industry-4.0 reforms	8th International Conference "Economics and Management-Based on New Technologies" EMoNT-2018 25-28 June 2018, Vrnjačka Banja, Serbia. ISBN-10 86-6075-064-0 ISBN-13 978-86-6075-064-0	15- 28	Predrag Dasic Giorgi Popkhadze Beata Borodavko Raul Turmanidze
4	MAIN EXPECTED PROBLEMS DURING THE IMPLEMENTATION OF "INDUSTRY-4.0" REFORMS AND THEIR PRACTICAL SOLUTIONS BASED ON IMPROVING THE EFFICIENCY OF USED MECATRONIC SYSTEMS	6th International Conference “INTEGRITY-RELIABILITY-FAILURE” Lisbon / Portugal, 22-26 July 2018 ISBN: 978-989-20-8312-4 N. DL: 441087/18	171 - 172	V.Bachanadze, G.Popkhadze R. Turmanidze

5	საიარაღო მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გავლენა მჭრელი ბურღების ცვეთამედეგობაზე.	საქართველოს კერამიკოსთა ასოციაციის ჟურნალი „კერამიკა“. Vol.19. 1(37).2017 ISSN 1512-0325	64-77	გ.ფოფხაძე, გ.ტაბატაძე რ. თურმანიძე
6	ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕФОРМИ «ИНДУСТРИЯ-4.0»	IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE SUMMER SESSION "INDUSTRY 4.0" , 24-27.06.2019, BURGAS, BULGARIA		П. Дашич, Г. Попхадзе Р. Турманидзе
7	IMPROVING THE EFFICIENCY OF MECHATRONIC SYSTEMS IN ORDER TO ENSURE INTENSIVE REFORM INDUSTRY-4.0	8th International Conference MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN, University of Bologna, 4-6 September, 2019		V.Bachanadze, G.Popkhadze R. Turmanidze
8	Digital infrastructure in Georgia as a condition for successful application Industry 4.0.	<i>Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Industry 4.0 - 2019": Winter Session; Borovets, Bulgaria; 11-14 December 2019. Sofia (Bulgaria): The Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0", 2019,. ISSN 2535-0153.</i>	174 – 177	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G.
9	Statistical analysis of the global competitiveness index (GCI) of Georgia.	<i>Book of Abstracts of the 11th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'11); Batumi, Georgia; 16-19 July</i>	96–97.	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G.

		2019. Batumi (Georgia): Batumi Shota Rustaveli State University (BSU), 2019, ISBN 978-9941-462-97-9.		
10	Повышение эффективности характеристик мехатронных систем с целью обеспечения высокой интенсивности реформы “Индустрия-4.0”	<i>Proceedings of the 4th International Scientific Conference “Industry 4.0 - 2019”: Summer Session</i> ; Burgas, Bulgaria; 24-27 June 2019. Sofia (Bulgaria): The Scientific Technical Union of Mechanical Engineering “Industry 4.0”, 2019, ISSN 2535-0153.	45–52.	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G. Vatitadze G.
11	Statistical analysis of e-government development index (EGDI) of Georgia.	<i>Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS)</i> , Vol. 128 (2020) (Special Volume with: <i>6th International Conference “New Technologies” (NT-2020)</i> ; Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; 25-27 June 2020), ISSN 2367–3370 and ISBN 978-3-030-46816-3. doi: 10.1007/978-3-030-46817-0_105 .	930 - 938 .	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G.
12	Analysis of Digital Performance Indicators in the Georgia	5th international conference "Economy, Law and State Administration" ELaSA-2020 01-04 July 2020, Tivat (Montenegro), ISBN 978-86-6042-022-2	99-107	Popkhadze G.
13	Chapter 15: Investigation of operational characteristics of mechatronic systems in Industry 4.0.	<i>Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing</i> . Edited by Isak Karabegović; Ahmed Kovačević; Lejla Banjanović-Mehmedović & Predrag Dašić. Hershey	324 – 343	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G.

		(Pennsylvania - USA): IGI Global, 2020,. ISBN 978-1-7998-2725-2. doi: 10.4018/978-1-7998-2725-2.ch015 .		
14	Digital infrastructure in Georgia as a condition for successful application Industry 4.0.	<i>International Scientific Journal "Industry 4.0"</i> , Vol. 5, Issue 1 (2020), ISSN 2534-8582.	3–6.	Turmanidze R. Dašić P. Popkhadze G.

