

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

თევდორე ფხაკაძე

გაზარტული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი
მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის
კონტროლის მეთოდის დამუშავება

საინჟინრო მეცნიერებებში დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად წარმოდგენილი

დისერტაცია

კონტროლის მეთოდები და დიაგნოსტიკა მანქანათმშენებლობაში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი

მარლენ შალამბერიძე
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო
უნივერსიტეტის პროფესორი,
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი

ქუთაისი 2010

შინაარსი

შესავალი	5
1. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების სქემები, კონტროლის მეთოდები, კვლევის მიზანი და ამოცანები	9
1.1. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ძირითადი სქემების დახასიათება	9
1.1.1. ცალმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემა	10
1.1.2. ორმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემა	14
1.1.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების სქემა	17
1.2. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის მეთოდების ანალიზი	21
1.2.1. შედუღების ხარისხის კონტროლის სტატისტიკური მეთოდი	22
1.2.2. ლითონკონსტრუქციების წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის დაუშლელი კონტროლის მეთოდები	24
1.2.2.1. რენტგენული კონტროლი	25
1.2.2.2. ულტრაბგერითი კონტროლი	27
1.2.2.3. ელექტრომაგნიტური და ემისიური კონტროლის მეთოდები	28
1.2.2.4. შედუღების პროცესების პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდები	29

1.3. პროცესების პარამეტრების მიხედვით შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის მეთოდების ანალიზი. კვლევის მიზანი და ანალიზი.....	30
2. შედეგების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები და მათი სტაბილიზაციის შესაძლებლობა.....	39
2.1. შედეგების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები.....	39
2.2. ცვეთამედეგი ელექტროდის დამუშავება.....	44
2.3. კომბინირებული კონსტრუქციის ელექტროდის მიღების მეთოდი	49
2.4. შესადულ დეტალსა და ელექტროდის მუშა ზედაპირს შორის წინაღობის სტაბილიზირება	50
2.5. დასკვნები.....	52
3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების მოდელის პარამეტრების დადგენა	53
3.1. კონტაქტური წერტილოვანი შედეგების ზონის შენაცვლების სქემა	53
3.2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების სქემის თავისებურებების გათვალისწინებით მისი ფიზიკური მოდელის ფორმის განსაზღვრა.....	62
3.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ფიზიკური მოდელის პარამეტრები.....	68
3.4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ფიზიკური მოდელის ელემენტებში გამავალი დენების ანგარიში	73
3.5. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური	

შედულებისას დენის დაშუნტვაზე შედულების და მისი მახლობელი ზონის წინააღმდეგობის გავლენა	80
3.6. დაწყვილებულ ელექტროდებს შორის ბიჯის გავლენა დაშუნტვის დენის მნიშვნელობაზე	90
3.7. დასკვნები.....	93
4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების დენის საანგარიშო გამოსახულებების მიღება და სიმტკიცის შეფასების მრავალფაქტორიანი მოდელის დამუშავება	94
4.1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების დენის საანგარიშო გამოსახულებების დამუშავება	94
4.2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულებისას შედულების დენის ინფორმაციულობის კვლევა.....	99
4.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების სიმტკიცის შეფასების მრავალფაქტორიანი მოდელის დამუშავება.....	102
4.4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების ხარისხის კონტროლის ალგორითმი	106
4.5. ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობის შეფასება	109
4.6. დასკვნები.....	111
ძირითადი დასკვნები.....	112
ლიტერატურა	114

შესავალი

თემის აქტუალობა. მსოფლიოში წარმოებული შენადული ლითონკონსტრუქციების 17...20 % მზადდება კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით. მათი დიდი ნაწილი სრულდება, მანქანათმშენებლობაში და საავტომობილო წარმოებაში გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების დამზადებისას გამოყენებული ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებით. მისი ხარისხის კონტროლი წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად ტექნოლოგიურ ოპერაციას და მასზე ბევრადაა დამოკიდებული წარმოებული ლითონკონსტრუქციის თვითღირებულება.

ბოლო პერიოდში კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით ლითონკონსტრუქციების წარმოებისას გამოიყენება შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მაღალმწარმოებლური მეთოდი. კონტროლი სრულად ავტომატიზირებულია, ხორციელდება უშუალოდ შედუღების რეალურ დროში, არ მოითხოვს ლითონკონსტრუქციის დაშლას და ამის გამო იგი არ საჭიროებს კონტროლის ოპერაციაზე დამატებით დროს. ხარისხის კონტროლის აღნიშნულმა მეთოდმა დღემდე ვერ ჰპოვა პრაქტიკული გამოყენება გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას, რადგანაც ერთ-ერთი მთავარი პარამეტრის, შედუღების დენის ინფორმაციულობა დაბალია. ამიტომ, გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდის დამუშავება აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

კვლევის საგანი და პრობლემატიკა. არსებობს კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდის ფიზიკური და ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მათემატიკური მოდელები. მაგრამ მათი გამოყენების საკითხები ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების შემთხვევაში შედუღების დენის არასტაბილურობის გამო ჯერ კიდევ ღიად რჩება. კვლევის საგანია დენის დაშუნტვის თავისებურებებისა და მისი ინფორმაციულობის შესწავლის საფუძველზე მათემატიკური მოდელის შექმნა და ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდის დამუშავება.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. სამუშაოს მიზანია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ხარისხის კონტროლის მეთოდის შექმნა. ამ მიზნის მისაღწევად დასმულია შემდეგი ამოცანები:

- ორმხრივ მრავალწერტილოვან კონტაქტურ შედეგებაზე მოქმედი ფაქტორების სტაბილიზირება;
- ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ფიზიკური მოდელის დამუშავება;
- დამუშავებული მოდელის მეშვეობით დენის დაშენტვის თავისებურების კვლევა;
- შედეგების დენის რეალური მნიშვნელობების განსაზღვრა;
- ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდისათვის ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მათემატიკური მოდელის დამუშავება;
- შედეგების ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის უტყუარობის კვლევა.

კვლევის მეთოდები. კვლევის მიზნის მისაღწევად გამოყენებულია კონტაქტური შედეგების და ელექტროტექნიკის თეორიის, მათემატიკური და ფიზიკური მოდელირებისა, აგრეთვე ექსპერიმენტული კვლევების თანამედროვე მეთოდები.

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების პროცესი და პრობლემები, დაკავშირებული აღნიშნული სახის კონსტრუქციების შედეგების ხარისხის კონტროლის თავისებურებებთან.

მეცნიერული სიახლე. ნაშრომში განზოგადებულია ექსპერიმენტული გამოკვლევების ძირითადი შედეგები, მათ შორის:

- შექმნილია მაღალი ცვეთამედეგობის მქონე ელექტროდი, რომელიც ახდენს ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტური წინააღობის სტაბილიზაციას;
- დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ფიზიკური მოდელი. ის წარმოდგენილია ელექტროდებს შორის დეტალების და მათი კონტაქტების წინააღობების ერთმანეთთან მიმდევრობით-პარალელურად

შეერთების ელექტრული სქემით, რომლის შტოებში ჩართულია ელექტრული ენერჯის წყაროები. წინააღმდეგობის სიდიდეების ცვლით შესაძლებელია დენის დაშუნტვის იმიტაცია სხვადასხვა პირობებისათვის;

- შესწავლილია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას დენის დაშუნტვის თავისებურებანი და მიღებულია შედუღების დენის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულებანი;
- დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მათემატიკური მოდელი;
- შემოთავაზებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების პროცესის პარამეტრების მიხედვით ხარისხის კონტროლის მეთოდი.

დაცვაზე გამოტანილი დებულებები:

- ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელი;
- დენის დაშუნტვის კვლევის მეთოდიკა;
- შედუღების დენის გაანგარიშების მეთოდი;
- ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მათემატიკური მოდელი;
- შედუღების ხარისხის კონტროლის ახალი მეთოდი.

სამუშაოს შედეგების საიმედოობა და დასაბუთება. ნაშრომში გამოყენებულია ელექტროტექნიკის ძირითადი კანონები, ექსპერიმენტული კვლევის და გაზომვების თანამედროვე მეთოდები, კვლევის შედეგების რეგრესიული და სტატისტიკური ანალიზის მეთოდები, რომლებიც განაპირობებენ მიღებული შედეგების მაღალ სიზუსტესა და საიმედოობას.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით ახალი, მაღალმწარმოებლური ავტომატიზირებული კონტროლის მეთოდი.

ის პრაქტიკულად დაინერგული იყო ქუთაისის საავტომობილო ქარხანაში KA3-4540 ავტომობილის ძარის გვერდულას ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთებების კონტროლისათვის.

სამუშაოს აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები წარმოდგენილი იყო რესპუბლიკურ სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციაზე „მაღალეფექტური საშემდუღებლო-დადუღებითი მოწყობილობისა და ტექნოლოგიების დამუშავება და დანერგვა“ (თელავი, 1989); III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციაზე „შედულების პრობლემები საქართველოს სახალხო მეურნეობაში“ (ქუთაისი, 1991); X საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციაზე „შედულების, მეტალურგიის და მონათესავე ტექნოლოგიების პრობლემები“ (ქუთაისი, 2005); ქსტ“შ-ს „მშენებლობის“ კათედრის სამეცნიერო სემინარებზე 2000-2004 წლებში.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემის ირგვლივ გამოქვეყნებულია 8 სამეცნიერო სტატია და მიღებულია საქართველოს პატენტი გამოგონებაზე.

სამუშაოს სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლის, ოთხი თავისა და ძირითადი დასკვნებისაგან. სამუშაო შეიცავს კომპიუტერზე ნაბეჭდ 124 გვერდს, 20 ნახაზს, 10 ცხრილს და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალის 151 დასახელებას.

1. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების სქემები, კონტროლის მეთოდები, კვლევის მიზანი და ამოცანები

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღება, ელექტრორკალური შედუღების შემდეგ, ლითონკონსტრუქციების წარმოებაში გამოყენებული შედუღების ყველაზე უნივერსალური სახეობაა. წარმოებული ლითონკონსტრუქციების 17...20 % მზადდება ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით. იგი ფართოდ გამოიყენება ლითონკონსტრუქციების დასამზადებლად მანქანათმშენებლობაში, სატრანსპორტო საშუალებათა წარმოებაში, სადაც ლითონკონსტრუქციების დასამზადებლად ძირითადად გამოყენებულია საკონსტრუქციო დაბალნახშირბადიანი ფოლადები, ხოლო შედუღების ხარისხის მთავარი მაჩვენებელია შედუღების ადგილის სიმტკიცე ან შედუღების ბირთვის დიამეტრი [118].

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლის მრავალი მეთოდი არსებობს. ყოველ მათგანს აქვს თავისი გამოყენების ოპტიმალური სფერო. დღემდე არ შექმნილა ხარისხის კონტროლის უნივერსალური მეთოდი. არსებობს მთელი რიგი საკითხებისა, დაკავშირებული წერტილოვანი შედუღების პროცესთან, რომელთა შესწავლა აუცილებელია კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლის არსებული მეთოდების სრულყოფისათვის, რასაც ეძღვნება წარმოდგენილი სამუშაო.

1.1. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ძირითადი სქემების დახასიათება

ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღება ძირითადად გამოყენებულია ფურცლოვანი ლითონური მასალისაგან ლითონკონსტრუქციების დასამზადებლად. გავრცელებულია წერტილოვანი ორმხრივი და ცალმხრივი შედუღების სქემები (ნახ.1.1, 1.2, 1.3).

1.1.1. ცალმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემა

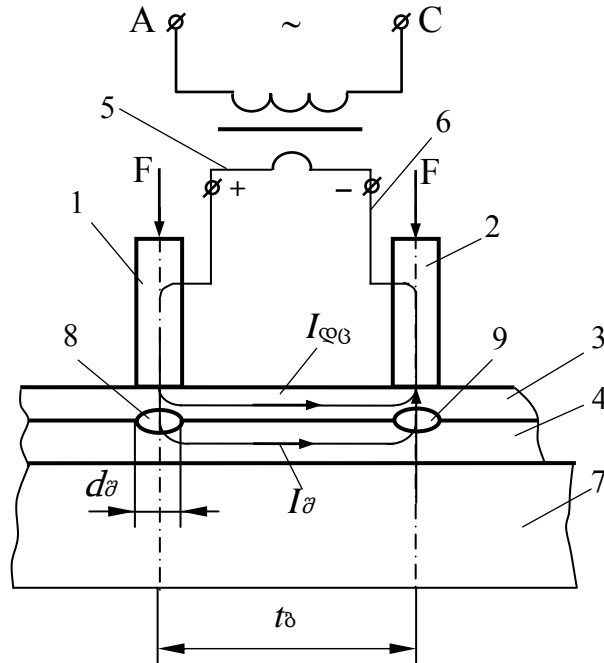
ცალმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემას (ნახ.1.1) იყენებენ ერთ მმ-მდე სისქის ფურცლებისაგან ლითონკონსტრუქციების დამზადებისას. იგი ძირითადად გამოიყენება მცირე ზომის ლითონკონსტრუქციების დამზადებისას ელექტრონიკაში, რადიომრეწველობაში [118,136,137].

წინასწარ აწყობილ შესადუღებელ კონსტრუქციას ათავსებენ კონტაქტური შედუღების დანადგარის მაგიდაზე 7 (ნახ.1.1). შემდეგ შედუღების 1 და 2 ელექტროდებზე მოდებენ F კუმშვის ძალას. ამ უკანასკნელის მოქმედებით ფორმირდება შედუღების ადგილებში საწყისი კონტაქტის ფართი, რომელიც განისაზღვრება ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრით. საწყის მომენტში კონტაქტებს შორის წარმოიქმნება ღრეჩო, რომლითაც ელექტროდებს შორის არეში დეტალების ზედაპირები ერთმანეთისაგან იზოლირებულია. $I_{\#}$ შედუღების დენის გავლით კონტაქტის კონტაქტურ წინაღობაში გამოიყოფა ე.წ. ჯოულ-ლენცის სითბო. შედუღების ადგილის გაცხელებით ლითონის პლასტიკურობა იზრდება და F ძალის მოქმედებით ელექტროდი ახდენს შედუღების ზონის დეფორმირებას. ერთდროულად ლითონი ცხელდება, დნება, დენის შეწყვეტის შემდეგ გამდნარი ლითონი მყარდება და წარმოიქმნება ორივე დეტალისათვის საერთო ლითონის მოცულობა, ე.წ. ბირთვი.

როგორც ვხედავთ, ამ სქემით შედუღების თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ შედუღების ელექტროდები 1 და 2 განლაგებულია შესადუღი დეტალების ერთ მხარეს. ასევე შესადუღი დეტალის ერთ მხარესაა განლაგებული შედუღების კონტური. იგი შედგება ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილისაგან 5, შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილიდან ელექტროდებამდე დენმიმცვანი სადენებისაგან 6, თვით ელექტროდებისაგან 1,2 და ელექტროდებს შორის მოთავსებული შესადუღი დეტალის უბნისაგან.

შედუღების კონტურში შეიძლება გაიაროს ორმა სხვადასხვა დენმა. ერთი მათგანი ქვედა შესადუღი დეტალის 4 გავლით შეკრავს წრედს. იგი შედუღების დენს $I_{\#}$ წარმოადგენს, ხოლო ზედა შესადუღ დეტალში 3 გამავალი დენი $I_{\text{გ}}$ არ მონაწილეობს შედუღების პროცესში და იწვევს ელექტროდებს შორის მოთავსებული

შესადული დეტალის ნაწილის გახურებას, რაც შედულების პროცესისათვის არასასურველი მოვლენაა. აღნიშნულ დენს უწოდებენ დაშუნტვის დენს.



ნახ.1.1. ცალმხრივი წერტილოვანი კონტაქტური შედულების სქემა: 1,2–შედულების ელექტროდები; 3,4–შესადული დეტალები; 5–შედულების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი; 6–შედულების კონტურის სადენები; 7–შესადული მაგიდა; 8,9–შედულების ბირთვები; $d\vartheta$ –ბირთვის დიამეტრი; $I_{\text{ფგ}}$ –დაშუნტვის დენი ზედა დეტალში; I_{ϑ} –შედულების დენი; t_{ϑ} –წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, შედულების კონტურის დენმიმყვან 6 სადენში გამავალი დენი

$$I = I_{\vartheta} + I_{\text{ფგ}}. \tag{1.1}$$

როცა დაშუნტვის დენის სიდიდე $I_{\text{ფგ}} = 0$, მაშინ დენმიმყვანში 6 გაზომილი დენი იქნება შედულების დენი.

შედულების დენის სიდიდე დამოკიდებულია შესადული დეტალების კონტაქტში 9 წინააღობის და შედულების კონტურის სრული წინააღობის სიდიდეზე

$$R = r_{\vartheta} + r_s + x_{\vartheta}. \tag{1.2}$$

შესადული ზედაპირების კონტაქტის r_{ϑ} წინააღობის შემცირების და სტაბილიზირების მიზნით კონტაქტური წერტილოვანი შედულების ტექნოლოგიით გათვალისწინებულია დეტალების ზედაპირების მომზადება მისი ქიმიური საშუალებების დამუშავების გზით. მაგრამ იგი არ გამორიცხავს კონტაქტის

ზედაპირზე ჟანგის აფსკის, ასევე სხვა არადენგამტარი ფენის არსებობას. ამ შემთხვევაში (1.2) გამოსახულებაში შემავალმა r_{ρ} წინალობამ შეიძლება შეადგინოს რამდენიმე ომი და, შედულების კონტურის წინალობის დანარჩენი შემადგენლების მნიშვნელობების მიუხედავად, დენი გაივლის ზედა შესადულ დეტალში 3, რის შედეგადაც ადგილი ექნება დამოკიდებულებას $I_{\rho G} \gg I_{\rho}$. ე.ი. შედულების კონტურში გაივლის პრაქტიკულად მხოლოდ დაშუნტვის დენი. შედულების რეალურ პირობებში ასეთ ექსტრემალურ შემთხვევებს იშვიათად აქვს ადგილი. უფრო ხშირად კონტაქტის წინალობამ r_{ρ} შეიძლება გადააჭარბოს ელექტროდებს შორის მოქცეული შესადული დეტალის უბნის წინალობას

$$r_{\rho} = \rho \frac{t_b}{S_{\rho}}, \quad (1.3)$$

სადაც ρ – შესადული დეტალის ხვედრითი წინალობა;

t_b – შედულების წერტილებს შორის ბიჯია;

S_{ρ} – დეტალის კვეთის ფართი, რომელშიც დენი გადის.

გამოსახულებიდან (1.3) ჩანს რომ დეტალის წინალობის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი t_b -ს გაზრდით შესაძლებელია გაიზარდოს დეტალის უბნის წინალობა, ისე, რომ $r_{\rho} > r_{\rho}$, მაშინ, დენის დაშუნტვის პროცესი იქნება შეზღუდული. ეს ყოველთვის არაა შესაძლებელი. განსაკუთრებით მაშინ, როცა შესადულ კონსტრუქციაში ბიჯის მეტისმეტად გაზრდა დაუშვებელია. ამ შემთხვევაში სახელმწიფო სტანდარტით დადგენილი პარამეტრების (დიამეტრის) მქონე ბირთვის მისაღებად ხელოვნურად ზრდიან I დენს (1.1) გამოსახულებაში. ამით იზრდება როგორც დაშუნტვის $I_{\rho G}$, ასევე შედულების I_{ρ} დენების მდგენელები.

ხარისხიანი შედულების უზრუნველყოფა აღნიშნული გზით დასაშვებია ერთ მმ-მდე სისქის დეტალების შედულებისას, როცა შედულებისათვის საჭირო დენის სიდიდე არ აჭარბებს 3...5 კა-ს. 1 მმ-ზე მეტი სისქის დეტალების შედულებისას, $I_{\rho G}$ დენის შედულების ხარისხზე გავლენის შესუსტებისათვის, შედულების კონტურში გამავალი დენის გაზრდა დაკავშირებულია ენერჯის დიდ დანაკარგებთან, რაც ეკონომიურად გაუმართლებელია. აღნიშნულის გამო შეზღუდულია 1 მმ-ზე მეტი სისქის დეტალების ცალმხრივი სქემით შედულება.

(1.2) გამოსახულებაში r_s და x_k წარმოადგენენ შესაბამისად შედულების კონტურის აქტიურ და რეაქტიულ წინაღობებს.

შედულების კონტურის აქტიური წინაღობის სიდიდეს r_s განსაზღვრავს მისი ცალკეული ელემენტების დამზადებისათვის გამოყენებული მასალის სახეობა და ზომები, აგრეთვე ამ ელემენტების გადაბმის ადგილის გარდამავალი r_g წინაღობები:

$$r_s = r_g + r_g. \quad (1.4)$$

r_g წინაღობა პერიოდულად საჭიროებს კონტროლს და დარეგულირებას.

შედულების კონტურის ერთ-ერთი ელემენტია შესადული დეტალების უბანი, რომელიც მოთავსებულია ელექტროდებს შორის $r_{\text{დ}}$ (ე.წ. დეტალის წინაღობა). ამ უკანასკნელის სიდიდის განმსაზღვრელია t_s შედულების წერტილებს შორის ბიჯი. ბიჯის მეტისმეტი შემცირების შემთხვევაში მცირდება $r_{\text{დ}}$ დეტალის წინაღობა, რომელიც შეიძლება ნაკლები აღმოჩნდეს დეტალებს შორის კონტაქტში $r_{\text{დდ}}$ წინაღობაზე, რის შედეგადაც გაიზრდება დაშუნტვის $I_{\text{დგ}}$ დენი.

შედულების კონტურის ზომებზეა დამოკიდებული მისი რეაქტიული x_r წინაღობა

$$x_r = S^{0,75}, \quad (1.5)$$

სადაც S – შედულების კონტურის მიერ შემოფარგლული ფართია. ამ უკანასკნელის სიდიდე განისაზღვრება შედულების კონტურის ზომებით.

(1.5) გამოსახულების გათვალისწინებით, შეიძლება დავასკვნათ, რომ შედულების კონტურის რეაქტიული წინაღობა დამოკიდებულია შედულების კონტურის ზომებზე.

შედულების კონტურის რეაქტიული წინაღობა განსაზღვრავს შედულების დენსა $I_{\text{წ}}$ და ძაბვას $U_{\text{წ}}$ შორის ძვრის კუთხეს φ , რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შედულებისათვის საჭირო სიმძლავრის სიდიდეზე

$$P = I_{\text{წ}} U_{\text{წ}} \cos \varphi. \quad (1.6)$$

რაც მეტია კონტურის $X_{\text{წ}}$ რეაქტიული წინაღობა, მით მეტია შედულების $I_{\text{წ}}$ დენსა და $U_{\text{წ}}$ ძაბვას შორის ძვრის φ კუთხე და მით მეტია ქსელიდან მოთხოვნილი P სიმძლავრე, რომელიც აუცილებელია მოცემული ზომების მქონე ბირთვის მისაღებად.

ამრიგად, შედუღებისათვის საჭირო ელექტრული ენერჯის სიმძლავრე დამოკიდებულია შედუღების კონტურის ზომებზე. ცალმხრივი სქემით კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას შესაძლებელია მინიმუმამდე იქნას შემცირებული შედუღების კონტურის ზომები, შესაბამისად შესაძლებელია შედუღებისათვის საჭირო სიმძლავრის მინიმუმამდე შემცირება, რაც წარმოადგენს ცალმხრივი სქემის შედუღების უპირატესობას სხვა სქემებთან შედარებით.

ცალმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ:

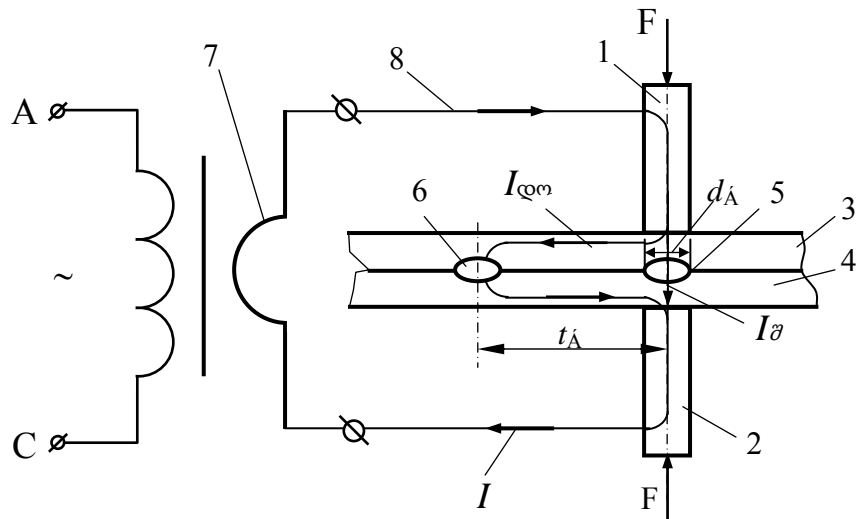
1. შედუღების პროცესში დენის დაშუნტვის შეზღუდვის აუცილებლობის გამო არამიზანშეწონილია 1 მმ-ზე მეტი სისქის დეტალების ცალმხრივი წერტილოვანი სქემით შედუღება;
2. ცალმხრივი სქემის წერტილოვანი შედუღების ენერგეტიკული მახასიათებლები გაუმჯობესებულია, შედუღების კონტურის ზომების მინიმუმამდე შემცირების შესაძლებლობების გამო.

1.1.2. ორმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემა

გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების დამზადებისას გამოყენებულია ორმხრივი წერტილოვანი შედუღება, სადაც შესადული დეტალების ორივე მხარესაა განლაგებული შედუღების ელექტროდები (ნახ.1.2).

ელექტროდებზე მოდებულია F კუმშვის ძალა. შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი 7, შედუღების კონტურის დენმიმცვანი სადენები 8 მიერთებულია შედუღების ელექტროდებთან. დეტალები შედუღების წინ თავსდება აწყობილ მდგომარეობაში ელექტროდებს შორის. ელექტროდებზე კუმშვის F ძალის მოდების შემდეგ შედუღების კონტაქტში ატარებენ დენს. უშუალოდ დეტალების კონტაქტში ელექტროდებს შორის გამავალი დენი $I_{\text{წ}}$ წარმოადგენს შედუღების დენს. დენმა შეიძლება აგრეთვე გაიაროს ადრე შედუღებულ წერტილში $I_{\text{დღ}}$, რომელიც წარმოადგენს დაშუნტვის დენს. მაშინ შედუღების კონტურის დენმიმცვან სადენში გამავალი დენი

$$I = I_{\text{წ}} + I_{\text{დღ}} . \quad (1.7)$$



ნახ.1.2. ორმხრივი წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების სქემა: 1,2–შედუღების ელექტროდები; 3,4–შესადული დეტალები; 5–შედუღების ადგილზე დეტალების კონტაქტის ზედაპირი; 6–შედუღების ბირთვი; 7–შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი; 8–შედუღების კონტურის სადენები; d_A –ბირთვის დიამეტრი; I_{δ} –ორმხრივი შედუღების დაშუნტვის დენი; I_{θ} –შედუღების დენი; I –ტრანსფორმატორის მეორადი კონტურის დენი; t_A –შენადულ წერტილებს შორის ბიჯი.

დაშუნტვის დენის სიდიდე I_{δ} დამოკიდებულია მისი გავლის გზის წინალობისა r_{δ} და დეტალების კონტაქტის ზედაპირის $r_{\delta\delta}$ შორის თანაფარდობაზე.

$$\frac{I_{\delta}}{I} = \frac{r_{\delta\delta}}{r_{\delta}}, \text{ აქედან}$$

$$I_{\delta} = \frac{r_{\delta\delta}}{r_{\delta}} \cdot I. \quad (1.8)$$

(1.8) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ორმხრივი სქემით წერტილოვანი შედუღებისას დაშუნტვის დენის შემცირება შეიძლება $r_{\delta\delta}$ წინალობის შემცირებით და r_{δ} წინალობის გაზრდით. ეს უკანასკნელი შეიძლება განხორციელდეს შედუღებულ წერტილებს შორის ბიჯის გაზრდით. ამ გზით შესაძლებელია დაშუნტვის დენის შემადგენლის (1.5) შემცირება მინიმუმამდე. თუმცა $r_{\delta\delta}$ წინალობის გაზრდა არაა გამორიცხული შედუღების ცალკეულ შემთხვევებში შესადული დეტალების წინასწარი მომზადების ტექნოლოგიის სრული დაცვის შემთხვევაშიც, რადგანაც არაა

გამორიცხული კონტაქტის ადგილას მოხვდეს ჟანგის ან არადენგამტარი სხვა თხელი აფსკი. ამ შემთხვევაში $r_{\text{გლ}} \gg r_{\text{გ}}$ და დენის დაშუნტვის პროცესი გარდაუვალია, რასაც თან ახლავს შედუღების ბირთვის დიამეტრის შემცირება ან საერთოდ არარსებობა.

როგორც აღნიშნული იყო ცალმხრივი სქემით წერტილოვანი შედუღებისას შედუღების კონტურის ზომები არაა დამოკიდებული შესადული კონსტრუქციის ზომებზე. ორმხრივი სქემით წერტილოვანი შედუღებისას გაბარიტები შესადუღებელი კონსტრუქციისა, რომელიც შედუღებისას მოთავსებულია შედუღების კონტურში, განსაზღვრავს ამ უკანასკნელის ზომებს. შესაბამისად გაბარიტული კონსტრუქციების შედუღებისას, შედუღების კონტურის მიერ შემოფარგლული ფართი გაზრდილია; შესაბამისად იზრდება შედუღების კონტურის რეაქტიული წინაღობა

$$x_{\text{თ}} = K_{\text{თ}} S_{\text{თ}}^{0.75}, \quad (1.9)$$

სადაც $S_{\text{თ}}$ – ორმხრივი წერტილოვანი შედუღებისას შედუღების კონტურის მიერ შემოფარგლული ფართია.

წერტილოვანი შედუღებით მიღებული კონსტრუქციების უმრავლესობა ფერომაგნიტური ფურცლოვანი ფოლადებისაგან მზადდება. როგორც ცნობილია, შედუღების კონტურში ფერომაგნიტური მასალის შეტანით მნიშვნელოვნად იზრდება მისი რეაქტიული წინაღობა. აღნიშნულს ითვალისწინებს (1.9) გამოსახულებაში $K_{\text{თ}}$ კოეფიციენტი ითვალისწინებს ფერომაგნიტური მასალის არსებობას.

ამრიგად, ფერომაგნიტური მასალისაგან ლითონკონსტრუქციების შედუღებისას, შედუღების კონტურის რეაქტიულ წინაღობაზე მოქმედებს არა მარტო შედუღების კონტურის გაბარიტული ზომები, არამედ კონტურში მოთავსებული კონსტრუქციის ზომებიც.

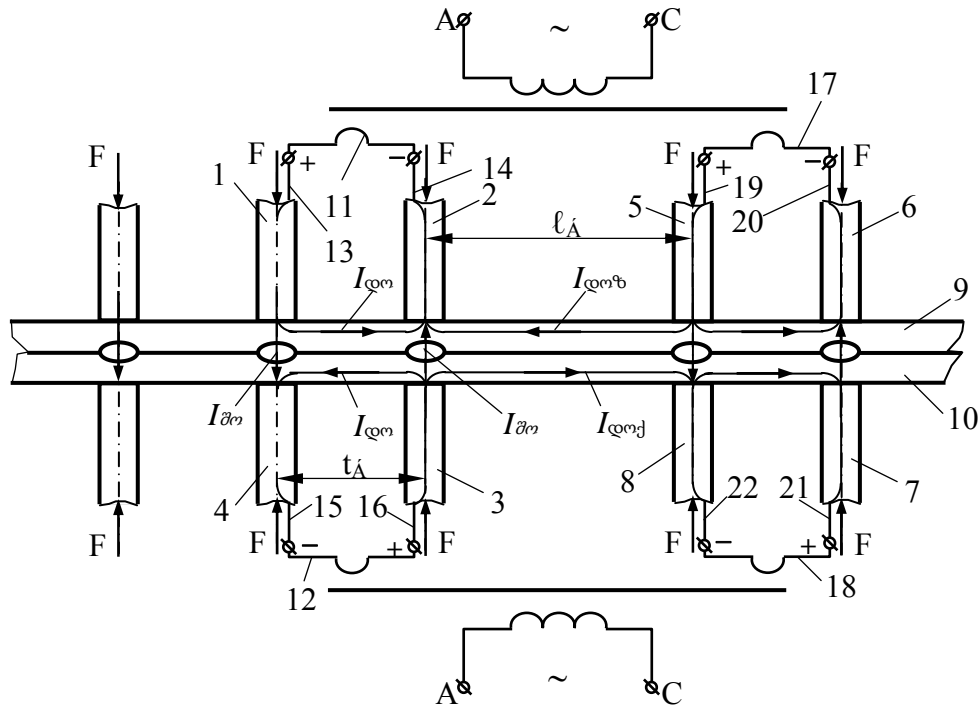
როგორც (1.6) გამოსახულებიდან ჩანს, ზემოთ აღნიშნულის გამო ორმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემით ლითონკონსტრუქციის დამზადებისას მნიშვნელოვნად იზრდება შედუღების დენსა და ძაბვას შორის ძვრის კუთხე და შესაბამისად შედუღებისათვის საჭირო სიმძლავრე.

ამრიგად, გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი წერტილოვანი შედუღება, ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუარესების გამო მიუღებელია. თანაც მოუხერხებელია შედუღების პროცესის ავტომატიზაცია.

აღნიშნულის გამო, გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების წარმოებაში გავრცელება ჰპოვა ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების სქემამ (ნახ.1.3).

1.1.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების სქემა

ნახ.1.3-ზე მოცემულია გაბარიტული ლითონკონსტრუქციის ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების სქემის ფრაგმენტი [10,11,118].



ნახ.1.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების სქემა: 1...8-შედუღების ელექტროდები; 9,10-შესადული დეტალები; 11,12,17,18-შედუღების ზედა და ქვედა ტრანსფორმატორები; 13,14,15,16,19,20,21,22-შედუღების ზედა და ქვედა კონტურები; t_a -ელექტროდებს შორის ბიჯი; l_a -წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი; F- ელექტროდების კუმშვის ძალა; $I_{შო}$ -შედუღების დენი; $I_{დოზ}$ -დაშუნტვის დენი ზედა დეტალში; $I_{დო}$ -დაშუნტვის დენი დეტალში; $I_{დოქ}$ -დაშუნტვის დენი ქვედა დეტალში.

ელექტროდები განლაგებულია შესადული დეტალების ორივე მხარეს. ერთ ღერძზე მდებარე ზედა და ქვედა თითო წყვილი ელექტროდით სწარმოებს ერთი

წერტილის შედუღება. ჩვეულებრივი ორმხრივი წერტილოვანი შედუღების სქემისაგან განსხვავებით, შედუღების ერთიდაიგივე ტრანსფორმატორის ორი მეორადი გრაგნილი ერთმანეთთან მიმდევრობით არიან შეერთებული დეტალების ორივე მხარეს განლაგებული ორი წყვილი 1,4 და 2,3 ელექტროდების საშუალებით. ერთმანეთის ღერძებზე განლაგებულია ორი წყვილი ელექტროდი ქმნის შედუღების კონტურს. ნახ.1.3-ზე ნაჩვენებ სქემაზე მარცხენა შედუღების კონტურში შედის 1,2,3,4 ელექტროდები, შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი 11,12 გრაგნილები და წყვილელექტროდებს შორის განლაგებული 9,10 შესადული დეტალების ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრით შემოსაზღვრული ნაწილი. მარჯვენა შედუღების კონტურში შედის: 5,6,7,8 ელექტროდები; შედუღების ტრანსფორმატორის 17,18 მეორადი გრაგნილები; 5,6, და 7,8 წყვილელექტროდებს შორის არსებული შესადული დეტალების ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრით შემოსაზღვრული ნაწილი; იგულისხმება, რომ აღწერილი 19,20 და 21,22 მარჯვენა და მარცხენა შედუღების კონტურების გვერდით მდებარეობენ მსგავსი კონფიგურაციის შედუღების კონტურები, რომლებიც პირობით ნახ.1.3-ზე არაა ნაჩვენები. ამ შედუღების კონტურთა რაოდენობა დამოკიდებულია შესადულ კონსტრუქციაზე და მისი დამზადებისათვის საჭირო წერტილების რაოდენობაზე. შედუღების დენი გადის ელექტროდებში შემდეგი თანმიმდევრობით 1,4, შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი 12, ელექტროდები 3,2 და შედუღების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი 11. შედუღების დენი გაივლის წყვილელექტროდებზე F მკუმშავი ძალის მოქმედების ქვეშ მყოფი შესადული დეტალების კონტაქტში. ათბობს მას, ახდენს მის ერთდროულ დეფორმაციას, ადნობს ორივე დეტალის ზედაპირებს, მათი კრისტალიზაციის შემდეგ ფორმირდება შედუღების ბირთვი, რომელიც წარმოადგენს ორივე დეტალისათვის ლითონის საერთო მოცულობას.

თუ წარმოვიდგენთ, რომ ჟანგის აფსკი შემთხვევით მოხვდა 1,4 და 2,3 ელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალების კონტაქტებში, მაშინ შესაძლებელია $I_{ღობ}, I_{ღოქ}$ დენებმა გაიაროს, შესაბამისად, ზედა და ქვედა შესადულ დეტალებში. ამ შემთხვევაში, ამ დენების გავლის გზა შემდეგია. $I_{ღობ}$ დენისათვის: ტრანსფორმატორის 11 მეორადი გრაგნილი, 13 დენმიმყვანი სადენი; 1 შედუღების

ელექტროდი; 2 შედულების ელექტროდი და ამ ელექტროდებს შორის მდებარე 9 შესადული დეტალის ნაწილი; 14 დენმიმყვანი სადენი.

$I_{\text{დოქ}}$ დენისათვის: შედულების ტრანსფორმატორის 12 მეორადი გრაგნილი; დენმიმყვანი 16 სადენი; შედულების 3,4 ელექტროდები და მათ შორის მდებარე 10 შესადული დეტალის ნაწილი: დენმიმყვანი 15 სადენი.

$I_{\text{დოზ}}$ და $I_{\text{დოქ}}$ დენები გადიან მისაღები შედულების ბირთვის გარეთ, ამიტომ არ მონაწილეობენ შედულების პროცესში და ისინი წარმოადგენენ დაშუნტვის დენებს.

როგორც შედულების ტექნიკაში მიღებულია, შედულების დენის გაზომვას ახდენენ ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილიდან ელექტროდამდე დენმიმყვან სადენში; აღნიშნულ შემთხვევაში, 1,2,3,4 ელექტროდებთან მიერთებულ რომელიმე დენმიმყვან სადენებში 13,14,15,16 გაზომილი დენი აღმოჩნდება შედულების დენის ნაცვლად დაშუნტვის $I_{\text{დოზ}}$ და $I_{\text{დოქ}}$ ზედა და ქვედა კონტურში გამავალი დენები.

ჩვენ განვიხილეთ ექსტრემალური შემთხვევა, როცა ერთ ღერძზე განლაგებული 1,4 და 3,4 ელექტროდების ქვეშ მდებარე დეტალების კონტაქტის ადგილის წინაღობა იმდენად დიდი შეიძლება გამხდარიყო, რომ დენი საერთოდ არ გაეტარებია. პრაქტიკულად, ხშირ შემთხვევაში აღნიშნული კონტაქტის წინაღობა შეიძლება შედულებისას მეტი აღმოჩნდეს, ვიდრე ელექტროდებს 1,2 და 3,4 შორის მოთავსებული შესადული დეტალის ნაწილის წინაღობაა. ამ შემთხვევაში წინაღობების თანაფარდობის შესაბამისი თანაფარდობით გადანაწილდება კონტაქტში გამავალი შედულების $I_{\text{შო}}$ დენი და დეტალში გამავალი $I_{\text{დოზ}}$ და $I_{\text{დოქ}}$ დაშუნტვის დენები. შედულების და დაშუნტვის დენების შესაბამისი თანაფარდობა აღმოჩნდება დენმიმყვან სადენებში გაზომილ დენში.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულებისას უფრო ხშირად შესაძლებელია ერთ-ერთ წყვილელექტროდს შორის არსებული შესადული დეტალების კონტაქტის ზედაპირი აღმოჩნდეს დაფარული ჟანგის ან სხვა არადენგამტარი აფსკით. ამ შემთხვევაში მხოლოდ ამ ელექტროდებით მოცული დეტალების კონტაქტში არ გაივლის შედულების დენი. თუ ასეთი დენგამტარი აფსკი აღმოჩნდება 1,4 წყვილელექტროდებზე მოსული შესადული დეტალების კონტაქტის ადგილას, მაშინ შესაძლებელია დენის გავლა ამ კონტაქტური ზედაპირის გვერდის ავლით შემდეგი გზით: შედულების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილიდან 11 შედულების

ელექტროდამდე 13 დენმიმცვანი სადენი; შედულების ელექტროდი 1; შესადული დეტალი 9; შესადული დეტალების 9,10 კონტაქტი; შესადული დეტალის 10 ნაწილი, რომელიც მოთავსებულია 3,8 ელექტროდებს შორის; შედულების ელექტროდი 8; დენმიმცვანი 22; შედულების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი 18; დენმიმცვანი სადენი 21; შედულების ელექტროდი 7; 9,10 დეტალებს შორის კონტაქტი; შედულების ელექტროდი 6; დენმიმცვანი სადენი 20; მეორადი გრაგნილი 17; დენმიმცვანი სადენი 19; ელექტროდი 5; შესადული დეტალი 9; შედულების ელექტროდი 2; დენმიმცვანი სადენი 14; შედულების ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი 11. აღნიშნული გზით გამავალი დენი $I_{\text{გო23}}$ იქნება შედულების დენი. 2,3 ელექტროდებით შესადული 9,10 დეტალების კონტაქტის ზონაში გავლისას, ხოლო იგი იქნება დაშუნტვის დენი 1,4 ელექტროდით შექმნილი ბირთვისათვის. $I_{\text{გო23}}$ დენის გაზომვა შეიძლება 13 დენმიმცვან სადენში.

ზემოთ განხილულის ანალოგიურად შეიძლება შედულების სხვადასხვა პირობების დასახელება, როცა დაშუნტვის დენის გავლის სხვადასხვა გზები იქნება.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების წარმოდგენილი სქემის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნები:

1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების სქემა დიდი გაბარიტის მქონე ლითონკონსტრუქციების შედულებისას სხვა განხილული სქემებისაგან განსხვავებით გამოირჩევა მაღალი ენერგეტიკული მახასიათებლებით, შედულების პროცესის ავტომატიზაციის დიდი შესაძლებლობით.
2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულებისას დენის დაშუნტვის რთულ შემთხვევებთან გვაქვს საქმე.
3. შედულების დენის რეალური მნიშვნელობის გაზომვა შედულების ტექნიკაში მიღებული მეთოდებით შეუძლებელია. აგრეთვე, შეუძლებელია დაშუნტვის დენის სიდიდის უშუალო კონტროლი.

აღნიშნულ დასკვნებს შეიძლება დაემატოს ის, რომ ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულებისას დენის დაშუნტვის პირობები დღემდე შეუსწავლელია.

1.2. ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის მეთოდების ანალიზი

პროდუქციის ხარისხის ქვეშ გულისხმობენ მისი თვისებების ერთიანობას, რომლებიც უზრუნველყოფენ პროდუქციის ვარგისიანობას დააკმაყოფილოს მისი დანიშნულების შესაბამისი გარკვეული მოთხოვნები.

შესადული კონსტრუქცია უმეტეს შემთხვევაში ცალკე არ წარმოადგენს მოხმარების პროდუქტს. იგი ერთ-ერთი ძირითადი შემადგენელია მზა პროდუქტის შემადგენლობაში. მაგალითად, მსუბუქი ავტომობილის კორპუსი წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების შედეგია; იგი ავტომობილის აუცილებელი და ძირითადი ნაწილია. მის გარეშე წარმოადგენელია ავტომობილმა შეასრულოს თავისი ფუნქცია. ე.ი. შენადული კონსტრუქცია განმსაზღვრელია მზა პროდუქციის ხარისხისა, ამის გამო შენადული კონსტრუქციის ხარისხის უზრუნველყოფა ერთ-ერთი მთავარი ტექნოლოგიური მოთხოვნაა.

შენადული კონსტრუქციის ხარისხისადმი შეიძლება წაყენებული იქნას სხვადასხვა მოთხოვნები. ეს დამოკიდებულია იმ პროდუქციისადმი წაყენებულ მოთხოვნებზე, რომლის შემადგენლობაშიც შენადული კონსტრუქცია შედის. მაგალითად, ელექტრონიკაში შენადული კონსტრუქციის ხარისხისადმი წაყენებული მოთხოვნები სულ სხვაა, ვიდრე მანქანათმშენებლობაში. ელექტრონიკაში შენადულ კონსტრუქციას გარდა სიმტკიცისა მოეთხოვება: შედუღებული ზედაპირის სისუფთავე და კოროზიამედეგობა; შედუღების დროს დაუშვებელია ამომხეფვა და ელექტროდით შედუღების ადგილის მეტისმეტი ჩათეღვა. მაშინ, როცა მანქანათმშენებლობაში, კერძოდ, საავტომობილო მრეწველობაში კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით მიღებულ შენადულ შეერთებას მოეთხოვება მხოლოდ სიმტკიცე.

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით მიღებული შეერთების სიმტკიცე შეიძლება შეფასებული იქნას მისგან დამზადებული ნიმუშების გაჭიმვაზე გამოცდით. ასევე, სიმტკიცის შეფასებისათვის სარგებლობენ ისეთი პარამეტრით, როგორცაა ბირთვის დიამეტრი. სტანდარტით განსაზღვრულია შესადული ადგილის სისქის მიხედვით ბირთვის დიამეტრის სიდიდე, რომელიც უნდა უზრუნველყოს დამუშავებულმა ტექნოლოგიამ. კარგად დამუშავებული შედუღების

ტექნოლოგიის ამოცანაა, შექმნას შედუღების ისეთი ტექნოლოგიური პროცესი, რომელიც შედუღებისას უზრუნველყოფს სტანდარტით განსაზღვრული ბირთვის დიამეტრს.

დღეისათვის მიღწეულია წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ტექნოლოგიის მაღალი დონე და ამ ტექნოლოგიის რეალიზაციის მაღალსაიმედო დანადგარები. მიუხედავად ამისა, როგორც ყოფილ საბჭოთა კავშირში, ასევე მის ფარგლებს გარეთაც ერთ-ერთი მთავარი ტექნოლოგიური ოპერაციაა შედუღების ხარისხის კონტროლი. კონტაქტური წერტილოვანი შენადული ლითონკონსტრუქციების კონტროლის უნივერსალური მეთოდი დღემდე არ შექმნილა. არსებობს კონტროლის მრავალი მეთოდი, რომელთაც აქვთ თავიანთი გამოყენების უპირატესი სფეროები [20,44,98,105,146,148].