დანართი 2

დისერტაციაში

გამოყენებული ლიტერატურა

დანართი 2

დისერტაციაში გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] What is Industry 4.0 - <https://www.epicor.com/en/resource-center/articles/what-is-industry-4-0/>
- [2] The Evolution of Industry 1.0 to 4.0 - <https://www.seekmomentum.com/blog/manufacturing/the-evolution-of-industry-from-1-to-4>
- [3] The birth of the electric machines - <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2014.0208>
- [4] The invention of the electric motor - <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [5] History of mobile phones and the first mobile phone - <https://www.uswitch.com/mobiles/guides/history-of-mobile-phones/>
- [6] WHAT IS THE INTERNET? HISTORY AND STAGES OF DEVELOPMENT. - <http://www.ecommerce-digest.com/history-of-the-internet.html>
- [7] Zujevs, V. Osadcuks, and P. Ahrendt, Trends in robotic Sensor Technologies for Fruit Harvesting: 2010-2015, Procedia Computer Science, Vol. 77, 2015, pp. 227-233.
- [8] A. Ivan, Research regarding optimization of industrial robots for machining applications, Doctoral Thesis, Universiti "Politehnica" of Bucharest, 2011.
- [9] A. Ivan, Research regarding optimization of industrial robots for machining applications, Doctoral Thesis, Universiti "Politehnica" of Bucharest, 2011.
- [10] B. Jang, Nanotube fiber reinforced composite materials and method of producing fiber fiber reinforced composites, 23 Dec 2003
- [11] R.Turmanidze V.Bachanadze, G.Popkhadze International scientific journal "Inovations". Year V, Issu 3/2017, Sofia, Bulgaria,ISSN Print 1314-8907,ISSN WEB 2534-8469123-128.Basic technological processes required to create mechatronic systems to meet today's needs and problems of their instrumental support of "Industry 4.0" challenges
- [12] B.Karpushewski, R.Turmanidze, L.Dübner, O.Kushnarenko. Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Collection of scientific works "Modern technologies in mechanical engineering", publishing house of the Kharkov national technical university "KPI". Release 2. Kharkov, 2008 year. Pages 27-32.

- [13] D.Adamia, Z.Gviniashvili, V.Bachanadze. Peculiarities of formation of shavings grooves of spiral drill of hard alloy with variable inclination. Scientific technical journal "Transport and Machinebuilding" 2009 year. Edition No. 3(15). Publishing house "Transport and Machinebuilding". Pages 133-140.
- [14] R.Turmanidze, O.Kushnarenko, D.Adamia, Z.Gviniashvili. Small-sized hard metal spiral drills with variable angle of inclination chip grooves. Collection of scientific works "Modern technologies in mechanical engineering", publishing house of the Kharkov national technical university "KPI". Kharkov, Release 5, 2010 year, Pages 318-327.
- [15] R.Turmanidze, Z. Gviniashvili. Fine-sized hard metal spiral drills with variable setting angle of chip grooves. Selected, peer reviewed papers from the 6th International Congress of Precision Machining ICPM
- [16] Lei, X.; Shen, B.; Cheng, L.; Sun, F.; Chen, M. Influence of pretreatment and deposition parameters on the properties and cutting performance of NCD coated PCB micro drills. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43, 30–41. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.10.016.
- [17]Kang, M.C.; Je, S.K.; Kim, K.H.; Shin, B.S.; Kwon, D.H.; Kim, J.S. Cutting performance of CrN-based coatings tool deposited by hybrid coating method for micro drilling applications. Surface and Coatings Technology, August 2008, 202, 22-23, 5629–5632. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.06.130.
- [18]Rajan, K.; Prabhushankar, N.; Nagarajan, N. A review of current micro drilling processes. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJSET), January 2016, 3 (1), 60–64.
- [19] Zheng, L.J.; Wang, C.Y.; Fu, L.Y.; Yang, L.P.; Qu, Y.P.; Song, Y.X. Wear mechanisms of micro-drills during dry high speed drilling of PCB. Journal of Materials Processing Technology, October 2012, 212, 10, 1989–1997. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.05.004.
- [20]Karabegović, I.; Kovačević, A.; Banjanović-Mehmedović, L.; Dašić, P. (editors). Handbook of research on integrating Industry 4.0 in business and manufacturing. Hershey (Pennsylvania - USA): IGI Global, 2020. – 661 pp. ISBN 978-1-7998-2725-2. doi: 10.4018/978-1-7998-2725-2.