1.2.1. შედუღების ხარისხის კონტროლის სტატისტიკური მეთოდი

შედუღების ხარისხის კონტროლის მიზანია უზრუნველყოს ლითონკონსტრუქციების დამზადების ხარისხის საჭირო დონე. ხარისხის დონეში იგულისხმება წუნდებული შენადული კონსტრუქციების რაოდენობა შეფარდებული წარმოებული პროდუქციის მთელ მოცულობასთან. ცხადია, ხარისხის საჭირო დონე დანიშნული უნდა იქნას ტექნოლოგიური პროცესის დონის შესაბამისად. თუ ტექნოლოგიური დონე ვერ უზრუნველყოფს ხარისხის დანიშნულ მისაღებ დონეს, მაშინ წუნდებული პროდუქციის წილი გაიზრდება და წარმოება გახდება არარენტაბელური [54,57,80,142,149].

ხარისხის მისაღები დონის განსაზღვრისათვის აგროვებენ სტატისტიკურ მონაცემებს, მაგალითად, ერთი წლის განმავლობაში წუნდებული პროდუქციის რაოდენობის შესახებ, და საზღვრავენ ხარისხის საშუალო დონეს:

$$\bar{q} = \frac{n_q}{n_\Sigma}, \quad (1.10)$$

სადაც n_q – წუნდებული პროდუქციის რაოდენობაა;

n_Σ – წლის განმავლობაში გამოსული პროდუქციის რაოდენობაა.

ხარისხის საშუალო დონის საფუძველზე, ГОСТ20736-75 [76] მიხედვით ირჩევენ ხარისხის მისაღებ q_0 დონეს. შენადული ლითონკონსტრუქციის ხარისხის წუნდების დონეს აიღებენ

$$q_m = 3q_0. \quad (1.11)$$

ხარისხის საჭირო დონის უზრუნველყოფის მიზნით, გამოყენებულია შენადული კონსტრუქციის შერჩევითი დაშლადი კონტროლის მეთოდი. შერჩევითი კონტროლის პროცედურა მდგომარეობს შემდეგში: საკონტროლო ნაკეთობა იყოფა პარტიებად. საკონტროლო პარტიის მოცულობა N დამოკიდებულია შენადული კონსტრუქციის ღირებულებაზე. თუ კონსტრუქციის ღირებულება დიდია, მაშინ ცდილობენ საკონტროლო პარტიის მოცულობა N აიღონ დიდი. განვიხილოთ ქუთაისის საავტომობილო ქარხნის პროდუქციის ხარისხის კონტროლის მაგალითი, შერჩევითი კონტროლისათვის კონტაქტური მრავალწერტილოვანი შედუღებით დამზადებული სატვირთო КА3-4540 ავტომობილის ძარას ერთ გვერდულას შეირჩევენ 4 ცვლიდან. თითო ცვლაში ამზადებდნენ 50 გვერდულას. ე.ი. საკონტროლო პარტიის მოცულობა შეადგენდა $N=200$ ცალს, ხოლო შემთხვევითი შერჩევა იყო $n=1$ ცალი. გვერდულას გაბარიტული ზომებია 8000 მმ×1200 მმ-ზე. მის დასამზადებლად სრულდებოდა 240 შენადული წერტილი. ერთდროულად სრულდებოდა 12 შენადული წერტილი. თითოეული წერტილის შედუღების დრო შეადგენდა 0,8 წმ-ს, ხოლო გვერდულას აწყობაზე და შედუღებაზე იხარჯებოდა 20 წთ. კონტროლისათვის შერჩეულ გვერდულადაც ალბათური წესით შეარჩევდნენ შედუღებული წერტილების 4 %-ს. თითოეული წერტილის სიმტკიცეზე მექანიკური გამოცდის მიზნით ამოჭრიდნენ ნიმუშს და ცდიდნენ გამჭიმავ მანქანაზე MP-500YXJ14; ნიმუშების ამოჭრისათვის და გამოცდისათვის საჭირო იყო 2 სთ. თითოეული გვერდულას წონა შეადგენდა 120 კგ-ს. გამოცდის შემდეგ შენადული კონსტრუქცია უვარგისი ხდებოდა შემდგომი ექსპლუატაციისათვის.

თუ გამოცდილი ნიმუშის სიმტკიცე აღმოჩნდებოდა 500 ნ-ზე მეტი, იგი ჩაითვლებოდა ხარისხიანად. წინააღმდეგ შემთხვევაში შენადული წერტილი ჩაითვლებოდა წუნდებულად. თუ წუნდებული შედუღებული წერტილების რიცხვი შერჩევაში არ აღემატებოდა 12 %-ს, მაშინ შენადული კონსტრუქცია, საიდანაც შეარჩიეს საცდელი ნიმუშები, ჩაითვლებოდა ხარისხიანად, რაც იმის მაჩვენებელი

იყო, რომ 4 ცვლაში დამზადებული ყველა გვერდულა ჩაითვლებოდა ხარისხიანად, ხოლო მისი დამზადების ელექტროკონტაქტური მრავალწერტილოვანი შედუღების ტექნოლოგიის დონე წარმოებისათვის მისაღებად. რადგანაც წელიწადში ავტოქარხანა ამზადებდა 20000 ავტომობილს, რომლისთვისაც საჭირო იყო ძარას 40000 გვერდულას დამზადება და გამოცდისათვის წელიწადში შეირჩეოდა 200 გვერდულა. კონტროლის ოპერაციის დანახარჯები შეადგენდა:

– გამოცდილი გვერდულას საერთო წონა

$$m = 200 \times 120 = 24000 \text{ კგ} = 24 \text{ ტ};$$

– კონტროლის ოპერაციაზე დახარჯული საერთო დრო

$$t = 200 \times 2 = 400 \text{ სთ.}$$

ამრიგად, წერტილოვანი შედუღებით დამზადებული გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ხარისხის კონტროლის შერჩევითი დაშლადი გამოცდის მეთოდი დაკავშირებულია დიდ მატერიალურ დანაკარგებთან. ამასთანავე კონტროლის ოპერაციაზე დახარჯული დრო 6-ჯერ აღემატება ლითონკონსტრუქციის შედუღებაზე დახარჯულ დროს.

1.2.2. ლითონკონსტრუქციების წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის დაუშლელი კონტროლის მეთოდები

წერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღებით ლითონკონსტრუქციების წარმოებაში ფართო გავრცელება ჰპოვა დაუშლელი კონტროლის აქტიურმა და პასიურმა მეთოდებმა [12,45,57,129,142,145,146].

შედუღების ხარისხის პასიური კონტროლის შემთხვევაში ხდება შენადული შეერთების დახარისხება ვარგისად და უვარგისად, რაც პრაქტიკულად ხორციელდება ხარისხის შესახებ ინფორმაციის მატარებელი პარამეტრის შედარებით მის წინასწარ (ექსპერიმენტულად ან თეორიულად) განსაზღვრულ მისაღებ დონესთან.

შედუღების ხარისხის აქტიური კონტროლი გულისხმობს შედუღების პროცესის მართვას ისე, რომ უზრუნველყოფილი იქნას ხარისხიანი შენადული შეერთების მიღება. რისთვისაც შედუღების პროცესის ხარისხის მართვის სისტემას

გააჩნია უკუკავშირი ხარისხის შესახებ ინფორმაციის მატარებელი პარამეტრის მიხედვით. შედეგების რეჟიმზე ზემოქმედება ხორციელდება ერთ-ერთი ადვილად რეგულირებადი შედეგების რეჟიმის პარამეტრზე, რომელიც მნიშვნელოვნად მოქმედებს შენადული შეერთების ფორმირების ხარისხზე.

აქტიური კონტროლის სისტემების გამოყენება მიზანშეწონილია შედარებით დაბალი და საშუალო მისაღები დონის მქონე შედეგების ტექნოლოგიურ პროცესში.

მაღალი ხარისხის მისაღები დონის მქონე ლითონკონსტრუქციების წარმოებაში მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნას პასიური კონტროლის სისტემები.

კონტაქტური წერტილოვანი შენადული ლითონკონსტრუქციების წარმოებაში გამოყენებულია ხარისხის კონტროლის როგორც აქტიური, ასევე პასიური კონტროლის შემდეგი მეთოდები:

1. კონტროლის ფიზიკური მეთოდები. ასეთია: რენტგენული, ულტრაბგერითი, ელექტრომაგნიტური, ემისიური და სხვა.
2. კონტროლის მეთოდი შედეგების პროცესის პარამეტრების და მათემატიკური მოდელის მიხედვით.

1.2.2.1. რენტგენული კონტროლი

რენტგენის სხივით კონტროლის მეთოდი [77,91,143] ემყარება იმას, რომ შედეგების ზონაში სხივის გავლის ინტენსივობა დამოკიდებულია გამოსხივების ტალღის სიგრძეზე, შესადულებელი დეტალის სისქეზე და შესადულებელი მასალის ატომურ წონაზე.

შესადულებელი მასალის თვისებებიდან გამომდინარე, დღეისათვის წერტილოვან კონტაქტურ შედეგებაში ხარისხის კონტროლისათვის გამოყენებულია კონტროლის ორი ვარიანტი:

1. რენტგენოსკოპია, რომლის დროსაც შედეგების ზონაში გადნობის საზღვრების (ბირთვის დიამეტრის განსაზღვრისათვის) დადგენა ხდება შესადულებელ მასალაში არსებული ელემენტების გადანაწილების შედეგად.

2. რენტგენოსკოპია, რომლის დროსაც გადნობის საზღვრის დადგენის მიზნით შედუღების ზონაში წინასწარ შეჰყავთ რენტგენოკონტრასტული მასალა.

პირველ შემთხვევაში ბირთვის ლითონის კრისტალიზაციის პროცესში, მის საზღვარზე გამდნარ ბირთვში არსებული გაუმდნარი ნაწილაკების ან ლიკვაციური პროცესების შედეგად იქმნება ქიმიურად არაერთგვაროვნება, რაც შედუღების ბირთვში რენტგენის სხივის გატარებისას იწვევს რენტგენის სხივის გავლის ინტენსივობის შეცვლას. რენტგენოგრამაზე ჩნდება სპეციფიკური ნათელჩაბნელებული სურათი, რომლის მიხედვითაც ადვილია დადგენილი იქნას ლითონის გადნობის საზღვრები. ერთნაირი სისქის დეტალების კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას ეს პარამეტრი ახასიათებს აგრეთვე ლითონის გადნობის სიღრმეს.

მეორე ვარიანტით კონტროლისას. დეტალების ურთიერთგადნობის ზონის საზღვრის გამოვლენა ხდება დეტალების ზედაპირების შედუღებამდე ხელოვნურად დაფარული ლითონის საშუალებით, რომლის შემადგენლობაში შედიან მძიმე ელემენტები. შედუღების პროცესში რენტგენოკონტრასტული ფენა შესადუღებელ დეტალთან ერთად ნაწილობრივ ან მთლიანად დნება და ერევა ბირთვში.

ლითონკონსტრუქციების კონტაქტური წერტილოვანი შედუღება შეიძლება განხორციელდეს მყარ და თხევად ფაზაში. რენტგენის სხივით კონტროლის ზემოთ აღწერილი პრინციპიდან გამომდინარე, აღნიშნული მეთოდი შეუძლებელია გამოყენებული იქნას მყარ ფაზაში შედუღებისას.

რენტგენის სხივით კონტროლის მეთოდისათვის დამახასიათებელია კონტროლის ოპერაციაზე დიდი ხარჯები, რაც ძირითადად დაკავშირებულია რენტგენოკონტრასტული მასალის და რენტგენული კონტროლის დანადგარების სიძვირით და უსაფრთხოების სპეციალური პირობების დაცვის საჭიროებასთან.

შედუღების ტექნიკაში კონტაქტური წერტილოვანი შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის რენტგენის მეთოდი გამოიყენება ისეთი კონსტრუქციების წარმოებისას, რომელთა ხარისხისადმი წაყენებული მოთხოვნები განსაკურებულია. ამ შემთხვევაში აუცილებელია ხარისხის კონტროლის შედეგის დაფიქსირება საჭირო ფორზე და შენახვა.

რენტგენული კონტროლი ფართოდ გამოიყენება თვითმფრინავმშენებლობაში. შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის ფირები ინახება თვითმფრინავის საექსპლუატაციო რესურსების ამოწურვამდე. მანქანათმშენებლობაში გამოყენებული შენადული კონსტრუქციებისათვის რენტგენული კონტროლის მეთოდის გამოყენება ეკონომიკური თვალსაზრისით მიუღებელია.

1.2.2.2. ულტრაბგერითი კონტროლი

ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის ულტრაბგერითი რხევებით კონტროლი [23,26,70,84,91 და სხვა] გავრცელებულია ტექნიკის მრავალ დარგში. ეს რხევები ლითონის თხევად ფაზაში და პლასტიკურ მდგომარეობაში მყოფ ლითონში გავლისას მიიღევა სხვადასხვა ხარისხით. ამ უკანასკნელის მიხედვით საზღვრავენ შედუღების ზონაში გამდნარი ლითონის მოცულობას (ბირთვის დიამეტრს), რაც შედუღების ხარისხის ერთ-ერთი ძირითადი მაჩვენებელია.

კონტაქტურ წერტილოვან შედუღებაში გამოყენებულია ულტრაბგერითი კონტროლის შემდეგი სახეობები:

1. არეკვლის მეთოდი ერთი მგრძნობიარე ელემენტით;
2. განჭოლვის მეთოდი ორი მგრძნობიარე ელემენტით;
3. არეკვლის და განჭოლვის მეთოდი ერთი მგრძნობიარე ელემენტით.

1 მმ-ზე ნაკლები სისქის დეტალების, აგრეთვე მცირე გაბარიტის მქონე კონსტრუქციების შედუღებაში ხარისხის შეფასებისას ულტრაბგერითი კონტროლის მეთოდების ჩვეულებრივი სქემით გამოყენება გამწვანებულია. აღნიშნულ შემთხვევაში შედუღების ხარისხის კონტროლის მიზნით მაღალსიხშირულ რხევებს ატარებენ კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების მანქანის დენმიმყვან ელემენტებში [26]. ამ სქემით ულტრაბგერითი კონტროლით კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის შეფასების საიმედოობა დამოკიდებულია შესადუღებელ დეტალებს შორის კონტაქტზე და შედუღების რეჟიმის ისეთ პარამეტრებზე როგორცაა დეტალებზე შესადული ელექტროდის დაწნევის ძალა. ამ უკანასკნელის შეცვლით, იცვლება კონტაქტის ფართი როგორც შესადულ დეტალებს შორის, ასევე

ელექტროდსა და დეტალს შორის. აღნიშნული ფართების ცვლა მოქმედებს ულტრაბგერის გატარების ინტენსივობაზე, რაც შეიძლება წარმოადგენდეს მცდარ ინფორმაციას შედუღების ხარისხის შესახებ. ამის გამო უარესდება შედუღების ხარისხის კონტროლის საიმედოობა, ამიტომ კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლისათვის ულტრაბგერითი კონტროლის მეთოდის გამოყენება შეზღუდულია და ვერ ჰპოვა ფართო პრაქტიკული გამოყენება.

1.2.2.3. ელექტრომაგნიტური და ემისიური კონტროლის მეთოდები

კონტაქტური შედუღების სფეროში გამოყენებული შედუღების ხარისხის კონტროლის ელექტრომაგნიტური მეთოდებიდან [51,53,82,84,119] შეიძლება გამოვყოთ ორი ხერხი:

1. საკონტროლო შენადული შეერთების დამაგნიტება ფანტვის მაგნიტური ნაკადის გავლენით;
2. საკონტროლო შენადული შეერთების ზონაში ფუკოს დენების აღძვრა ლითონის ელექტროგამტარობის შეფასებით.

მეთოდი ემყარება შენადული შეერთების ზონაში ლითონის ფიზიკური თვისებების შეცვლას, კერძოდ, შედუღების ზონაში ლითონის ელექტროგამტარობის შემცირებას ძირითად (შესადუღებელ) მასალასთან შედარებით. სასარგებლო (ხარისხის შესახებ ინფორმაციის მატარებელი) სიგნალის სიდიდე, რომელიც ახასიათებს შესადუღებელი დეტალების საერთო ზონას (ბირთვის), დამოკიდებულია არა მარტო შედუღების ზონის ელექტროწინააღობის ცვლილებაზე, არამედ შესადული დეტალის სისქეზე, შედუღების ადგილის ფორმაზე, დეტალის ზედაპირზე შედუღების ელექტროდისაგან ჩათეღვის სიდიდეზე და სხვა ფაქტორებზე, რომლებიც არ რჩებიან მუდმივი სიდიდის ხარისხის შესამოწმებელი თითოეული შედუღების ადგილისათვის. აღნიშნულის გამო იცვლება შედუღების ხარისხის შეფასების საიმედოობა; ხშირ შემთხვევაში იგი დაბალია, ამიტომ ელექტრომაგნიტურმა მეთოდებმა კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებით მიღებული შენადული კონსტრუქციების ხარისხის კონტროლისათვის ვერ ჰპოვა პრაქტიკული გამოყენება.

ბოლო დროს ქვეყნდება გამოკვლევები კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის ემისიური მეთოდით კონტროლის შესახებ [84].

მყარი სხეულების დეფორმაციის დროს ადგილი აქვს დრეკადი ტალღების წარმოქმნას, რომლებიც იწვევენ ბგერით რხევებს. წერტილოვანი შედუღების დროს დაუშლელი შეერთების წარმოქმნის პროცესი დაკავშირებულია შესადუღი დეტალების დეფორმაციასთან, რასაც თან ახლავს ბგერითი რხევების წარმოქმნა. აღმოჩენილია კავშირი წერტილოვანი შედუღების ხარისხსა და ბგერითი რხევების ამპლიტუდას შორის, რომელიც ვრცელდება კონტაქტური შედუღების მანქანის ლითონის კონსტრუქციებში (ელექტროდში, ელექტროდის დამჭერში, კონსოლში და სხვა). რხევების გაზომვა ხდება სპეციალური აპარატურით, რომელიც მუშაობს პიეზოელექტრულ გადამწოდებზე. ეს უკანასკნელი უფრო მოსახერხებელია დამაგრებული იყოს შედუღების მანქანის ზედა ან ქვედა კონსოლზე.

წარმოდგენილი კონტროლის მეთოდზე მოქმედებს შედუღების მანქანის მუშა ელემენტების საკუთარი რხევები, რომლებიც გამოწვეულია შედუღების დროს მოქმედი ძლიერი მაგნიტური ველით განპირობებული ელექტროდინამიკური ძალებით. ამ ძალების სიდიდე, აგრეთვე, დამოკიდებულია კონტაქტური შედუღების მანქანის კონსტრუქციულ შესრულებაზე. ყოველივე აღნიშნული მნიშვნელოვნად მოქმედებს კონტროლის მეთოდის საიმედოობაზე [53...57,73].

1.2.2.4. შედუღების პროცესების პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდები

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლისათვის გამოყენებულია შედუღების პროცესის პარამეტრები [7,8,17,132,139]. ამ მეთოდით სარგებლობისას იყენებენ შედუღების ხარისხის შესახებ ინფორმაციის მატარებელ პარამეტრებს და მათი საშუალებით არაპირდაპირ აფასებენ შენადული შეერთების ხარისხს. ამასთანავე ხარისხის შეფასების შედეგი ცნობილი ხდება შედუღების პროცესის დამთავრებისთანავე. ამის გამო წერტილოვანი შედუღების პროცესის პარამეტრების მიხედვით შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის მეთოდი საშუალებას იძლევა შეფასებული იქნას შედუღების ხარისხი უშუალოდ შედუღების

პროცესში და ამ მეთოდის გამოყენება არაა დაკავშირებული დროის დამატებით დანაკარგებთან. შესაბამისად იგი ხასიათდება მაღალი წარმადობით, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ყოველი შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის აუცილებლობის შემთხვევაში, განსაკუთრებით შენადული კონსტრუქციების მსხვილსერიულ წარმოებაში.

შედულების პროცესის ინფორმაციული პარამეტრების სწორად შერჩევის შემთხვევაში, ხარისხის შეფასების აღნიშნული მეთოდი უზრუნველყოფს მაღალ საიმედოობას [53,56,73], რომელიც ყოველი შენადული შეერთების 100 %-იანი კონტროლის შემთხვევაში, არაა დამოკიდებული ტექნოლოგიური პროცესის სიზუსტეზე. გარდა ამისა, როგორც შედულების ხარისხის არადაშლადი კონტროლის ნებისმიერი მეთოდი, ისიც არ საჭიროებს მზა ნაკეთობის რღვევას.

ამრიგად, შედულების ხარისხის დღემდე არსებული მეთოდების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ პროცესის პარამეტრების მიხედვით არადაშლად კონტროლს უფრო სრულად, სხვა მეთოდებთან შედარებით, შეუძლია გადაწყვიტოს პრობლემები, რომლებიც დაკავშირებულია წერტილოვანი კონტაქტური შედულებით ლითონკონსტრუქციების დამზადების ეფექტურობის ამაღლებასთან.

1.3. პროცესების პარამეტრების მიხედვით შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის მეთოდების ანალიზი.

კვლევის მიზანი და ანალიზი

ხარისხის კონტროლის არადაშლადი მეთოდების ანალიზმა აჩვენა, რომ წერტილოვანი კონტაქტური შედულებით ლითონკონსტრუქციების წარმოების ეფექტურობის ამაღლების მიზნით, ხელსაყრელია მათი ხარისხის კონტროლისათვის გამოყენებული იქნას შედულების პროცესის პარამეტრებით კონტროლის მეთოდი.

პროცესის პარამეტრებით კონტროლის მეთოდი გულისხმობს შედულების პროცესის ერთფაქტორიანი ან მრავალფაქტორიანი მოდელების დამუშავებას, რომლებიც ამყარებენ რაოდენობრივ კავშირს ხარისხის შერჩეულ მაჩვენებელსა და პროცესის ყველაზე უფრო ინფორმაციულ პარამეტრებს შორის.

ბოლო დრომდე მკვლევარების უმრავლესობა ცდილობდნენ გამოევიდნათ და გამოეკვლიათ პროცესის ცალკეული პარამეტრები [17,18,38,91], რომლებიც საკმარისი სიზუსტით შეაფასებდნენ ხარისხის შერჩეულ მაჩვენებელს. მთელ რიგ სამუშაოებში [106,130] ნაჩვენებია იყო, რომ ამ მიზნით შეიძლება გამოყენებულ იქნას ე.წ. განმაზოგადებელი პარამეტრები. ასეთ პარამეტრებს მიაკუთვნებენ: 1) შედუღების ადგილის ლითონის გაფართოების სიდიდეს; 2) ელექტროდებს შორის ძაბვის ვარდნას; 3) შედუღების ზონის წინალობის ცვლილებას; 4) შედუღების ზონის ტემპერატურას; 5) შედუღების დროს კუმშვის ძალის ცვლილების ხასიათს და სხვა. ამასთანავე, ხარისხის შესახებ დასკვნა კეთდება ალტერნატიური ნიშნის მიხედვით, რისთვისაც გაზომილ პარამეტრს ადარებენ მის ეტალონურ მნიშვნელობას. ეს უკანასკნელი შეესაბამება ხარისხის მაჩვენებლის ნომინალურ მნიშვნელობას, რომელიც განისაზღვრება ექსპერიმენტულად. შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრის მიხედვით კონტროლის ასეთმა მეთოდმა ვერ ჰპოვა გავრცელება ხარისხის მაჩვენებლის შეფასების დაბალი სიზუსტის გამო, რაც გამოწვეული იყო იმით, რომ ეტალონის განსაზღვრისას არაა გათვალისწინებული ლითონკონსტრუქციის წარმოების პროცესში მოქმედი მთელი რიგი შემაშფოთებელი ფაქტორები. ამ შემთხვევაში ხარისხის მაჩვენებელი ფუნქციონალურად არაა დაკავშირებული მისი შეფასების პროცესის პარამეტრებთან, ორივე ისინი წარმოადგენენ შემთხვევით სიდიდეებს და მათ შორის კავშირი ალბათურ-სტატისტიკურია.

ავტორების ნ.პოდოლა, ა.ურსატიევი, ბ.პატონი [104,107,108,145,146] ნაშრომებში შედუღების პროცესში მოქმედი შემოფოთებების გათვალისწინება, პარამეტრების მიხედვით შედუღების ხარისხის შეფასებისას, შესაძლებელი გახდა ხარისხის მაჩვენებელსა და პროცესის პარამეტრებს შორის შესაძლო კავშირის ანალიზის ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებით. კერძოდ, რეგრესიული ანალიზის მეთოდი საშუალებას იძლევა პროცესის პარამეტრსა და ხარისხის მაჩვენებელს შორის კავშირი წარმოვადგინოთ რეგრესიის განტოლების სახით და შეფასებული იქნას ამ კავშირის რაოდენობრივი მხარე.

არაწრფივი ობიექტებისათვის, შედუღების პროცესის პარამეტრსა და ხარისხის მაჩვენებელს შორის კავშირის რაოდენობრივი მხარის შეფასებისათვის გამოყენებულია ფარდობითი კორელაციური დამოკიდებულების კვადრატი, ხოლო მათ შორის

წრფივი დამოკიდებულების არსებობის შემთხვევაში კი - კორელაციური კავშირის კოეფიციენტი [104,136]. ეს სიდიდეები განსაზღვრავენ რეგრესიის განტოლების (ერთფაქტორიანი მათემატიკური მოდელის) მიხედვით შედულების ხარისხის შეფასების საიმედოობას. რაც უფრო ახლოსაა ეს კოეფიციენტები ერთთან, მით მაღალია ხარისხის შეფასების საიმედოობა.

შედულების პარამეტრების კორელაციური ანალიზი ჩატარებულია ნაშრომებში [99,107,128], სადაც გამოკვლეულია უჟანგავი ფოლადის და ალუმინის კონტაქტური წერტილოვანი შედულების ბირთვის ზომებზე შედულების რეჟიმის პარამეტრების გავლენა. კერძოდ, გამოკვლეულია შედულების დენის, ელექტროდებს შორის ძაბვის ვარდნის, აგრეთვე დაწნევის ძალის გავლენა ბირთვის დიამეტრზე. კორელაციური დამოკიდებულების რაოდენობრივი შეფასების საფუძველზე გაკეთებულია დასკვნა იმის შესახებ, რომ ყველაზე ინფორმაციულია ელექტრული პარამეტრები. მათ შორის გამოირჩევა შედულების დენი, რომლის კორელაციური კავშირის კოეფიციენტის სიდიდე ბირთვის დიამეტრის შეფასებისას შეადგენს 0,97-ს. უჟანგავი ფოლადებისათვის ეს უკანასკნელი შეადგენს 0,88-ს, ხოლო ალუმინის შედულებისას, შედულების დენის ინფორმაციულობა ეცემა 0,69-მდე. ამ გამოკვლევებიდან ჩანს, რომ კონტაქტური შედულების დენის ინფორმაციულობა დამოკიდებულია შესადული მასალის სახეობაზე, კერძოდ წინააღობაზე. მისი წინააღობის გაზრდით, შედულების დენის ინფორმაციულობა იზრდება, რადგანაც ამ შემთხვევაში მცირდება პროცესზე მოქმედი შემაშფოთებელი ფაქტორების გავლენა.

ჩვენმა გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ წერტილოვანი კონტაქტური შედულების რეჟიმის პარამეტრების ინფორმაციულობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს შედულების გამოყენებული სქემები. დაბალნახშირბადიანი ფოლადის ორმხრივი სქემით (ნახ.1.2) კონტაქტური წერტილოვანი შედულებისას შედულების დენი გამოირჩევა მაღალი ინფორმაციულობით. შედარებით დაბალია შედულების დენის ინფორმაციულობა შედულების ბირთვის შეფასებისას ცალმხრივი შედულებისას (0,8-0,9). ხოლო გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულებისას (ნახ.1.3) შედულების დენის ინფორმაციულობა ბირთვის დიამეტრის შესახებ ეცემა 0,6-მდე. ამ უკანასკნელზე მიუთითებს აგრეთვე, ცხრილში 1.1 და ცხრილში 1.2 მოყვანილი ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზი.

ორმხრივი წერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცის
დენის მიხედვით შეფასების შედეგები

№	ექსპერიმენტული მონაცემები		განგარიშებული სიდიდეები				
	შედულების დენი I_2 , $\times 10^3$, ა	შენადული შეერთების მექანიკური გამოცდის შედეგები P , დკნ	დენის მიხედვით განგარი- შებული სიმტკიცე $P_{სანგ.}$, დკნ	$ P - P_{სანგ.} $	ფარდობითი ცდომილება ε , %	საშუალო ცდომი- ლება ε_i , %	$\bar{\varepsilon}_i$, %
1	1,50	3,95	9,39	0,56	0,1651	16,51	6,9
2	1,50	3,95	9,39	0,56	0,1651	16,51	
3	1,50	9,47	10,10	0,63	0,0665	6,65	
4	1,43	11,93	11,12	0,81	0,0678	6,78	
5	1,45	9,65	10,47	0,82	0,0783	7,83	
6	1,45	11,84	11,47	0,37	0,0322	3,22	
7	1,45	11,54	10,95	0,59	0,0538	5,38	
8	1,45	9,51	11,47	1,96	0,1708	17,08	
9	1,73	20,00	18,69	1,31	0,0107	1,07	
10	1,65	16,75	18,85	0,17	0,0100	1,00	
11	1,75	19,51	20,41	0,9	0,0440	4,40	
12	1,75	19,75	21,55	2,04	0,0946	9,46	
13	1,73	16,54	16,21	0,33	0,0203	2,03	
14	1,73	15,44	17,11	1,67	0,0967	9,76	
15	1,83	18,67	19,47	0,60	0,0308	3,08	
16	1,75	19,51	21,11	1,60	0,0757	7,57	
17	1,73	18,87	19,51	0,64	0,0335	3,35	
18	1,75	19,51	21,41	1,90	0,0887	8,87	
19	1,75	19,51	22,11	2,60	0,1175	11,75	
20	1,83	18,09	20,14	2,05	0,1017	10,17	
21	1,95	23,50	26,00	2,50	0,0961	9,61	
22	1,95	23,50	26,00	1,50	0,0600	6,00	
23	1,95	21,25	24,00	2,75	0,1145	11,45	
24	2,10	28,00	28,00	0,00	0,0000	0,00	
25	2,15	26,25	29,00	2,75	0,0948	9,48	
26	2,10	28,00	30,00	2,00	0,0666	6,66	
27	2,20	27,50	30,00	2,50	0,0633	6,33	
28	2,30	30,00	31,00	1,00	0,0322	3,22	
29	2,30	30,00	33,00	3,00	0,0909	9,09	
30	2,30	30,00	32,00	2,00	0,625	6,25	
31	2,30	32,95	33,00	0,05	0,0015	0,15	
32	2,30	32,95	33,30	0,35	0,0115	1,05	

ცხრილში 1.1 მოყვანილია ნახ.1.2-ზე წარმოდგენილი სქემით ორმხრივი კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას, შედუღების ბირთვის მექანიკური გამოცდისას სიმტკიცის მნიშვნელობები P (დეკანიუტონებში – დკნ) და თითოეული ბირთვის შედუღებისას, შედუღების კონტურში გაზომილი შედუღების დენის შესაბამისი სიდიდეები I_2 . აქვე მოცემულია P და I_2 სიდიდეების ერთმანეთთან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი მათემატიკური მოდელით გათვლილი შედუღებული თითოეული ბირთვის შესაბამისი სიმტკიცის $P_{საანგ.}$ საანგარიშო მნიშვნელობები. ცხრილში 1.1 მოცემულია აგრეთვე გაანგარიშებული ფარდობითი ε და საშუალო ფარდობითი $\bar{\varepsilon}$ ცდომილებები. ეს უკანასკნელი შეადგენს 7 %-მდე.

შედუღებული ბირთვის შედუღების დენის მიხედვით შეფასების სიმტკიცე ორმხრივი წერტილოვანი შედუღებისას (ნახ.1.2) შეიძლება ჩაითვალოს დამაკმაყოფილებლად, რადგანაც საშუალო ფარდობითი ცდომილება არ აღემატება 7 %-ს.

სრულიად განსხვავებული შედეგები იქნა დაფიქსირებული ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას (ნახ.1.3).

ცხრილში 1.2 მოყვანილია ექსპერიმენტული მონაცემები ორმხრივი მრავალწერტილოვანი სქემით, დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული ფურცლების შედუღებისას 1) შედუღების კონტურში გაზომილი დენის I_2 სიდიდეები; 2) ამ დენის შესაბამისი ბირთვის მექანიკური გამოცდის შედეგები P ; 3) ორმხრივი წერტილოვანი შედუღებისას ბირთვის სიმტკიცისა და შედუღების დენის დამაკავშირებელი მათემატიკური მოდელით P გათვლილი ბირთვის საანგარიშო სიმტკიცე $P_{საანგ.}$; 4) მათემატიკური მოდელის მიხედვით ბირთვის სიმტკიცის განსაზღვრის ფარდობითი და საშუალო ფარდობითი ცდომილების შედეგები.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას, შედუღების დენის ინფრმაციულობა ბირთვის სიმტკიცის შესახებ მნიშვნელოვნად ეცემა, რადგანაც შედუღების დენის მიხედვით გათვლილი შენადული ბირთვის სიმტკიცის საშუალო ფარდობითი ცდომილება გაიზარდა 41,6 %-მდე.

ორმხრივი წერტილოვანი შენადული შეერთების ბირთვის სიმტკიცის შეფასებისათვის გამოყენებული ერთფაქტორიანი მათემატიკური მოდელით

მიღწეული იქნა ბირთვის სიმტკიცის შეფასების მაღალი სიზუსტე. ამით მიღებული შედეგები არ ეწინააღმდეგება ავტორების [104,108] კვლევების შედეგებს, რომლებიც ხაზგასმით აღნიშნავენ, რომ შედუღების ხარისხის შეფასებისას მაღალი სიზუსტის მიღწევა შესაძლებელია მხოლოდ მრავალფაქტორიანი მათემატიკური მოდელის გამოყენებით. ჩვენ ცხრილში 1.1 და ცხრილში 1.2 მოყვანილი ექსპერიმენტების დროს ვცდილობდით შედუღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები ყოფილიყო სტაბილიზირებული. მხოლოდ ამ შემთხვევაშია შესაძლებელი შედუღების ხარისხის ერთფაქტორიანი მათემატიკური მოდელით კონტროლი. როგორც შედეგებიდან ჩანს, პირველი ექსპერიმენტის დროს, რომლის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.1, შედუღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორების სტაბილიზირებას ვაღწევდით მეორე ექსპერიმენტის დროს, რომლის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.2, აშკარაა, რომ შედუღების პროცესზე არსებითად მოქმედი რომელიმე ფაქტორის ან ფაქტორების სტაბილიზირება ვერ მოხერხდა, რამაც გამოიწვია შედუღების დენის ინფორმაციულობის მნიშვნელოვანი დაცემა და შესაბამისად შედუღების ბირთვის სიმტკიცის შეფასების ცდომილების გაზრდა. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ასეთ ფაქტორს შეიძლება წარმოადგენდეს დენის დაშუნტვა ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას. ამ ვარაუდის საფუძველს ისიც გვაძლევს, რომ ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას დენის დაშუნტვის რთულ პროცესთან გვაქვს საქმე (ნახ.1.3) და დიდი მცდელობის მიუხედავად, მისი თავიდან აცილება ექსპერიმენტის დროსაც პრაქტიკულად შეუძლებელია.

უნდა ვივარაუდოთ, აგრეთვე, რომ ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისათვის, შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდის დღემდე არ არსებობაც დაკავშირებულია ამ დროს დენის დაშუნტვის რთულ პროცესთან, რის გამოც შეუძლებელია შედუღების დენის რეალური მნიშვნელობის გაზომვა. შესაბამისად, დაბალია ამ უკანასკნელის ინფორმაციულობა შედუღების ბირთვის სიმტკიცის შესახებ.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას დენის დაშუნტვის თავისებურებები დღემდე შეუსწავლელია. ექსპერიმენტული გზით დენის დაშუნტვის რეალური სიდიდის დადგენა, ასევე შედუღების დენის რეალური მნიშვნელობების დადგენა შეუძლებელია. ანალოგიურ შემთხვევებში მიმართავენ პროცესის მოდელირებას. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების პროცესის

მოდელირება საშუალებას მოგვცემს, მოდელზე არაპირდაპირ შესწავლილი იქნას შედეგების აღნიშნული სქემით სარგებლობისას დენის დაშუნტვის თავისებურებანი, განსაზღვრული იქნას დაშუნტვის დენის სიდიდე და ამის საფუძველზე დადგენილი იქნას შედეგების დენის რეალური მნიშვნელობა.

ცხრილი 1.2

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცის
დენის მიხედვით შეფასების შედეგები

№	ექსპერიმენტული მონაცემები		განგარიშებული სიდიდეები			
	შედეგების დენი I_2 , $\times 10^3$, ა	შენადული შეერთების მექანიკური გამოცდის შედეგები P , დკნ	შეერთების სიმტკიცის საანგაზნა-რიზო მნიშვნელობა $P_{საანგ.}$, დკნ	$ P - P_{საანგ.} $	ε_i , %	$\bar{\varepsilon}_i$, %
1	8,10	550	842	292	34,7	41,6
2	8,30	548	886	338	38,1	
3	8,35	553	896	344	38,4	
4	8,32	548	890	342	38,4	
5	8,40	560	908	348	38,3	
6	8,50	598	930	332	35,7	
7	8,70	619	974	355	36,4	
8	8,85	627	1007	380	37,7	
9	9,12	601	1066	465	43,6	
10	9,20	608	1084	476	43,8	
11	9,35	610	1117	507	45,4	
12	9,40	612	1128	516	45,7	
13	9,60	620	1172	552	47,1	
14	9,77	640	1209	569	47,1	
15	9,89	640	1236	596	48,2	
16	10,60	670	1282	612	47,7	

აღნიშნულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილ სამუშაოში მეცნიერული კვლევის ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა მრავალწერტილოვანი ორმხრივი შედეგების მოდელის დამუშავება და კვლევა.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგების მოდელირების მიზნით აუცილებელია მოდელის ისეთი პარამეტრების დადგენა, რომლებიც

უზრუნველყოფს ორმხრივი მრავალწერტილოვანი პროცესის იმიტაციას. აღნიშნულთან ერთად აუცილებელია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგების ზოგიერთი პარამეტრის სტაბილიზირება, იმისათვის, რომ შემცირებული იქნას მოდელში შემავალი პარამეტრების რიცხვი. ერთ-ერთ ასეთ პარამეტრს წარმოადგენს ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგებისას ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის სტაბილურობის მიღწევა. ცხადია, შედეგების დენს წარმოადგენს მხოლოდ ის დენი, რომელიც გადის წყვილელექტროდებიდან, მათ შორის მოთავსებულ დეტალებს შორის კონტაქტში. ამ კონტაქტის წინააღმდეგობის და ცვლილების ხასიათის დენის დაშუნტვის პროცესზე გავლენის შესწავლა გაადვილებული იქნება, თუ არ იარსებებს ან მუდმივი სიდიდის იქნება დეტალსა და ელექტროდს შორის კონტაქტური წინააღმდეგობა. ეს კი შესაძლებელია, თუ არ იქნება ადგილი ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგებისას ელექტროდის მუშა ზედაპირის ცვეთას. პრაქტიკულად აღნიშნულის მიღწევა შესაძლებელი იქნება მაღალი ცვეთამედეგობის ელექტროდის გამოყენების შემთხვევებში.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების შენაცვლების სქემის (მოდელის) დამუშავების მიზანია იმიტირებული იქნას შედეგებისას მიმდინარე პროცესები. კერძოდ, დენის დაშუნტვის პროცესი შედეგების კონტურებსა და მათ ცალკეულ ელემენტებს შორის. ეს საშუალებას მოგვცემს შესწავლილი იქნას ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგებისას დენის დაშუნტვის თავისებურებანი და დამუშავებული იქნას მისი გაანგარიშების მეთოდი.

აღნიშნული მიზნიდან გამომდინარე, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების მოდელი უნდა წარმოადგენდეს შედეგების კონტურების შენაცვლების ელექტრულ სქემას, სადაც კონტურის ცალკეული ელემენტები წარმოდგენილი იქნება წინააღმდეგობის, გამტარების და ენერჯის წყაროების სახით. იმისათვის, რომ შესწავლილი იქნას თითოეული ელემენტის გავლენა დენის დაშუნტვის პროცესზე აუცილებელია შედეგების ცალკეული კონტურის ჯამური წინააღმდეგობა არ იცვლებოდეს. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია შედეგების კონტურის საერთო წინააღმდეგობის სტაბილიზირება.

შედეგების კონტურის წინააღმდეგობის არამუდმივობის შემთხვევაში აუცილებელი იქნება ამ წინააღმდეგობის გათვალისწინება დასამუშავებელ მოდელში. ამ შემთხვევაში იგი გამოიწვევს მოდელის გართულებას და აგრეთვე გართულებული იქნება მისი

წინაღობის მნიშვნელობის დადგენა და მუდმივობის შენარჩუნება. აღნიშნულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილი სამუშაოს კვლევის ერთ-ერთ მთავარ ამოცანას წარმოადგენს შედუღების კონტურის წინაღობის სტაბილურობის შენარჩუნება და მაღალცვეთამდეგი ელექტროდის დამუშავება.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელის სქემის შექმნის შემდეგ ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა: 1) მისი ელემენტების პარამეტრების ანგარიში; 2) სქემის ელემენტების პარამეტრების ცვლით დენის დაშუნტვის პროცესის იმიტაცია;

მხოლოდ ამის შემდეგ გახდება შესაძლებელი: 1) დენის დაშუნტვის კანონზომიერების შესწავლა; 2) დაშუნტვის დენის მნიშვნელობის განსაზღვრა; 3) შედუღების დენის რეალური მნიშვნელობის განსაზღვრა. ეს შესაძლებელს გახდის შედუღების დენი გამოყენებული იქნას, როგორც შედუღების ბირთვის შესახებ ინფორმაციული პარამეტრი. მხოლოდ აღნიშნულის შემდეგ იქნება შესაძლებელი დამუშავებული იქნას მათემატიკური მოდელი რმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლის მეთოდის შესაქმნელად.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე მეცნიერული კვლევის ამოცანებია:

1. კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების სქემების და კონტროლის არადაშლადი მეთოდების ანალიზი და ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლის თავისებურებების გამოვლენა;
2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორების ანალიზი მათი სტაბილიზირების შესაძლებლობის გათვალისწინებით;
3. შედუღების კონტურის და ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის წინაღობის სტაბილიზირება;
4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ფიზიკური მოდელის დამუშავება;
5. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას დაშუნტვის დენის განსაზღვრის მეთოდის დამუშავება;
6. შედუღების დენის განსაზღვრის მეთოდის დამუშავება;
7. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ხარისხის კონტროლის მათემატიკური მოდელის დამუშავება.

2. შედუღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები და მათი სტაბილიზაციის შესაძლებლობა

2.1. შედუღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები

ფიზიკური მოვლენების დამახასიათებელი დაკვირვების პროცესები შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად - დეტერმინირებული და არადეტერმინირებული.

დეტერმინირებულ პროცესებს მიეკუთვნება ის მოვლენები, რომლებიც შეიძლება აღწერილი იქნას ზუსტი მათემატიკური გამოსახულებებით.

პროცესები, რომელთა აღწერა შეუძლებელია ზუსტი მათემატიკური გამოსახულებებით, მიეკუთვნებიან არადეტერმინირებულ პროცესებს. ასეთი პროცესების ზუსტი მნიშვნელობის განსაზღვრა მომავალში დროის რომელიმე მომენტში შეუძლებელია. ეს პროცესები შემთხვევითია თავისი ბუნებით და მათი აღწერა შესაძლებელია სტატისტიკური მახასიათებლებით.

დეტერმინირებული პროცესები შეიძლება იყოს პერიოდული და არაპერიოდული. თავის მხრივ, პერიოდული პროცესები იყოფა ჰარმონიული და ნახევრად ჰარმონიული. არაპერიოდულ პროცესებს მიეკუთვნება - თითქმის პერიოდული და გარდამავალი პროცესები .

როგორც ავლნიშნეთ, შემთხვევითი ფიზიკური მოვლენები არ შეიძლება აღწერილი იქნას ზუსტი მათემატიკური გამოსახულებით, რადგანაც პროცესზე ყოველი დაკვირვების შედეგი არააღქმადია. ე.ი. ნებისმიერი დაკვირვების შედეგი წარმოადგენს მრავალი შესაძლო შედეგებიდან ერთ-ერთს.

დროის ფუნქცია, რომელიც აღწერს მოვლენას, ეწოდება შერჩევითი ფუნქცია. მოცემული შემთხვევითი მოვლენის რეგისტრაციის დროს შეიძლება მიღებული იქნას ყველა შერჩევითი ფუნქციის სიმრავლე, რომელსაც ეწოდება შემთხვევითი ან სტატისტიკური პროცესები.

ანსხვავებენ სტაციონალურ და არასტაციონალურ შემთხვევით პროცესებს.

კონტაქტურ ორმხრივ წერტილოვან შედუღებაზე როგორც ფიზიკურ მოვლენაზე მოქმედი ფაქტორების რიცხვი აჭარბებს 40-ს. ისინი კლასიფიცირებულია

ზემოთ მოყვანილი სქემის მიხედვით: შედარებით ნაკლებადაა შესწავლილი ორმხრივ მრავალწერტილოვან კონტაქტურ შედუღებაზე მოქმედი ფაქტორები.

ისინი შეიძლება ჩაითვალოს შედუღების პროცესისათვის შემაშფოთებელ ფაქტორებად. ψ_j – შესადული დეტალის მასალის შემადგენლობის, სისქის, მექანიკური, ელექტრული, თბური თვისებებია დეტალის სხვადასხვა ადგილებში. შედუღების პროცესზე მოქმედებს აგრეთვე ფაქტორები ξ_i

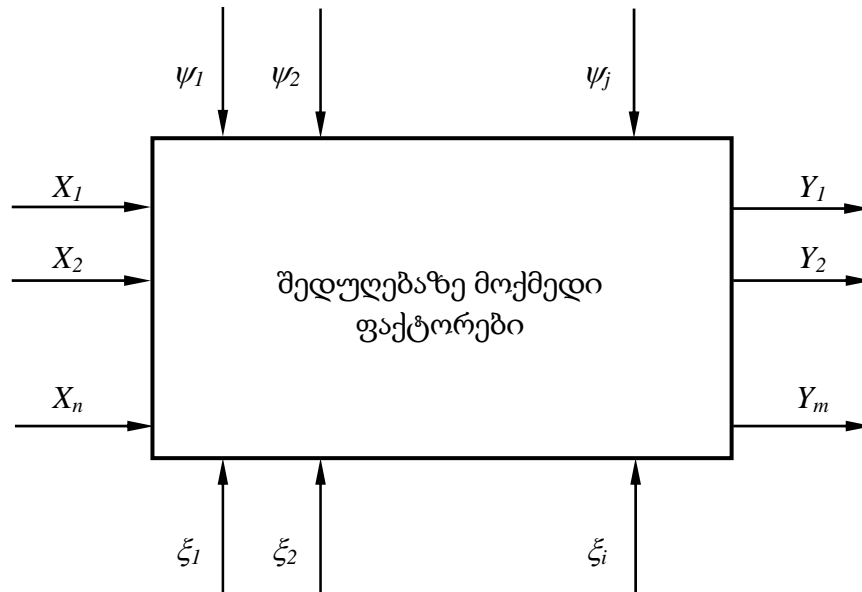
- შესადული დეტალზე და ელექტროდზე ჟანგის ფენა;
- ელექტროდის მუშა ზედაპირის ფართი;
- შედუღების კონტურის ელემენტების კონტაქტის წინალობა.

თითოეული მათგანი მოქმედებს კონტაქტურ წინალობის სიდიდეზე და, აქედან გამომდინარე, შედუღების დენის სიდიდეზე. მაგალითად, ჩამოთვლილიდან ξ_i ფაქტორი მოქმედებს $r_{\text{დღ}}$ წინალობაზე ($r_{\text{დღ}} = \xi_i$) მისი სტაბილიზაცია შეიძლება შესადული დეტალების ზედაპირების სპეციალური მომზადებით შედუღებისათვის [17,61].

შედუღების კონტურის ელემენტების გადაბმის ადგილების კონტაქტის წინალობის $\xi_2 = r_{\text{კ}}$ სტაბილიზაცია შესაძლებელია მათი პერიოდული კონტროლის გზით.

ელექტროდის მუშა ზედაპირის ცვეთა და ამით მისი ფართის ცვლა შედუღების პროცესში გარდაუალაია. მაგრამ მისი სტაბილიზაცია შესაძლებელია მაღალი ცვეთამდეგობის მქონე ელექტროდების გამოყენებით, რადგანაც ამ შემთხვევაში შედუღების ელექტროდის მუშა ზედაპირის ფართი შეიძლება ჩაითვალოს პრაქტიკულად უცვლელად ($\xi_3 = r_{\text{კ}}$) შესაბამისად ამ შემთხვევაში ამ ფაქტორის გავლენა შედუღების დენზე შეიძლება გამოირიცხოს. ამ მიზნით ჩვენს მიერ სამუშაოში დამუშავებულია მაღალი ცვეთამდეგობის მქონე ელექტროდი.

ამრიგად, ξ_i ფაქტორები წარმოადგენენ შედუღების პროცესზე მოქმედ ფაქტორებს, რომელთა სტაბილიზირება შესაძლებელია.



ნახ.2.1. ორმხრივ მრავალწერტილოვან შედულებაზე მოქმედი ფაქტორების კლასიფიკაცია:

- X_1, X_2, \dots, X_n - შედულების რეჟიმის პარამეტრები;
- $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_j$ - შემთხვევითი შემფოთებები;
- $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$ - სტაბილიზირებადი შემფოთებები;
- Y_1, Y_2, \dots, Y_m - გამომავალი პარამეტრები.

ნახ.2.1-ზე მოცემული კონტაქტური ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულების პროცესზე მოქმედი ფაქტორების მოქმედება განსაზღვრავს პროცესის გამომავალი I_1, I_2, \dots, I_n პარამეტრების მნიშვნელობებს. გამომავალი პარამეტრების სახეობები და რაოდენობა დამოკიდებულია შედულების ობიექტის სახეობაზე.

საავტომობილო მშენებლობაში ლითონკონსტრუქციების დასამზადებლად გამოყენებული კონტაქტური წერტილოვანი შედულების პროცესისათვის გამომავალი პარამეტრი შეიძლება იყოს შენადული შეერთების სიმტკიცე ან შედულებული ბირთვის დიამეტრი. მათი ნამდვილი მნიშვნელობის დადგენა შეიძლება:

1. შედულების ადგილიდან ამოჭრილი ნიმუშის მექანიკური გამოცდით;
2. შედულების ადგილიდან ამოჭრილი ნიმუშიდან მიკროხეხების დამზადებით და შემდეგ შედულების ბირთვის დიამეტრის განსაზღვრით.

როგორც პირველ, ასევე მეორე შემთხვევაში შეფასების კრიტერიუმს წარმოადგენს შედულების ადგილის სიმტკიცე. იდეალურ შემთხვევაში, შედულების

ადგილის სიმტკიცე შეიძლება უახლოვდებოდეს შესადულებელი მასალის სიმტკიცეს. თუ გავითვალისწინებთ, რომ შედულების ადგილას და მის მახლობელ ზონაში შესადულებელი მასალის პლასტიკურობა მცირდება და, შესაბამისად, მისი სიმყიფე იზრდება, მაშინ ცხადია, რომ შედულების ადგილის სიმტკიცე ყოველთვის ნაკლები იქნება შესადულებელი მასალის სიმტკიცეზე. რაც უფრო ახლოს იქნება შედულების ადგილის სიმტკიცე შესადულებელი მასალის სიმტკიცესთან, მით უფრო სრულყოფილია, ოპტიმალურია შედულების ტექნოლოგია.

შედულების პროცესის გამომავალი პარამეტრის მნიშვნელობების განსაზღვრისას, ზემოთ აღნიშნული მეთოდი მიღებულია ეტალონურ მეთოდად და პროცესის გამომავალი პარამეტრების განსაზღვრის სხვა მეთოდების საიმედოობა დარდება მათ საიმედოობასთან. მაგალითად, კონტაქტური წერტილოვანი შედულების პროცესის გამომავალი პარამეტრის განსაზღვრისათვის გამოყენებულია აგრეთვე რენტგენის სხივით შედულების ადგილის გაშუქების მეთოდი, რომლითაც მაღალი სიზუსტით განისაზღვრება ბირთვის დიამეტრი.

კონტაქტური წერტილოვანი შედულების გამომავალი პარამეტრები შემთხვევითი სიდიდეებია. როგორც არ უნდა ვეცადოთ, სტაბილური გავხადოთ შედულების პროცესზე მოქმედი ფაქტორები, პრაქტიკულად შეუძლებელია გამომავალი პარამეტრის ერთიდაიგივე სიდიდის მიღება. როგორც არ უნდა იყოს კონტაქტური შედულების სქემა, გამომავალი პარამეტრები ყველასთვის ერთნაირია.

კონტაქტური შედულების რეჟიმის X_1, X_2, \dots, X_n პარამეტრების რაოდენობა და სახეობა დამოკიდებულია შედულების კონკრეტულ პირობებზე. წერტილოვანი შედულების რეჟიმის პარამეტრებია: 1) შედულების დენი; 2) შედულების დენის გატარების ხანგრძლივობა; 3) ელექტროდის დაწნევის ძალა; 4) ელექტროდის მუშა ზედაპირის ზომები; ე) შესადული დეტალების სისქე.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულებისას, შედულების რეჟიმის დამატებით პარამეტრებს წარმოადგენენ: 1) ელექტროდებს შორის ბიჯი t ; 2) წყვილელექტროდს შორის ბიჯი l (ნახ.1.3). ელექტროდებსა და წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი განსაზღვრავს, სხვა ფაქტორებთან ერთად, შედულების დენის დაშუნტვის ხარისხს. ამიტომ მათი ოპტიმალური

მნიშვნელობების დადგენა კონკრეტული შენადული კონსტრუქციისათვის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ამოცანაა წარმოდგენილ სამუშაოში.

შედულების დენის გატარების ხანგრძლივობა ანუ, შემოკლებით, შედულების ხანგრძლივობა, შედულების რეჟიმის ყველაზე სტაბილური პარამეტრია. განსაკუთრებით მაშინ, თუ შედულების დენის ჩართვა-გამორთვისათვის გამოყენებულია ტირისტორული კონტაქტური სიქრონული მართვის ბლოკი [116,147]. ამ შემთხვევაში შედულების დენის ჩართვის და გამორთვის მომენტი პრაქტიკულად უცვლელია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულებისას.

შედარებით სტაბილურია, აგრეთვე, ელექტროდების კუმშვის ძალა. მისი ცვლილება შედულების პროცესში შეიძლება მოხდეს შედულების ზონის თბური გაფართოებით და ამის გამო მოძრავ ელექტროდზე მოქმედი რეაქციის ძალით გამოწვეული ელექტროდის უკუგადაადგილებით. ელექტროდებს შორის კუმშვის ძალის საწყისი მნიშვნელობის აღდგენა ხდება შედულების ბოლოს [106].

მნიშვნელოვნად იცვლება შედულების პროცესში შედულების დენი და ელექტროდის და მუშა ზედაპირის ზომები, რაც გამოწვეულია შეუდლების პროცესზე მოქმედი ψ_j და ξ_i შემფოთებებით. მათგან $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$ შემფოთებათა გავლენა შედულების რეჟიმის პარამეტრებზე შეიძლება შესუსტებული იქნას. აღნიშნულში ნაგულისხმევია შემდეგი. შედულების დენზე არსებითად მოქმედებს ისეთი ψ_j შემფოთება, მაგალითად, როგორცაა დეტალებს შორის კონტაქტის გარდამავალი წინაღობა. მათი მოქმედების შესუსტება შედულების დენის სიდიდეზე შეუძლია, ხოლო ისეთი ξ_i შემფოთება, როგორცაა ელექტროდის მუშა ზედაპირის ზომების ცვლილება, მნიშვნელოვნად მოქმედებს შედულების დენის სიდიდეზე, მაგრამ მისი მოქმედება შედულების დენზე შეიძლება მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი, თუ შედულებისათვის გამოყენებული იქნება მაღალი ცვეთმედეგობის ელექტროდი.

შედულების დენზე სხვა ფაქტორების მოქმედების შესუსტება და ამ მიზნით მაღალი ცვეთმედეგობის ელექტროდის გამოყენება აუცილებელია დენის დაშუნტვის პროცესის კვლევის დროს.

2.2. ცვეთამედეგი ელექტროდის დამუშავება

როგორც აღნიშნული იყო, ორმხრივ მრავალწერტილოვან კონტაქტურ შედუღებაზე მოქმედ შემაშფოთებელ ფაქტორებს შორის ერთ-ერთი მთავარია ელექტროდის მუშა ზედაპირის ცვეთა. ზემოთ აღნიშნული შემაშფოთებელი ფაქტორები იმოქმედებს დენის დაშუნტვის პირობებზე. ამ პროცესის შესწავლისას აუცილებელია ელექტროდის ცვეთის დაშუნტვაზე გავლენის თავიდან აცილება, რაც გაადვილებს დენის დაშუნტვის პროცესს. იმისათვის, რომ შესაძლებელი იყოს ელექტროდის ცვეთა, რომელიც გავლენას ახდენს დენის დაშუნტვაზე, ჩაითვალოს სტაბილიზირებულ შემაშფოთებელ ფაქტორად, აუცილებელია დამუშავდეს კონტაქტური მრავალწერტილოვანი შედუღებისათვის მაღალცვეთამედეგი ელექტროდის მიღების ტექნოლოგია. დიდი ცვეთამედეგობის ელექტროდის დამზადების ტექნოლოგიის დამუშავება განხილულია ქვემოთ.

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ელექტროდების ცვეთამედეგობის გაზრდისადმი მიძღვნილი შრომები [124,134] პირობით შეიძლება დაყვით ორ ჯგუფად: 1. შრომები, რომლებიც ეძღვნება მაღალცვეთამედეგი საელექტროდე მასალის დამუშავებას; და 2. შრომები, რომლებიც ეძღვნება ელექტროდის კონსტრუქციის გაუმჯობესებას.

ელექტროდის მუშა ზედაპირის ცვეთის ხარისხს აფასებენ ე.წ. ელექტროდის მედეგობით. კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას ელექტროდსა და შესადუღებელი დეტალის ზედაპირს შორის კონტაქტში ელექტროდის მუშა ზედაპირის ტემპერატურა ($T_{\text{ელ}}$) დამოკიდებულია შესადუღებელი დეტალების მასალის დნობის ტემპერატურაზე ($T_{\text{დნ}}$) და შეადგენს $T_{\text{ელ}} \approx 0,5T_{\text{დნ}}$. სხვადასხვა საკონსტრუქციო მასალების შედუღებისას იგი იცვლება $400 \div 700^{\circ}\text{C}$ -მდე. ამავე დროს კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას, შედუღების ზონაზე მოქმედებს კუმშვის ძალა [106], ორივე ფაქტორის ერთდროული მოქმედების გამო ადგილი აქვს ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის $d_{\text{ჟ}}$ და ფართის ზრდას. ამ უკანასკნელის გამო მცირდება შედუღების ზონაში დენის სიმკვრივე, აგრეთვე ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტის წინაღობა $r_{\text{ელ}}$. ორივე მათგანი იწვევს შედუღების ზონაში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის შემცირებას. ამავე დროს, იზრდება შედუღების

ზონიდან თბოგადაცემით ელექტროდის მიერ ართმეული სითბოს რაოდენობა. ზემოთ აღნიშნულის გამო, მცირდება შედუღების ბირთვის d_b დიამეტრი. როცა ბირთვის დიამეტრის შემცირება მიაღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას, რომლის შემდგომი შემცირებისას შედუღება უნდა ჩაითვლება უხარისხოდ, აუცილებელია შედუღების პროცესის გაჩერება და ელექტროდის ნომინალური პარამეტრების აღდგენა.

ელექტროდის მედეგობა ხასიათდება ორი ფაქტორით:

1. ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის ნომინალური მნიშვნელობის შენარჩუნების ხანგრძლივობით;
2. ელექტროდის მუშა ზედაპირის სუფთად შენარჩუნების ხანგრძლივობით.

არსებობს ელექტროდის მედეგობის შეფასების მრავალი მეთოდი. ერთ-ერთი ყველაზე მიღებული მეთოდია მისი შეფასება შედუღების წერტილების კრიტიკული ($n_{კრ}$) მნიშვნელობით [118,145]. $n_{კრ}$ მნიშვნელობად მიღებულია შედუღებული წერტილების რაოდენობა, რომლის დროსაც ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის ნამატი მიაღწევს 20 %-ს.

ექსპლუატაციის დროს, კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ელექტროდების მუშა ზედაპირები განიცდიან ციკლურ გახურებას 400...700°C ტემპერატურამდე. ამასთანავე, ელექტროდებზე მოქმედებს შედუღების რეჟიმით გათვალისწინებული მნიშვნელოვანი მკუმშავი ძალა. ორივე ერთად იწვევს ელექტროდის მუშა ზედაპირის ფართის გაზრდას (ცვეთას).

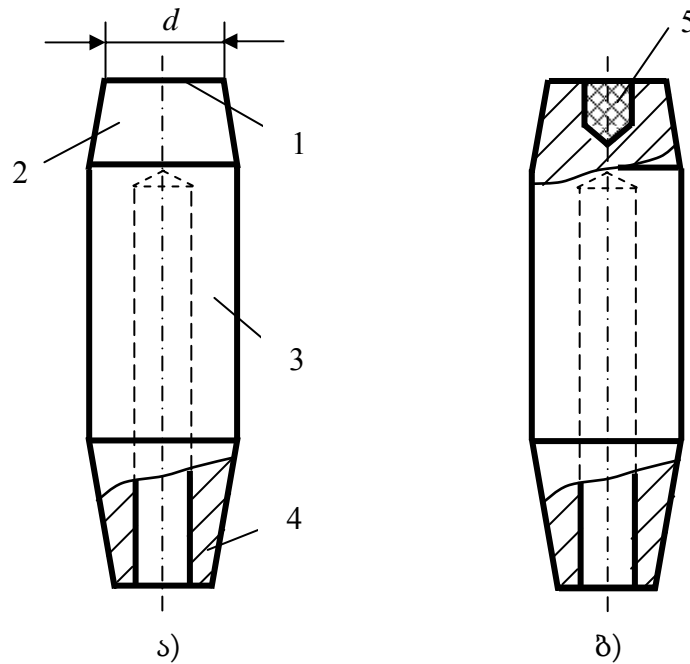
ელექტროდების ცვეთამედეგობის შეფასების ყველაზე მარტივ გავრცელებულ მეთოდად მიღებულია, ამ ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის 20 %-ით გაზრდამდე შედუღებული წერტილების რაოდენობა.

საელექტროდე მასალებს უნდა ჰქონდეს მაღალი თბო- და ელექტროგამტარობა. ამასთანავე, უნდა გააჩნდეს მაღალი ე.წ. ცხელმედეგობა და სისალე.

ყველა ჩამოთვლილი თვისების მიხედვით ერთ-ერთ საუკეთესო საელექტროდე მასალას წარმოადგენს სპილენძი. სამწუხაროდ მას არ ახასიათებს ცხელმედეგობა. ამასთანავე, ვერ იტანს მექანიკურ დატვირთვებს, მითუმეტეს გახურებისას. ამ უკანასკნელ თვისებებთანაა შექმნის მიზნით ახდენენ სპილენძის

ლეგირებას სხვადასხვა ელემენტებით: კადმიუმით, ქრომით, ვერცხლით, კობალტით, ნიკელით, ბერილიუმით, ცირკონით, ბორით, სილიციუმით. მალეგირებელი ელემენტების გაზრდით მცირდება სპილენძის ელექტროგამტარობა და თბოგამტარობა. ამის გამო, სპილენძის ლეგირებისას, მალეგირებელი ელემენტების ჯამური მნიშვნელობა არ უნდა აღემატებოდეს 2 %-ს. მაღალი სისალითა და ელექტროგამტარობით ხასიათდება ქრომით ლეგირებული სპილენძისაგან დამზადებული ელექტროდები (BpX). ისინი, ამავე დროს, ხასიათდება საკმაოდ მაღალი ცვეთამედეგობით (ნახ. 2.3).

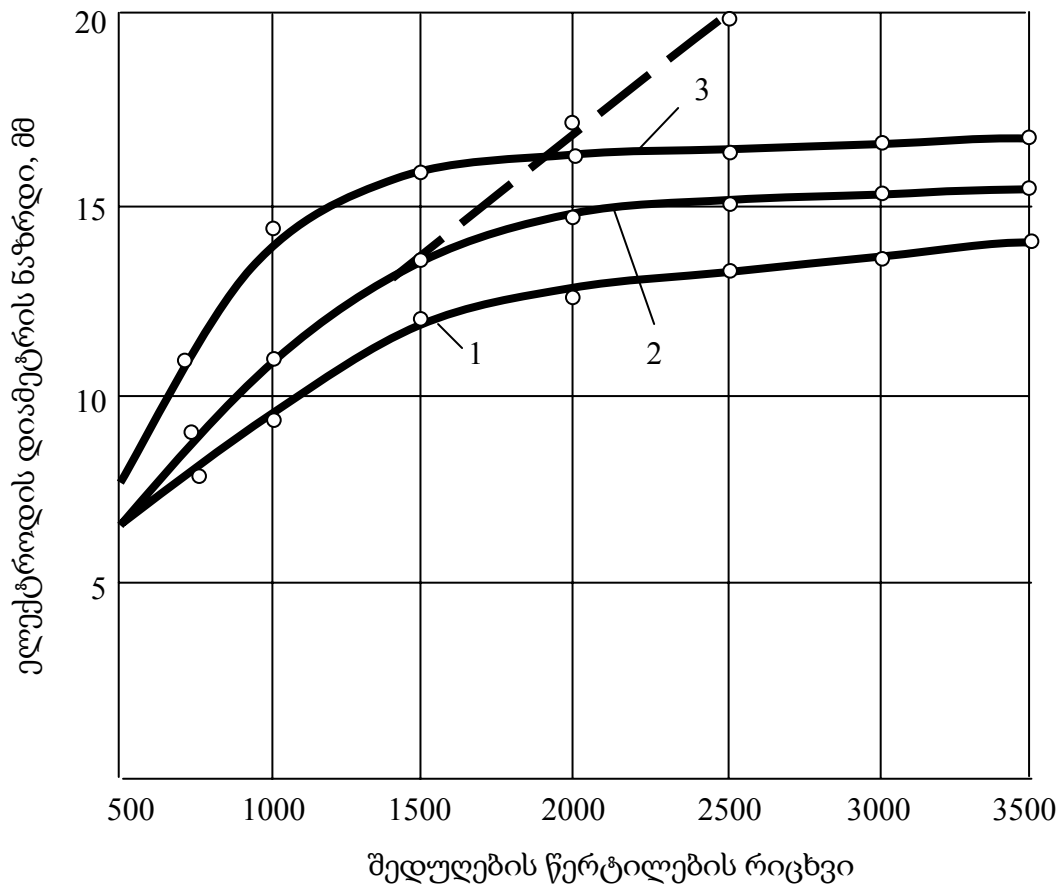
ელექტროდის ცვეთამედეგობის გაზრდის მიზნით საელექტროდე მასალების გაუმჯობესებასთან ერთად ხდებოდა ელექტროდის კონსტრუქციის გაუმჯობესება. ამ მიზნით ერთ-ერთი კონსტრუქციაში (ნახ.2.2) ელექტროდის მუშა ნაწილში ჩასმული იყო ვოლფრამისაგან დამზადებული ცილინდრი 5. მაღალი დნობის ტემპურატურის გამო, ელექტროდის მუშა ზედაპირის 400...700°C-მდე გახურებისას, რასაც ადგილი აქვს წერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ოპტიმალურ პირობებში მიმდინარეობისას, ვოლფრამის ცილინდრი 5 (შედუღებისას მოქმედი მექანიკური ზემოქმედებისას) ინარჩუნებს თავის ფორმას და პრაქტიკულად არ განიცდის დეფორმაციას. ამით შედუღების დროს მოქმედი კუმშვის ძალის ზემოქმედება ელექტროდის მუშა ზედაპირის დანარჩენ ფართზე შესუსტებულია, რის გამოც, გაზრდილია აღნიშნული კონსტრუქციის ელექტროდის მედეგობა (ნახ.2.3). წარმოდგენილი კონსტრუქციის ელექტროდის მედეგობა გაუმჯობესებულია ქრომით ლეგირებული სპილენძისაგან დამზადებული ელექტროდის მედეგობასთან შედარებით, მაგრამ მისი პრაქტიკული გამოყენება კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას შეზღუდულია იმის გამო, რომ შედუღებული წერტილების გარკვეული რიცხვის შემდეგ ელექტროდის მედეგობა მკვეთრად ეცემა და მისი შემდგომი გამოყენება შეუძლებელი ხდება. მწყობრიდან გამოსული ელექტროდების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ხდება ვოლფრამის ცილინდრის ღერძის გასწვრივ გადაადგილება, რის შედეგადაც ის, ერთის მხრივ, კარგავს ელექტროდის კონსტრუქციაში თავის ფუნქციას, მეორეს მხრივ, მკვეთრად მცირდება ელექტროდის მუშა ზედაპირის ფართი, რაც დაკავშირებულია შედუღების დენის სიმკვრივის მკვეთრ გაზრდასთან, შესაბამისად, ელექტროდის მუშა ზედაპირის გადახურებასთან და გაზრდილ დეფორმაციასთან.



ნახ.2.2. ელექტროდების კონსტრუქცია:

- ა) ქრომიანი სპილენძისაგან (SpX) დამზადებული ელექტროდი;
 ბ) მუშა ნაწილში ვოლფრამის ჩასმული ცილინდრის მქონე ელექტროდი;
 1-მუშა ზედაპირი; 2-ელექტროდის მუშა ნაწილი; 3-ელექტროდის ტანი;
 4-ჩამაგრების კონუსი; 5-ჩასმული ვოლფრამის ცილინდრი;
 d -მუშა ზედაპირის დიამეტრი.

ზემოთ აღნიშნულში იგულისხმება, რომ ელექტროდის წარმოდგენილ კონსტრუქციაში ვოლფრამის ცილინდრიანი ელექტროდის მუშა ზედაპირიდან წანაცვლებისას ჩნდება დამატებითი ელექტროწინაღობა ელექტროდისა და ცილინდრის გარე ზედაპრს შორის. თუ იმასაც გავითვალისწინებთ, რომ ვოლფრამის ხვედრითი ელექტროწინაღობა 3-ჯერ მეტია სპილენძის წინაღობაზე, მაშინ ცხადია შედეგების დენი პრაქტიკულად მთლიანად გადის ელექტროდის იმ ნაწილში, რომელიც გარს არტყია ვოლფრამის ცილინდრს. შენადული წერტილების გარკვეული რაოდენობის მიღების შემდეგ გახურებული ელექტროდის მუშა ნაწილში ცხელდება ვოლფრამის ცილინდრიც, მაგრამ მისი ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი ნაკლებია სპილენძის გაფართოების კოეფიციენტზე. ყოველივე აღნიშნულის გამო, კუმშვის ძალის მოქმედებისას ვოლფრამის ცილინდრი ჩაიწნეხება ელექტროდის მუშა ნაწილის სიღრმეში. რის გამოც, კუმშვის ძალა მთლიანად მოდის ელექტროდის სპილენძის მუშა ზედაპირის გადახურებულ დანარჩენ ფართზე (ცილინდრის ფართის გამოკლებით) და სწრაფად ხდება ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის ზრდა. რაც ასახულია ნახ. 2.3-ზე.



ნახ.2.3. ელექტროდის ცვეთამდეგობა:

- 1-ქრომიანი სპილენძისაგან (SpX) დამზადებული ელექტროდი;
- 2-მუშა ნაწილში ვოლფრამის ჩასმული ცილინდრის მქონე ელექტროდი;
- 3-ელექტროდი მუშა ნაწილში SVC-პროცესით ჩასმული ცილინდრით.

ამრიგად, მიუხედავად მაღალი ცვეთამდეგობისა კომბინირებული ელექტროდის წარმოდგენილი კონსტრუქციისათვის დამახასიათებელია შემდეგი უარყოფითი თვისებები:

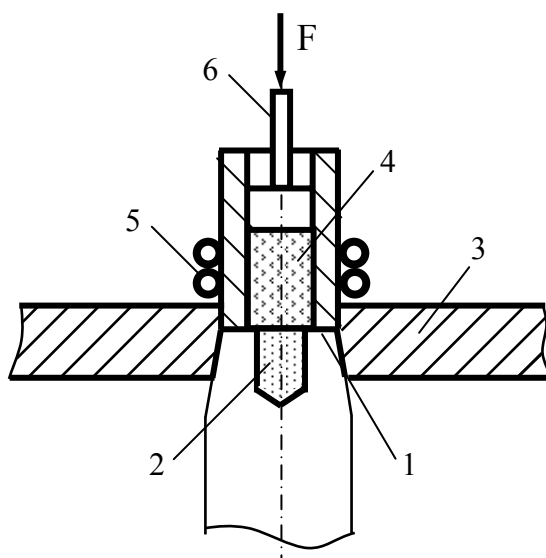
1. ელექტროდის მუშა ნაწილში ჩასმული გამაძლიერებელი ცილინდრის დაბალი ელექტროგამტარობა;
2. გამაძლიერებელი ცილინდრისა და საელექტროდე მასალებს შორის სხვადასხვა თბოგაფართოების კოეფიციენტი;
3. გამაძლიერებელი ცილინდრის და ელექტროდის მუშა ნაწილის ზედაპირებს შორის ღრეჩოს არსებობა.

თუ შესაძლებელი იქნება აღნიშნული ნაკლოვანებებიდან თავისუფალი ელექტროდის შექმნა, მისთვის დამახასიათებელი იქნება მაღალი, სტაბილური ცვეთამდეგობა კონტაქტური წერტილოვანი შედულების დროს.

2.3. კომბინირებული კონსტრუქციის ელექტროდის მიღების მეთოდი

კომბინირებული კონსტრუქციის ელექტროდის მიღების ახალ მეთოდად შეიძლება გამოყენებული იქნას ე.წ. მაღალტემპერატურული თვითგავრცელებადი სინთეზის რეაქციით. პროცესი, რაც შემდეგში მდგომარეობს. ზოგიერთ ქიმიურ ელემენტს შორის მიმდინარეობს ეგზოთერმული რეაქცია, მათი გარკვეულ ტემპერატურამდე გაცხელების შემთხვევაში. ასეთ ელემენტებად შეიძლება გამოყენებული იქნას ტიტანისა და ნახშირბადის ფხვნილი, ე.წ. TiC+Cu სისტემა. მათ შორის რეაქციის შედეგად მიიღება გადახურებული მასა, რომლის დაწნეხვით ფორმირდება მაღალი სისალისა და ცვეთამედეგობის მქონე მასალა. TiC+Cu სისტემის რეაქციის პროდუქტის ჩაწნეხვით ელექტროდის მუშა ნაწილში წინასწარ მომზადებულ ხვრეტში, შესაძლებელია კომბინირებული ელექტროდის დამზადება. თანაც TiC+Cu სისტემაში მათი პროცენტული შეფარდება ისე შეიძლება შეირჩეს, რომ ელექტროდის მუშა ნაწილში ჩაწნეხილი ცილინდრის ელექტროგამტარობა არ ჩამოყარდებოდეს სპილენძის ელექტროგამტარობას [120,121,122].

კომბინირებული ელექტროდის თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზის პროცესით მიღების სქემა მოცემულია ნახ.2.4-ზე



ნახ.2.4. კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების კომბინირებული ელექტროდის თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზის პროცესით მიღების სქემა:

1-ელექტროდის მუშა ნაწილი; 2-ნახვრეტი (სადაც ხდება წინასწარ ჩაყრილი რეაქციის პროდუქტის ჩაწნეხვა); 3-კორპუსი; 4-(TiC+Cu) სისტემის ფხვნილის ნარევი; 5-ინდუქტორი; 6-F დაწნევის შემქმნელი მექანიზმი.

კორპუსში 3 წინასწარ ჩამაგრებულია 1 ელექტროდი წინასწარ დამზადებული 2 ხვრეტით. იმავე კორპუსის ცილინდრში მოთავსებულია Ti-C სისტემის ფხვნილი 4. ამავე კორპუსის ცილინდრზე განლაგებულია ინდუქტორი 5; მასზე მაღალი სიხშირის ძაბვაზე მიერთების შემთხვევაში, ხდება Ti-C ფხვნილის გახურება და ეგზოთერმული რეაქციის ინიცირება. რეაქციის დამთავრებისთანავე F ძალის მოქმედებით 6 დგუშით რეაქციის პროდუქტი ჩაიწნეხება 2 ხვრეტში. ჩაწნეხილი მასის ტემპერატურა ახლოსაა სპილენძის დნობის ტემპერატურასთან [122,123], რის გამოც ჩაწნეხილი მასა არამარტო ავსებს ხვრეტს, არამედ მის კედლებთან ქმნის სპილენძის კრისტალების დნობის კერებს; ამის საფუძველზე შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ჩაწნევით მიღებული ცილინდრის ზედაპირები ამავე დროს შედუღებულია სპილენძის ელექტროდის მუშა ნაწილთან. კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების კომბინირებული ელექტროდის მიღების აღწერილ მეთოდზე მიღებულია საავტორო მოწმობა [134].

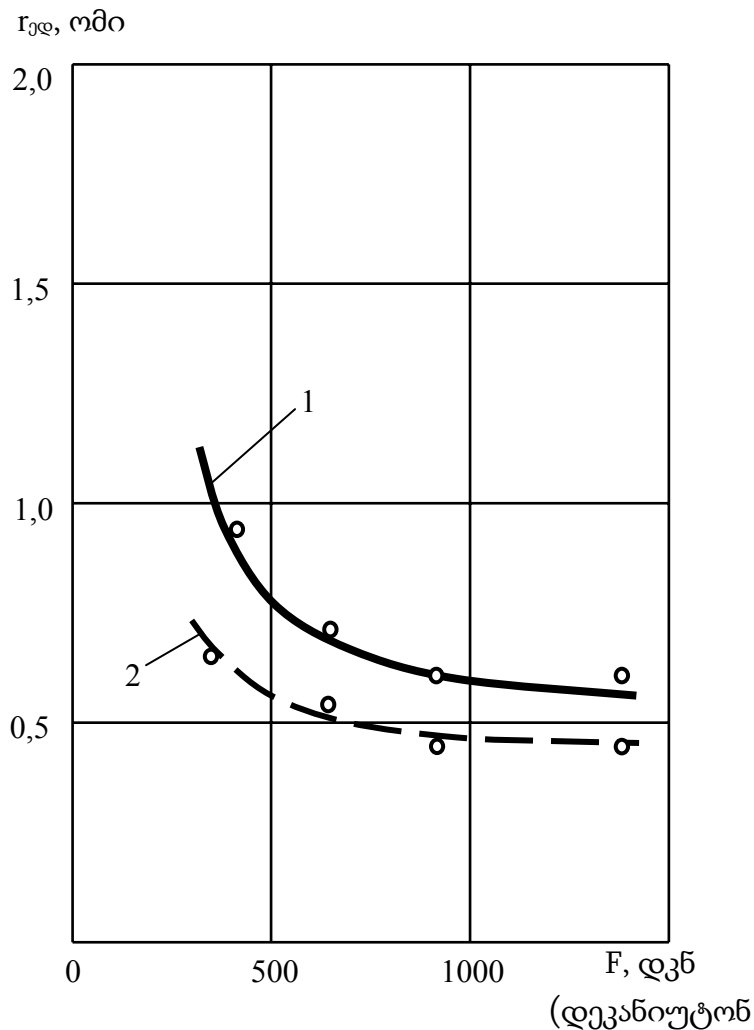
ჩვენს მიერ დამუშავებული მეთოდით მიღებული კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ელექტროდი ხასიათდება მაღალი ცვეთამდეგობით (ნახ.2.3), რაც იმის გარანტიაა, რომ მრავალ შედუღების პროცესში ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის წინაღობა $r_{ელ}$ სტაბილურად შეიძლება ჩავთვალოთ.

2.4. შესადუღ დეტალსა და ელექტროდის მუშა ზედაპირს შორის წინაღობის სტაბილიზირება

შესადუღებელი დეტალსა და ელექტროდის მუშა ზედაპირის კონტაქტური წინაღობა $r_{ელ}$ დამოკიდებულია დეტალის და ელექტროდის ზედაპირების მდგომარეობაზე.

როგორც ცნობილია დეტალის ზედაპირი ჩვეულებრივ მდგომარეობაში დაფარულია ჟანგის ფენით, მტვერით, ზეთის ლაქებით, წყლის ორთქლით. თითოეული მათგანი თავისებურად მოქმედებს დეტალის ზედაპირის ელექტროგამტარობაზე. ამის გამო იგი განსაზღვრავს $r_{ელ}$ წინაღობის სიდიდეს. ამ წინაღობამ კი მნიშვნელოვნად უნდა იმოქმედოს დენის დაშუნტვის პირობებზე ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას. ამიტომ დაშუნტვის პროცესის

მოდელირებისას აუცილებელი იქნება მისი ჩართვა მოდელში, როგორც შედეგების პროცესზე არსებითად მოქმედ ფაქტორზე. თუმცა, ამის აუცილებლობა შეიძლება გამორიცხული იქნას, თუ წინასწარ შესაძლებელი იქნება ყველა შესაძლებელი დეტალის ზედაპირის ერთნაირ მდგომარეობამდე მიყვანა, რაც გულისხმობს შესაძლებელი დეტალის ზედაპირის შედეგების წინ ჟანგის ფენისაგან, მტვერისაგან, ზეთის ლაქებისაგან გათავისუფლებას. ეს შესაძლებელია დეტალის ზედაპირის შედეგებისათვის წინასწარი მომზადებით ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ცხრილში 2.1, ან დეტალის ზედაპირის მექანიკური გაწმენდით რკინის ჯაგრისის საშუალებით. ორივე შემთხვევაში ელექტროდსა და დეტალს შორის წინაღობა $r_{\text{ელ}}$ სტაბილური ხდება (ნახ.2.5), რადგანაც მისი მნიშვნელობა პრაქტიკულად უცვლელი რჩება შედეგების კუმშვის ძალის დიდ დიაპაზონში ცვლილებისას.



ნახ.2.5. ელექტროდსა და დეტალს შორის წინაღობის სტაბილიზირება დეტალის ზედაპირის დამუშავებისას:

1-ქიმიური საშუალებებით; 2-მექანიკური გაწმენდით (შესაძლებელი დეტალის სისქე 1,5+1,5; მასალა - დაბალნახშირბადიანი ფოლადი).

2.5. დასკვნები

1. ახლებურადაა კლასიფიცირებული ორმხრივ მრავალწერტილოვან კონტაქტურ შედუღებაზე მოქმედი ფაქტორები. ცალკე გამოყოფილია ფაქტორები, რომელთა სტაბილიზირებაა შესაძლებელი და ამით შემოთავაზებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების პროცესის მოდელის გამარტივების შესაძლებლობა.
2. დამუშავებულია მალლი ცვეთამდეგობის მქონე ახალი კონსტრუქციის კონტაქტური შედუღების ელექტროდი. მისი გამოყენებით შესაძლებელია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელში ელექტროდისა და შესადული დეტალს შორის კონტაქტის წინააღმდეგობა ჩაითვალოს სტაბილურ პარამეტრად.
3. დამუშავებულია მაღალი ცვეთამდეგობის მქონე ელექტროდის მიღების მეთოდი, რომლის მიხედვითაც შედუღების ელექტროდის მუშა ნაწილის ცილინდრულ ნახვრეტში ხდება TiC+Cu სისტემის გამოყენებით მაღალტემპერატურული თვითგავრცელებადი სინთეზის რეაქციით მიღებული ცხელი მასის ჩაწნევა.

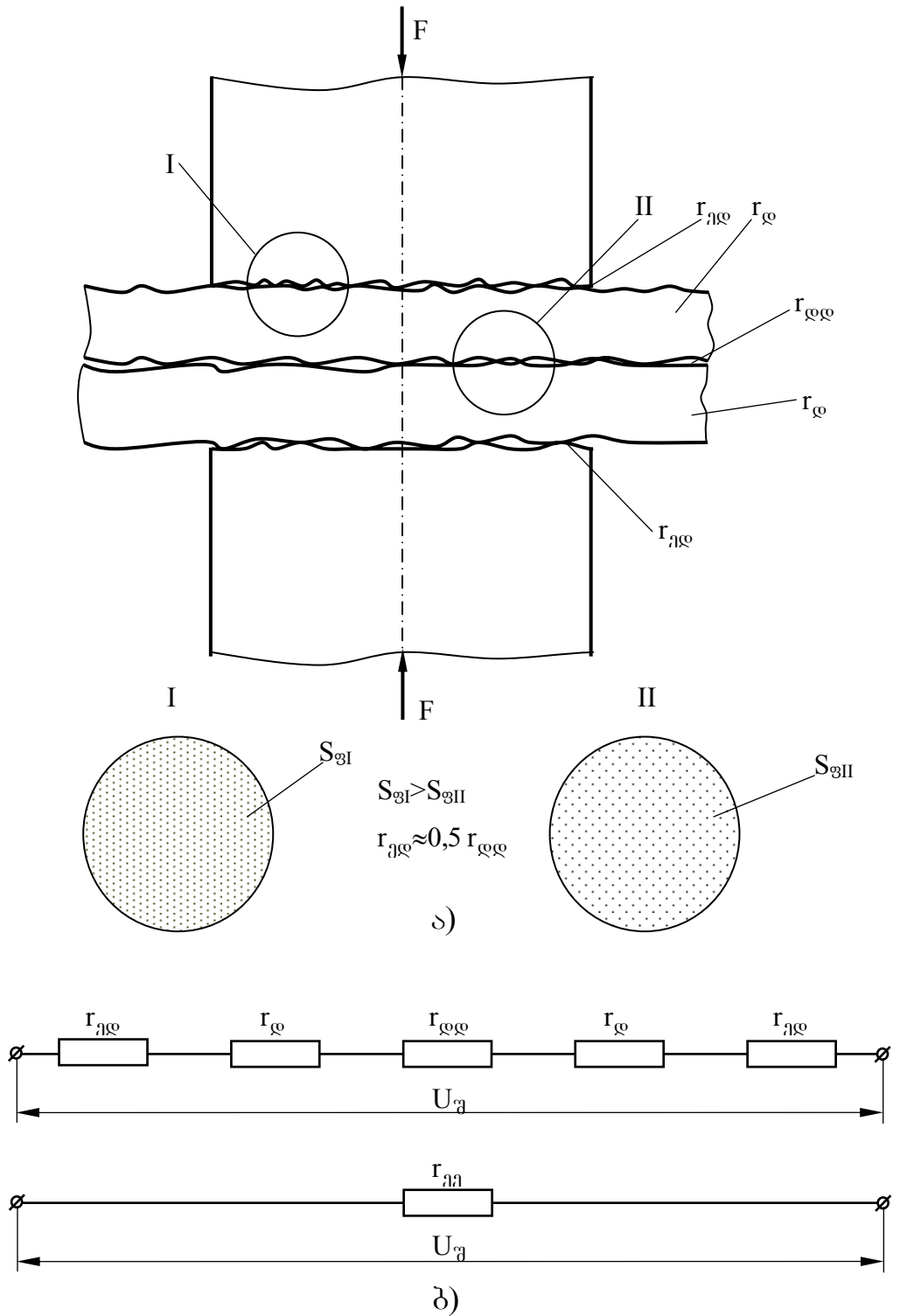
3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მოდელის პარამეტრების დადგენა

წინა თავში აღნიშნული იყო, რომ კონტაქტურ მრავალწერტილოვან ორმხრივ შედუღებაზე მოქმედი შემამოფოთებელი ფაქტორების სიმრავლის გამო ყოველი მათგანის გათვალისწინება შედუღების პროცესის მოდელირების დროს შეუძლებელია. ამის გამო აუცილებელი გახდა ზოგიერთი მათგანის სტაბილიზირება. კერძოდ, შედუღების წინ შესადული დეტალების ზედაპირების დამუშავებამ, აგრეთვე ცვეთმედეგი ელექტროდის კონსტრუქციის შექმნით სტაბილური გახდა შედუღების ზონის კონტაქტური წინაღობა ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტის ადგილას. ამით შესაძლებელი გახდა შედუღებისას, დენის დაშუნტვის პროცესის შესწავლისას, გათვალისწინებული იქნას შედუღების პროცესის მოდელში ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის წინაღობის კონკრეტული მნიშვნელობა.

3.1. კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ზონის შენაცვლების სქემა

შესადული დეტალების ზედაპირები ყოველთვის ხასიათდებიან მიკროუთანაბრობით [59,60,118]. ზედაპირის მიკროუთანაბრობა დამოკიდებულია დეტალის ზედაპირის დამუშავების სახეობაზე, ხასიათდება მიკრორელიეფების სიმაღლით და იგი აგრეთვე, დამოკიდებულია კონტაქტში მყოფი მასალების სახეობაზე (ნახ.3.1). ასე მაგალითად, სპილენძის ელექტროდის ზედაპირის მიკრორელიეფების სიმაღლე ნაკლებია შესადუღებელი დეტალის ზედაპირის მიკრორელიეფებზე. მათი ზედაპირების ურთიერთდაჭერის შემთხვევაში F ძალის მოქმედების შემთხვევაშიც კი, კონტაქტში მოდის ზედაპირები ცალკეული შეზღუდული ფართით (I,II, ნახ.3.1). $S_{\text{ფ1}}, S_{\text{ფ11}}$ შეზღუდული კონტაქტის გამო, $S_{\text{ფ1}}, S_{\text{ფ11}}$ ფართების ადგილას გვაქვს გარდამავალი წინაღობა, ე.წ. კონტაქტური წინაღობა. ასეთი წინაღობები გვაქვს (ნახ.3.1,ა): ელექტროდსა და დეტალს შორის

კონტაქტის ადგილას $r_{ელ}$; დეტალსა და დეტალს შორის კონტაქტის ადგილას $r_{დე}$.
 აგრეთვე გვაქვს დეტალის წინაღობა $r_{დე}$.



ნა. 3.1. შედუღების ზონა (ა) და მისი ექვივალენტური შენაცვლების სქემა (ბ):
 $r_{ელ}$ -ელექტროდსა და დეტალს შორის გარდამავალი წინაღობა;
 $r_{დე}$ - შესადუღებელი დეტალის წინაღობა;
 $r_{დე}$ - შესადუღებელ დეტალებს შორის გარდამავალი წინაღობა.

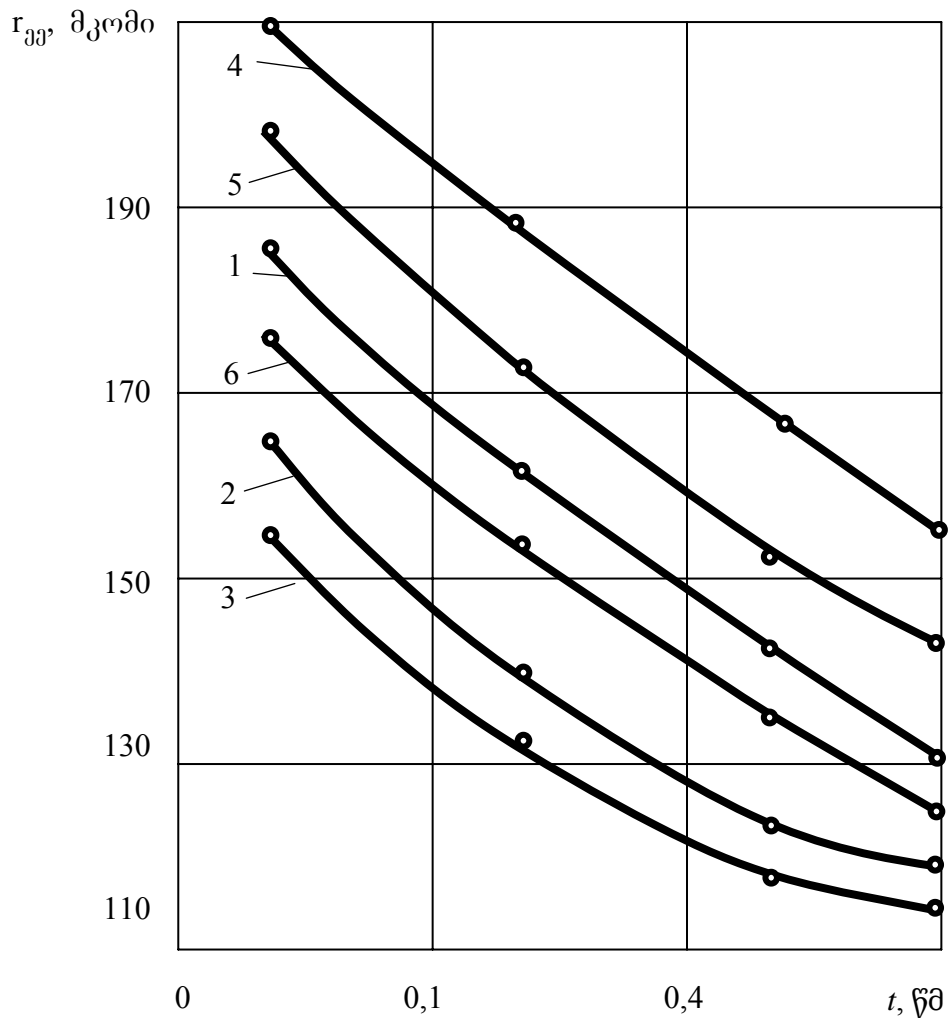
მიღებულია, რომ კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ზონის სრული კონტაქტური წინაღობა:

$$r_{კკ} = 2r_{კღ} + r_{ღღ} + 2r_{ღ}.$$

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას, შედუღების დენის დაშუნტვის პროცესის შესწავლისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას დენის გავლა ცალკეულ წინააღობებში. ამისათვის, თითოეული მათგანი ჩართული უნდა იქნას ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელში.

ისმის კითხვა – როგორი უნდა იყოს ამ წინააღობების სიდიდეები დამუშავებულ მოდელში?

კონტაქტური წინააღობების: $r_{ღ}, r_{კღ}, r_{ღღ}$ და მათი ჯამური მნიშვნელობა $r_{კკ}$ შედუღების პროცესში მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული (ნახ.3.2).



ნახ. 3.2. კონტაქტური წინააღობის $r_{კკ}$ ცვლილება შედუღების დროს:

- 1-ნომინალური რეჟიმი; 2- კუმშვის ძალის F გაზრდა; 3-ელექტროდის მუშა ზედაპირის ზომების გაზრდა; 4- კუმშვის ძალის შემცირება; 5-შედუღების დენის შემცირება; 6- შედუღების დენის გაზრდა.

ჯამური კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{კ}}$ ცვლილების სურათი (ნახ.3.2, მრუდი1), რომელიც შეესაბამება შედუღების ნომინალურ რეჟიმს (როცა შედუღების დენს I , კუმშვის ძალას F და შედუღების ხანგრძლივობას $t_{\text{კ}}$ აქვთ ოპტიმალური მნიშვნელობები) განსხვავებული იქნება, თუ გავზრდით შედუღების ზონაზე მოქმედ კუმშვის ძალას F (ნახ.3.2, მრუდი 2).

კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{კ}}$ ცვლილების სურათი ოპტიმალურ რეჟიმის შესაბამისი (ნახ.3.2, მრუდი 1) მიღებულია დაბალნახშირბადიანი საკონსტრუქციო ფოლადის ფლ.3-ს 2 მმ-იანი სისქის ორი ფურცლის კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას. შედუღების ოპტიმალურ პარამეტრებად შერჩეული იყო: შედუღების დენი $I_{\text{შ}}=10$ კა; კუმშვის ძალა $F=300$ დკნ (კგმ); შედუღების ხანგრძლივობა $t_{\text{კ}}=0,8$ წმ. ნიმუშების შედუღებას ვახდენდით MT-601 კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების მანქანაზე. შედუღების დენის და ძაბვის მნიშვნელობებს ვსაზღვრავდით ნახ.3.3,ა-ზე მოყვანილი სქემის მიხედვით. იმ განსხვავებით, რომ დენის და ძაბვის გადამწოდებიდან მოხსნილი სიგნალები გადაეწოდებოდა B1 და B2 შლეიფური ოსცილოგრაფის გალვანომეტრების მაგიერ ИСКРА-226 სისტემის კომპიუტერის მართვის ბლოკს. წინასწარ შედგენილი პროგრამის მიხედვით შედუღების პროცესში დენის და ძაბვის მნიშვნელობების გაზომვა ხდებოდა დროის მომენტებში: $t_{\text{კ}}=0,04$ წმ; $t_{\text{კ}} = 0,125$ წმ; $t_{\text{კ}}=0,22$ წმ; $t_{\text{კ}}=0,3$ წმ.

აღსანიშნავია, რომ კონტაქტური წინაღობა $r_{\text{კ}}$ შედუღების ოპტიმალურ რეჟიმზე დროის ზემოთ მითითებულ შუალედში მცირდება 180-დან 130 მკომამდე. ჯამური კონტაქტური წინაღობის შემცირების მიზეზი შემდეგია: შედუღების პროცესში კონტაქტის ადგილების გახურებასთან ერთად F კუმშვის ძალის მოქმედებით ხდება მიკრორელიეფების დეფორმაცია, რის შედეგადაც იზრდება კონტაქტის ფართი $S_{\text{კ}}$, და ამით მცირდება თანდათანობით კონტაქტური წინაღობის თითოეული შემადგენელი $r_{\text{კლ}}, r_{\text{ლკ}}$:

$$r_{\text{კლ}} = (\rho_1 + \rho_2) \frac{\ell_{\text{კ1}} + \ell_2}{S_{\text{კ}}}, \quad r_{\text{ლკ}} = \rho \frac{2\ell_2}{S_{\text{კ2}}}, \quad (3.1)$$

სადაც ρ_1 – ელექტროდის მასალის ხვედრითი წინაღობაა;

ρ_2 – შესადუღებელი დეტალის ხვედრითი წინაღობაა;

$\ell_{\text{ჟ1}}$ – ელექტროდის ზედაპირის მიკრორელიეფების საშუალო სიმაღლეა;

ℓ_2 – შესადუღებელი დეტალის ზედაპირის მიკრორელიეფების საშუალო სიმაღლეა;

$S_{\text{ჟ1}}$ – ელექტროდის და დეტალის ზედაპირის მიკრორელიეფების დეფორმაციით (F ძალის მოქმედებით და დეტალის გახურების შედეგად) ფორმირებული ფართია;

$S_{\text{ჟ2}}$ – შესადული დეტალების ზედაპირების მიკრორელიეფების დეფორმაციით ფორმირებული ფართია.

შედულების ზონაზე მოქმედი კუმშვის ძალის F გაზრდის შემთხვევაში (ნახ.3.2, მრუდი 2) კონტაქტური წინაღობის ცვლილების ხასიათი იგივე რჩება და იგი იცვლება 160 მიკროომიდან 120 მიკროომამდე. ნომინალურ რეჟიმზე შედულებისაგან განსხვავებით კუმშვის ძალის გაზრდით $r_{\text{ჟ}}$ წინაღობის შემცირება (3.1) გამოსახულებაში გამოწვეულია $S_{\text{ჟ1}}$ და $S_{\text{ჟ2}}$ ფართის გაზრდით. ამ უკანასკნელის მიზეზს წარმოადგენს შედულების დროს დეტალის და ელექტროდის გახურებით და F ძალის გაზრდით მიკრორელიეფების პლასტიკური დეფორმაციის ინტენსიობის გაზრდა.

ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის გაზრდით კონტაქტური წინაღობის ცვლილების ხასიათი რჩება პრაქტიკულად უცვლელი, იცვლება მხოლოდ მისი სიდიდე. კერძოდ, ნომინალურ რეჟიმზე შედულების შემთხვევასთან შედარებით კიდევ უფრო მცირდება კონტაქტური წინაღობა $r_{\text{ჟ}}$, რაც გამოწვეულია მისი ცალკეული შემადგენლების $r_{\text{ჟ1}}$ და $r_{\text{ჟ2}}$ შემცირებით. ეს უკანასკნელი კი გამოწვეულია (3.1) გამოსახულებაში შემავალი $S_{\text{ჟ1}}$ და $S_{\text{ჟ2}}$ ფართების შემცირებით.

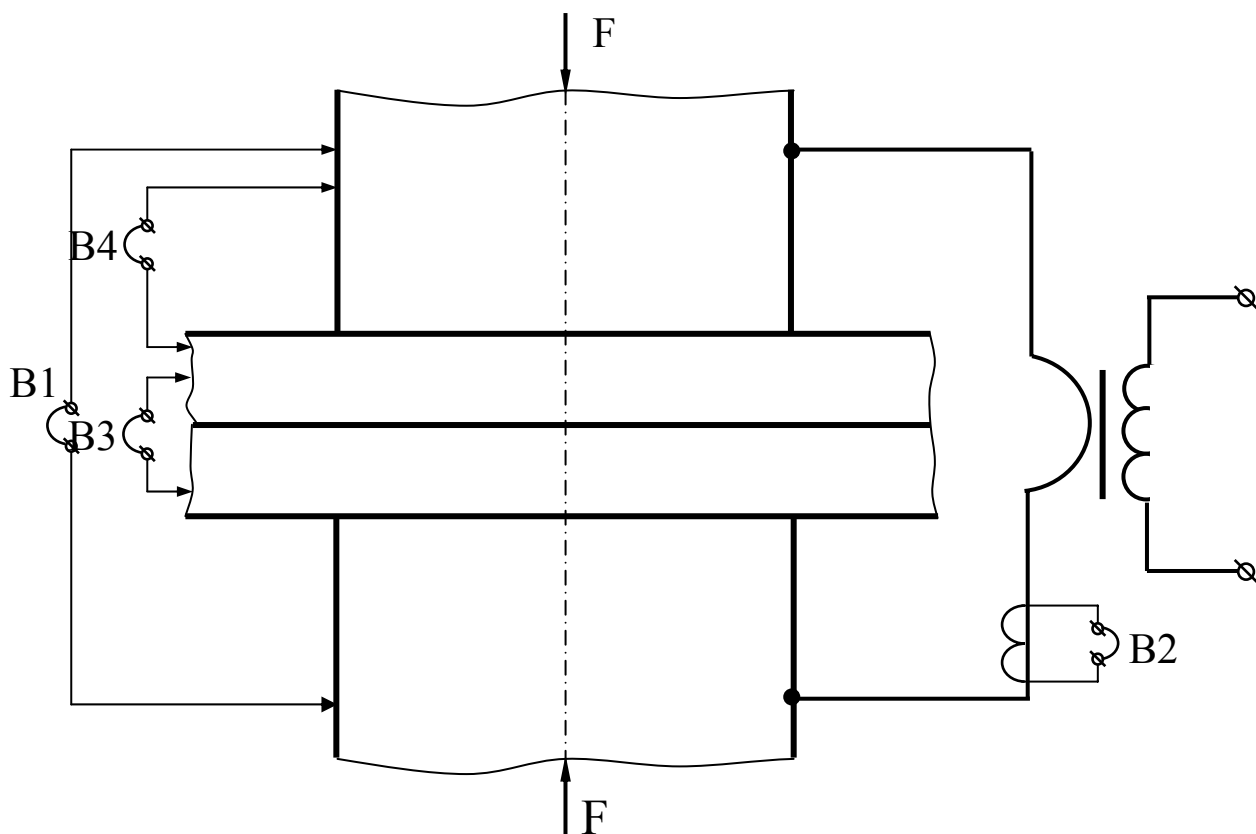
კონტაქტური წერტილოვანი შედულების ნომინალურ რეჟიმთან შედარებით კუმშვის ძალის F შემცირებისას, აგრეთვე პრაქტიკულად უცვლელი რჩება კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{ჟ}}$ ცვლილების ხასიათი; სამაგიეროდ, მნიშვნელოვნად იზრდება ამ წინაღობის სიდიდე. იგი იცვლება 220 მიკროომიდან 150 მიკროომამდე. ნომინალურ რეჟიმთან შედარებით კუმშვის ძალის შემცირებით მცირდება ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტის, აგრეთვე შესადულ დეტალებს შორის კონტაქტის მიკრორელიეფების დეფორმაციის ინტენსიობა. ამ უკანასკნელის

შედეგად მცირდება (3.1) გამოსახულებაში შემავალი $S_{\text{გ}1}$ და $S_{\text{გ}2}$ კონტაქტური ფართობი და შესაბამისად იზრდება $r_{\text{გ}}$ კონტაქტური წინაღობის ცალკეული შემადგენლები – $r_{\text{გდ}}, r_{\text{გლ}}$ კონტაქტური წინაღობები (ნახ.3.2, მრუდი 4).

კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{გ}}$ ცვლილების ხასიათის ისეთივე სურათთან გვაქვს საქმე შედუღების დენის შემცირების შემთხვევაშიც (ნახ.3.2, მრუდი 5). ამ შემთხვევაში კონტაქტური წინაღობა ნომინალურ რეჟიმზე შედუღებასთან შედარებით (ნახ.3.2, მრუდი 1) შედუღების დენის შემცირებით (დაახლოებით 20 %-ით) კონტაქტური წინაღობა $r_{\text{გ}}$ იზრდება, მაგრამ შედარებით უმნიშვნელოდ. უმნიშვნელოდ, მაგრამ მაინც წინაღობის $r_{\text{გ}}$ გაზრდა გამოწვეულია იმით, რომ დენის შემცირებით მცირდება შედუღების ზონაში გამოყოფილი სითბო, რის გამოც სხვა თანაბარი პირობების დაცვის შემთხვევაში ხდება ელექტროდის და დეტალის, ასევე დეტალებს შორის კონტაქტის ადგილებში მიკრორელიეფების პლასტიკური დეფორმაციის ინტენსიობის შესუსტება. ამ უკანასკნელის შედეგად მცირდება (3.1) გამოსახულებებში შემავალი $S_{\text{გ}1}$ და $S_{\text{გ}2}$ კონტაქტის ფართობი და შედარებით უმნიშვნელოდ, მაგრამ მაინც იზრდება $r_{\text{გ}}$ სრული კონტაქტური წინაღობის შემადგენელი $r_{\text{გდ}}, r_{\text{გლ}}$ ელემენტები.

შედუღების დენის გაზრდით მისი ნომინალურ რეჟიმზე შედუღების მნიშვნელობასთან შედარებით კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{გ}}$ ცვლილების მრუდი პრაქტიკულად უცვლელი რჩება და მცირდება მხოლოდ მისი სიდიდეები. ამ შემთხვევაში $r_{\text{გ}}$ კონტაქტური წინაღობის შემცირების მიზეზია ის, რომ შედუღების ზონაში გამოყოფილი სითბო იზრდება, ვიდრე ამას ადგილი აქვს ნომინალურ რეჟიმზე შედუღებისას, რის შედეგადაც საბოლოო ჯამში იზრდება ელექტროდის და დეტალის, აგრეთვე დეტალების ერთმანეთს შორის კონტაქტში მიკრორელიეფების პლასტიკური დეფორმაციის ინტენსიობა და ამით იზრდება $S_{\text{გ}1}$ და $S_{\text{გ}2}$ კონტაქტის ფართობი, რაც იწვევს (გამოსახულება (3.1)-ის მიხედვით) სრული კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{გ}}$ შემცირებას, შემადგენელი $r_{\text{გდ}}, r_{\text{გლ}}$ წინაღობების შემცირების ხარჯზე (ნახ.3.2, მრუდი 6).

ზემოთ განხილულ ყველა შემთხვევაში არ იყო გაანალიზებული სრულ კონტაქტურ წინალობაზე $r_{\text{კ}}$ შემადგენელი $r_{\text{ღ}}$ წინალობის გავლენა. ამ უკანასკნელის სიდიდეზე გავლენას ახდენს მხოლოდ ტემპერატურის ცვლილება და აქედან გამომდინარე, შედუღების დენის სიდიდე. კერძოდ, შედუღების დენის გაზრდით დეტალის წინალობა $r_{\text{ღ}}$ იზრდება, და პირიქით.



ნახ.3.3. კონტაქტური წინალობის გაზომვის სქემა:

B1- გალვანომეტრი $U_{\text{კ}}$ ძაბვის გაზომვისათვის;

B2-გალვანომეტრი $I_{\text{ღ}}$ დენის გაზომვისათვის;

B3-გალვანომეტრი $U_{\text{ღ}}$ ძაბვის გაზომვისათვის;

B4-გალვანომეტრი $U_{\text{კ}}$ ძაბვის გაზომვისათვის.

ამრიგად, შედუღების ხანგრძლივობის განხილული შუალედისათვის დამახასიათებელია კონტაქტური წინალობის ცვლილების ერთნაირი კანონზომიერება, რაც მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების მოდელის დამუშავებისას. ამავე მიზნით აუცილებელია კონტაქტური წინალობის ცალკეული შემადგენლის შედუღების პროცესში ცვლილების ხასიათის ცოდნა. კონტაქტური წინალობის გაზომვის სქემაში (ნახ.3.3)

ძაბვის სიდიდე მოხსნილი უშუალოდ შედეგების ელექტროდებიდან მიეწოდება შლეიფური ოსცილოგრაფის H117/1 გალვანომეტრს. კონტაქტური წერტილოვანი შედეგებისას ელექტროდებს შორის ძაბვის $U_{\text{მმ}}$ გაზომვას ვახდენდით B1 გალვანომეტრით. შესადულ დეტალებს შორის კონტაქტზე ძაბვის ვარდნას ვზომავდით B3 გალვანომეტრით. ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტზე ძაბვის ვარდნას $U_{\text{მლ}}$ ვზომავდით B4 გალვანომეტრით. გაზომვებს ვახდენდით დისკრეტულად, დროის 0,1 წმ-ის შუალედით. გაზომვის შედეგების მიხედვით ვსაზღვრავდით შესაბამის წინალობებს:

$$r_{\text{მმ}} = \frac{U_{\text{მმ}}}{I_{\text{გ}}}; \quad r_{\text{მლ}} = \frac{U_{\text{მლ}}}{I_{\text{გ}}}; \quad r_{\text{მლ}} = \frac{U_{\text{მლ}}}{I_{\text{გ}}}.$$

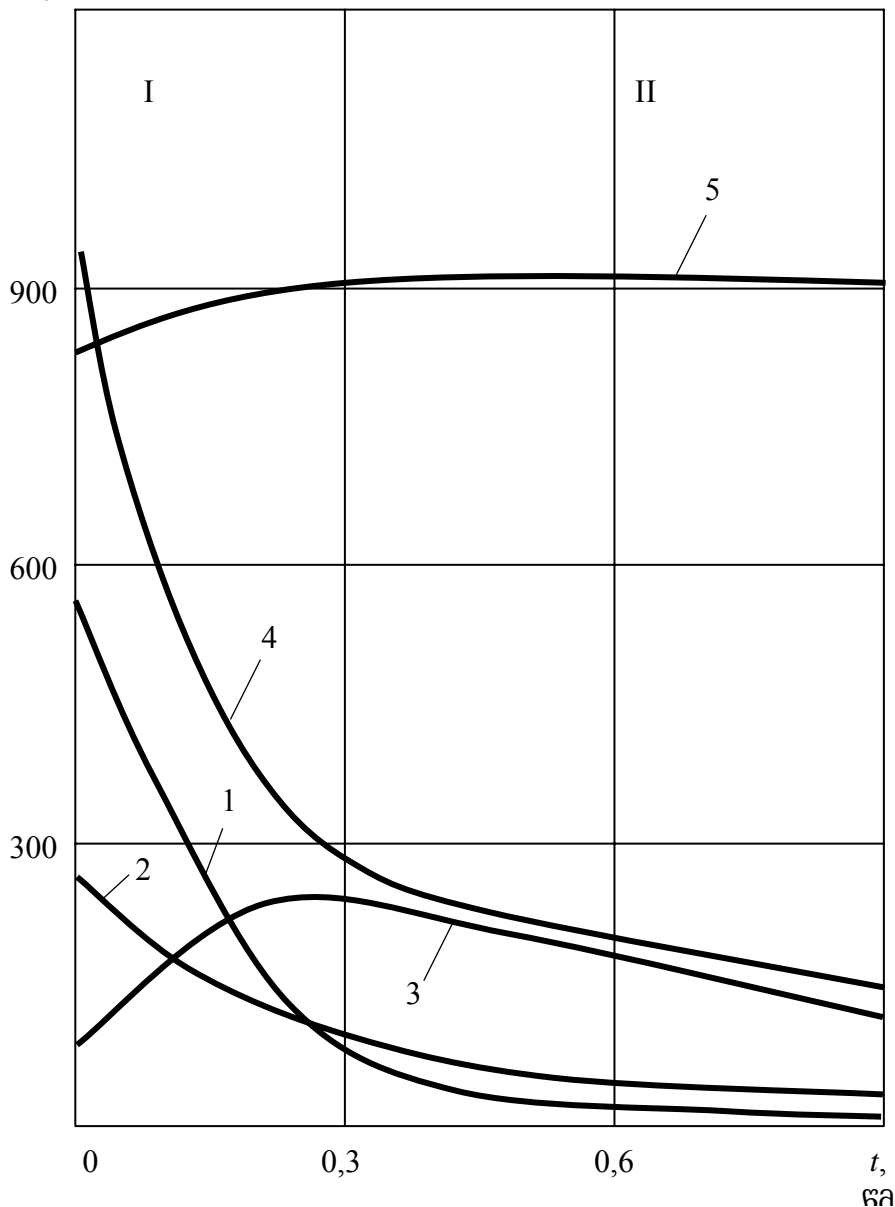
ამ უკანასკნელის მიხედვით აგებულია დამოკიდებულებები წარმოდგენილი ნახ.3.4-ზე.

დენის გამზომ გადამწოდიდან სიგნალი მიეწოდება ოსცილოგრაფის B2 გალვანომეტრს. მიღებული გამოსახულებების საშუალებით შეიძლება კონტაქტური წინალობის ცვლილების ხასიათის წარმოდგენა (ნახ.3.4). კონტაქტური წინალობის შედეგების პროცესში ცვლილების მიღებული სურათიდან ჩანს, რომ ელექტროდსა და დეტალს შორის წინალობა (ნახ.3.4, მრუდი 1), აგრეთვე დეტალსა და დეტალს შორის წინალობა (ნახ.3.4, მრუდი 2) შედეგების I სტადიის ბოლოს, რომელიც გრძელდება 0,3 წმ-ის განმავლობაში პრაქტიკულად მცირდება ნულამდე. პირველი სტადიის ბოლოს შესადული დეტალის საკუთარი წინალობა აღწევს მაქსიმუმს. ეს უკანასკნელი დაკავშირებულია იმასთან, რომ მესამე სტადიის ბოლოს შედეგების ზონაში გამოყოფილი ე.წ. ჯოულ-ლენცის სითბო აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რადგანაც პირველი სტადიის სიმცირის გამო სითბოს ართმევა შედეგების ადგილის გარემომცველი ლითონიდან თბოგამტარობის ხარჯზე უმნიშვნელოა. ცხადია, შესადული დეტალის $r_{\text{მლ}}$ წინალობის ასეთი ზრდა განპირობებულია მისი გახურებით. შედეგების II სტადიაში შესადული დეტალის წინალობა პრაქტიკულად რჩება უცვლელი და იგი განსაზღვრავს შედეგების ზონის სრული წინალობის სიდიდეს შედეგების პროცესის ბოლოსათვის.

თუ წარმოვიდგენთ მრავალწერტილოვანი შედეგების სქემას (თავი 1), ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედეგებისას დენის დაშუქვის პროცესზე

გავლენა უნდა მოახდინოს შედეგების პირველ სტადიაში $r_{\text{კლ}}$ და $r_{\text{ლლ}}$ წინაღობების შედარებით გაზრდილმა მნიშვნელობებმა. მეორე სტადიაში ამ წინაღობების გავლენა დენის დაშუნტვის პროცესზე უნდა შესუსტდეს, რადგანაც ჯამური კონტაქტური წინაღობის $r_{\text{კკ}}$ სიდიდის განმსაზღვრელია შესადული დეტალის წინაღობა $r_{\text{ლ}}$, რომელიც გამოირჩევა მეორე სტადიის განმავლობაში საკმაოდ დიდი სტაბილურობით.

r , მკომი



ნახ.3.4. წერტილოვანი შედეგების დროს ელექტრული კონტაქტური

წინაღობის ცვლილების ხასიათი:

1- $r_{\text{ლლ}}$ წინაღობა; 2- $r_{\text{კლ}}$ წინაღობა; 3- $r_{\text{ლ}}$ წინაღობა; 4- $r_{\text{კკ}}$ ჯამური კონტაქტური წინაღობა; 5-ჯამური კონტაქტური წინაღობა კონტაქტის ადგილას ჟანგის აფსკის არსებობისას; I,II- სტადიები.

ელექტროდისა და დეტალის, ასევე დეტალისა და დეტალის კონტაქტის ადგილში წინალობის რაიმე მიზეზით გაზრდისას, მაგალითად, ჟანგის თხელი ფენის არსებობის შემთხვევაში, რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს შესადული დეტალების ზედაპირების წინასწარი დამუშავების ტექნოლოგიურ პროცესში ტექნიკური წუნის დაშვებით $r_{\text{ელ}}$, $r_{\text{დე}}$ კონტაქტური წინალობების ან ერთ-ერთი მათგანის მნიშვნელობა შეიძლება ისე გაიზარდოს, რომ შედუღების ბოლომდე შედუღების ზონის სრული წინალობა $r_{\text{კ}}$ რამდენჯერმე აჭარბებდეს მის დასაშვებ ($r_{\text{კ}}$ -ს) მნიშვნელობას.

ნახ.3.4-ზე მრუდი 5 მიღებული იყო შესადულ დეტალებს შორის კონტაქტის ადგილებში ხელოვნურად ჟანგის ფენის შეტანით მიკრორელიეფებზე. ასეთი დენგაუმტარი თხელი ფენა მნიშვნელოვნად ზრდიდა ჯამურ კონტაქტურ წინალობას და მის მნიშვნელობაზე გავლენას ვერ ახდენდა კონტაქტური წინალობის დანარჩენი შემადგენელი ნაწილები ($r_{\text{ელ}}$, $r_{\text{დე}}$). თუ გავითვალისწინებთ, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების სქემის (ნახ.1.3) თავისებურებებს, ამ შემთხვევაში შედუღების დენის დაშუნტვისათვის შესანიშნავი პირობებია შექმნილი და $r_{\text{დე}} > 2 \dots 3 r_{\text{კ}}$ -ს. ნახ.3.4-დან ჩანს, აგრეთვე, რომ შედუღების I სტადიის დასაწყისში $r_{\text{ელ}} = 0,5 r_{\text{დე}}$.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელირების დროს დენის დაშუნტვის თავისებურებების შესწავლის მიზნით აუცილებელია კონტაქტური წინალობების შემადგენელ ელემენტებს შორის გამოვლენილი თანაფარდობანი იქნას გათვალისწინებული.

3.2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების სქემის თავისებურებების გათვალისწინებით მისი ფიზიკური მოდელის ფორმის განსაზღვრა

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღება, როგორც ადრე აღნიშნული იყო, ძირითადად გამოიყენება გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების დამზადებისათვის, სადაც ლითონკონსტრუქციების ცალკეული ელემენტები (დეტალები)

დამზადებულია დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისაგან. მათ შესადულებლად [118,151] ტექნოლოგიით გათვალისწინებულია ცვლადი დენი.

შედულების დროს დაშუნტვის პროცესის ანალიზს აწარმოებენ დროის მყისა მომენტისათვის, ამიტომ შეიძლება დავუშვათ, რომ დროის ასეთ მცირე მონაკვეთში შედულების დენი მუდმივია. ასეთი დაშვება გაადვილებს შედულების ელექტრული სქემის თავისებურებების გამოვლენას.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების სქემაში ჩართულია ორი შედულების ტრანსფორმატორი, რომლებიც განლაგებულია შესადული კონსტრუქციის ორივე მხარეს. ტრანსფორმატორის თითოეული მეორადი გრაგნილი თავიანთი ბოლოებით მიერთებულია ორ-ორ ელექტროდთან. ზედა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი მიერთებულია ზედა ორ ელექტროდთან, ხოლო ქვედა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი მიერთებულია ქვედა ორ ელექტროდთან. ზედა და ქვედა შედულების ტრანსფორმატორებს აქვთ რამდენიმე მეორადი გრაგნილი. მათი რაოდენობა დამოკიდებულია ერთდროულად შედულებული წერტილების რაოდენობაზე. თუ განვიხილავთ ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულების სქემის ფრაგმენტს, სადაც ხდება ერთდროულად ოთხი წერტილის მიღება, მაშინ სქემის ამ უბანზე შესადული დეტალების ორივე მხარეს განლაგებულ ოთხ ზედა და ოთხ ქვედა ელექტროდთან მიერთებულია ორი ზედა და ორი ქვედა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი (ნახ.1.3). თითოეული ზედა და ქვედა მეორადი გრაგნილი ერთმანეთთან შეერთებულია მიმდევრობით. ამაზე მიუთითებს ტრ-ის მეორადი გრაგნილის შესაბამის მომჭერებზე დასმული ძაბვის პოტენციალის ნიშნები.

გათვალისწინებულია, რომ დენმა გაიაროს შემდეგი გზით: ზედა ტრანსფორმატორის 11 მეორადი გრაგნილის „+“ მომჭერი; ელექტროდი 1; შესადული დეტალები 9,10; ელექტროდი 4; ქვედა ტრანსფორმატორის მეორადი 12 გრაგნილის „-“ მომჭერი; მეორადი გრაგნილი 12; მისი „+“ მომჭერი; ელექტროდი 3; შესადული დეტალები 10,9; ელექტროდი 2; მეორადი გრაგნილი 11-ის „-“ მომჭერი; მეორადი გრაგნილი 11.

ანალოგიური გზით გადის დენი მარჯვენა შედულების კონტურში. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულების დანადგარის კონსტრუქცია საუკეთესოა

შედულების ტექნოლოგიური ოპერაციების მექანიზაციის თვალსაზრისით, მაგრამ როგორც მითითებული იყო წარმოდგენილი სამუშაოს პირველ თავში, ხასიათდება მთელი რიგი უარყოფითი მხარეებით, მათ შორის, მთავარია აუცილებელი მოთხოვნა, რომ შესადული დეტალების ზედაპირები მომზადებული იქნას შედულების წინ ტექნოლოგიის სრული დაცვით. საკმარისია ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტში, ასევე დეტალებს შორის კონტაქტის ზონაში აღმოჩნდეს რკინის ჟანგის თხელი დენგაუმტარი აფსკი, რომ ზემოთ მითითებული გზით დენმა შეიძლება საერთოდ არ გაიაროს, რასაც თან მოყვება დეტალების შეუდულებლობა. ე.ი. საქმე გვაქვს დენის სრული დაშუქვის პროცესთან.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულებისას დენის დაშუქვის სრული ან ნაწილობრივი დაშუქვის პროცესის შესწავლის მიზნით აუცილებელია ფიზიკურ მოდელში თითოეული შედულების ზონა წარმოდგენილი იყოს თავისი შენაცვლების სქემის სახით. ე.ი. ერთმანეთთან მიმდევრობით შეერთებული წინააღობების $r_{ედ}, r_{დდ}, r_{დ}$ სახით.

პირველ თავში მოყვანილი ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების სქემიდან (ნახ.1.3) ჩანს, რომ დაშუქვის დენი აუცილებლად გადის შესადული კონსტრუქციის ზედა და ქვედა ნაწილში განლაგებული ელექტროდებს შორის მდებარე შესადულ დეტალებში. მაგალითად, დაშუქვის დენის გავლის ერთ-ერთი გზა ემთხვევა 1 და 2 ელექტროდებს შორის მოთავსებული შესადული დეტალის უბანს, ან სხვანაირად, დაშუქვის დენი გადის შედულების ტრანსფორმატორის ერთიდაიგივე მეორად გრაგნილთან მიერთებულ ელექტროდებს შორის მდებარე შესადული დეტალის უბანზე. ამ უბანს მომავალში ჩვენ ვუწოდებთ შემდეგნაირად: წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული შესადული დეტალების უბანი. ვინაიდან, ასეთი უბანი ორია, ე.წ. ზედა წყვილელექტროდებს და ქვედა წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული უბანი, ე.ი. 1,2 ელექტროდებსა და 3,4 ელექტროდებს შორის მოთავსებული ზედა და ქვედა დეტალის უბანი.

წყვილელექტროდებს შორის უბანზე დენგამტარი ნაწილი შეზღუდულია ელექტროდების მუშა ზედაპირების დიამეტრებით. ამიტომ აღნიშნულ უბანზე მდებარე ელექტროდებზე ძაბვის ვარდნა და ელექტროდის მუშა ზედაპირის

დიაგნოზით შემოფარგლული უბნის წინაღობები განსაზღვრავენ დაშუნტვის დენის სიდიდეს

$$I_{\text{ღობ}} = \frac{U_{1,2}}{r_{\text{ღ1}}} , \quad (3.2)$$

სადაც $U_{1,2}$ – წარმოადგენს 1 და 2 ელექტროდებზე გაზომილი ძაბვის სიდიდეს;

$I_{\text{ღობ}}$ – 1,2 ელექტროდებს შორის მდებარე შესადული დეტალების უბანზე გამავალი დაშუნტვის დენის სიდიდე;

$r_{\text{ღ1}}$ – 1,2 წყვილელექტროდებს შორის მდებარე ზედა დეტალის წინაღობა.

ზემოთ აღნიშნულის გამო, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელირებისას წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის უბანი დაშუნტვის პროცესის შესწავლისათვის უნდა იქნას წარმოდგენილი მისი წინააღობის $r_{\text{ღ1}}$ სახით.

ქვედა წყვილელექტროდებს 3,4 შორის მოთავსებული ქვედა შესადული დეტალის უბანში გამავალი დაშუნტვის დენი ტოლია:

$$I_{\text{ღოქ}} = \frac{U_{3,4}}{r_{\text{ღ2}}} , \quad (3.3)$$

სადაც $U_{3,4}$ – წარმოადგენს 3,4 წყვილელექტროდებზე გაზომილ ძაბვას;

$I_{\text{ღოქ}}$ – 3,4 ელექტროდებს შორის მდებარე შესადული დეტალის უბანში გამავალი დაშუნტვის დენის სიდიდეა;

$r_{\text{ღ2}}$ – 3,4 წყვილელექტროდებს შორის მდებარე ზედა დეტალის წინააღობაა.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ფიზიკურ მოდელში 3,4 ელექტროდებს შორის მდებარე უბანი წარმოდგენილი უნდა იქნას $r_{\text{ღ2}}$ წინააღობის სახით.

ორ მეზობელ წყვილელექტროდში შემავალ 2,5 ელექტროდებს შორის მდებარე შესადულ დეტალებში გადის აგრეთვე $I_{\text{ღო}}$ დაშუნტვის დენი (ნახ.1.3), რაც გამოწვეულია იმით, რომ 2 და 5 ელექტროდებზე პოტენციალთა სხვაობას აქვს ადგილი. ამის მიზეზია ის, რომ ზედა და ქვედა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაფილები წყვილელექტროდების საშუალებით ერთმანეთის მიმდევრობითაა ჩართული.

დაშუნტვის დენის სიდიდე ტოლია:

$$I_{\text{დო2,5}} = \frac{U_{2,5}}{r_{\text{ა1}}}, \quad (3.4)$$

სადაც $U_{2,5}$ – წარმოადგენს 2,5 ელექტროდებს შორის გაზომილ ძაბვის სიდიდეს;

$r_{\text{ა1}}$ – არის 2,5 ელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის დენგამტარი ნაწილის წინაღობა.

წყვილეელექტროდების ერთმანეთის მიმართ განლაგების ცვლით იცვლება 2,5 ელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის სიგრძე. სათანადოდ იცვლება მისი წინაღობა, რაც განსაზღვრავს, 2,5 ელექტროდებს შორის ძაბვის ვარდნის $U_{2,5}$ კონკრეტულ მნიშვნელობაზე, დაშუნტვის დენის სიდიდეს. ამის გამო დაშუნტვის პროცესის შესწავლისას აუცილებელია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში ჩართული იყოს $r_{\text{ა1}}$ წინაღობა.

დაშუნტვის დენი $I_{\text{დო}}$ გადის, აგრეთვე 3,8 ელექტროდებს შორის მდებარე ქვედა შედუღების დეტალში. მისი სიდიდე

$$I_{\text{დო3,8}} = \frac{U_{3,8}}{r_{\text{ა2}}}, \quad (3.5)$$

სადაც $U_{3,8}$ – არის 3,8 ელექტროდებს შორის ძაბვის ვარდნა;

$r_{\text{ა2}}$ – 3,8 ელექტროდებს შორის მდებარე ქვედა დეტალის უბნის წინაღობა;

$I_{\text{დო3,8}}$ – არის ქვედა დეტალის 3,8 ელექტროდებს შორის მდებარე უბანში გამავალი დაშუნტვის დენი.

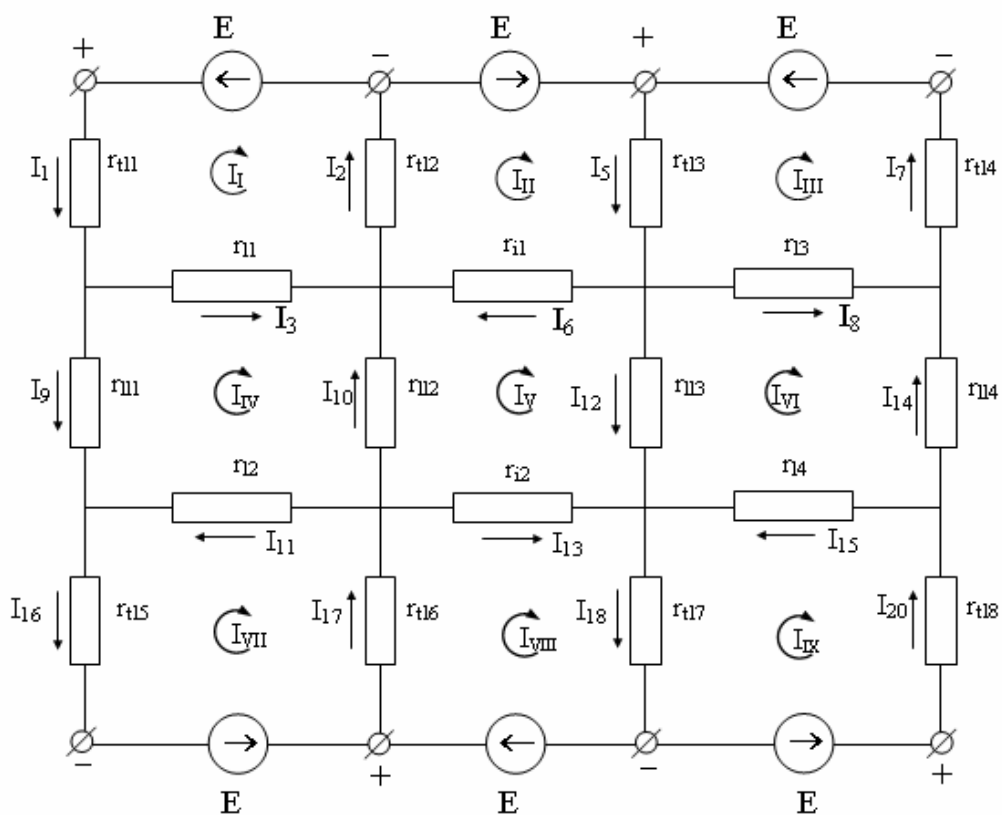
დაშუნტვის დენის აღნიშნული შემადგენლის გამოკვლევის მიზნით აუცილებელია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში ჩართული იქნას $r_{\text{ა1}}$ წინაღობის პარალელურად $r_{\text{ა2}}$ წინაღობა.

მსგავსი მსჯელობის საფუძველზე შეიძლება მივიდეთ იმ დასკვნამდე, რომ ორმხრივი კონტაქტური მრავალწერტილოვანი შედუღების ფიზიკურ მოდელში საჭიროა ჩაირთოს $r_{\text{დ3}}$, $r_{\text{დ4}}$ წინაღობანი. ისინი წარმოადგენენ შესაბამისად 5,6 და 7,8 ზედა და ქვედა წყვილეელექტროდებს შორის მოთავსებული ზედა და ქვედა უბნის წინაღობებს.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში საჭიროა ჩაირთოს აგრეთვე ენერგიის წყაროები (E), რომლებიც ცვლიან

შედულების ტრანსფორმატორს 11, 12, 17, 18 მეორად გრაგნილებს, როგორც შედულებისათვის აუცილებელ ელექტრული ენერჯის კვების წყაროებს. ამასთანავე გასათვალისწინებელია ისიც, რომ 2, 4 და 3,8 ელექტროდებზე მოდებულია ერთმანეთის საწინააღმდეგო პოტენციალები, რომელთა სიდიდე 1,2 და 3,4 ელექტროდებზე მოდებული პოტენციალის ტოლია. ამიტომ, 2,5 და 3,8 ელექტროდებს შორის უნდა ჩაირთოს იგივე ენერჯის წყაროები (E).

ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე შემუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების ფიზიკური მოდელის ფორმა. (ნახ.3.5). იგი შედგენილია ორი ზედა და ქვედა წყვილელექტროდების შემცველი ნაწილისათვის. ე.ი. იმ შემთხვევისათვის, როცა ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულებით მიიღება ერთდროულად 4 შედულების წერტილი. თუ ერთდროულად შესადული წერტილების რიცხვი იქნება მეტი, შესაბამისად დაემატება მოდელს შემადგენელი ელემენტები წინააღმდეგობების და ელექტრული ენერჯის წყაროს სახით.



ნახ.3.5. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების ფიზიკური მოდელი.

ამრიგად, მრავალწერტილოვანი ორმხრივი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელი, ამ პროცესის დროს დენის დაშუნტვის შესწავლის მიზნით, წარმოდგენილია ელექტრული წრედის სახით, რომელშიც ჩართულია 6 ერთნაირი ენერგიის წყარო და იგი შედგება 9 კონტურისაგან.

3.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელის პარამეტრები

წინა პარაგრაფში შემუშავებულ იქნა ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელის ფორმა. ერთმანეთის მიმდევრობით და პარალელურად ჩართული 10 წინაღობა ქმნის 9 კონტურს, რომელთაგან ექვსში ჩართულია ელექტრული ენერგიის წყარო, ხოლო 3 კონტური შედგენილია ელექტრული ენერგიის წყაროს გარეშე. სულ მოდელში შედის 22 ელემენტი და დასადგენია, რა სიდიდის უნდა იყოს ეს ელემენტები და, რა დიაპაზონში უნდა იცვლებოდეს მათი მნიშვნელობები.

ორმხრივი მრავალწერტილოვან კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში შემავალი წინაღობების შეცვლა შედუღების რეალურ პირობებში შესაძლო ცვლილებების ზღვრებში საშუალებას მოგვცემს:

1. გამოვლენილ იქნას დენის დაშუნტვის მოქმედი ფაქტორები;
2. გამოვლენილ იქნას, აგრეთვე, დენის დაშუნტვის კანონზომიერებანი;
3. შესაძლებელი გახდეს დაშუნტვის დენის რაოდენობრივი შეფასება;
4. შეიქმნას შედუღების დენის რეალური მნიშვნელობის საანგარიშო გამოსახულება.

წინაღობები $R_{დდ1}, R_{დდ2}, R_{დდ3}, R_{დდ4}$ ხელს უწყობენ თავიანთი სიდიდის შესაბამისად შედუღების დენის გადანაწილებას დაშუნტვის სხვადასხვა გზაზე. ამ წინაღობების სიდიდე, როგორც აღნიშნული იყო, დამოკიდებულია შესადუღებელი მასალის სახეობაზე. ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს შესადუღებელი დეტალის ზედაპირზე არადენგამტარი წარმონაქმნების სახეობებს: ჟანგის ფენა, კოროზიის პროდუქტები, ზედაპირული მტვერი და სხვა. გარდა აღნიშნულისა, დეტალებს

შორის კონტაქტის წინააღმდეგობის $r_{დღ1}, r_{დღ2}, r_{დღ3}, r_{დღ4}$ სიდიდეები დამოკიდებულია, როგორც აღნიშნული იყო შესადული დეტალის ზედაპირის მომზადებისა და დამუშავების სახეობაზე.

შედულებამდე დეტალების ზედაპირების შედუღებისათვის მომზადება ხდება სხვადასხვა ქიმიური ხსნარით, რომელთა ქიმიური შემადგენლობა დამოკიდებულია შესადულებელი დეტალების დამზადებისათვის გამოყენებულ მასალაზე [58,118,128].

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებით ლითონკონსტრუქციის დამზადებისას ერთმანეთთან დულდება 1,5...3 მმ სისქის დეტალები. მათი შედუღების ნომინალურ რეჟიმზე (როცა კუმშვის ძალა ტოლია 200 დკნ-ს) ერთმანეთთან კონტაქტში მყოფი დაბალნახშირბადიანი საკონსტრუქციო ფურცლების წინააღმდეგობა შეადგენს:

1. ზედაპირების ქიმიური საშუალებებით დამუშავებისას – 300 მკომს;
2. ზედაპირების მექანიკური საშუალებების გასუფთავებისას – 100 მკომს;
3. ზედაპირების საჭრისით დამუშავებისას – 1200 მკომს;
4. ჟანგის ფენის არსებობის შემთხვევაში – 80000 მკომს.

აღნიშნულის საფუძველზე მიზანშეწონილია შედუღების პროცესის მოდელით გამოკვლევისას გათვალისწინებული იქნას $r_{დღ1}, r_{დღ2}, r_{დღ3}, r_{დღ4}$ წინააღმდეგობების ცვლა 300-დან 80000 მკომამდე დიაპაზონში.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში (ნახ.3.5) შემავალი ზედა ელექტროდებსა 1,2,5,6 და ზედა შესადული დეტალის 9 კონტაქტის $r_{კდ1}, r_{კდ2}, r_{კდ3}, r_{კდ4}$ წინააღმდეგობები, ასევე ქვედა ელექტროდებსა 3,4,7,8 და ქვედა დეტალს 10 შორის კონტაქტის წინააღმდეგობები $r_{კდ5}, r_{კდ6}, r_{კდ7}, r_{კდ8}$ დენის დაშუნტვის გზებს ვერ წარმოქმნიან, მაგრამ მის სიდიდეზე დამოკიდებულია ზედა და ქვედა კონტურების წრედებში ზედა შესადული დეტალით და ქვედა შესადული დეტალით დაშუნტული დენის სიდიდე. აღნიშნული წინააღმდეგობების სიდიდე დამოკიდებულია:

1. შესადული დეტალის მასალის სახეობაზე, რადგანაც ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს შესადული დეტალის ზედაპირზე ჟანგის ფენის სახეობას და სისქეს;

2. შედუღებისათვის გამოყენებული მასალის სახეობაზე, რადგანაც ამ უკანასკნელის სახეობაზე დამოკიდებულია ელექტროდის და დეტალის კონტაქტის ზონაში პლასტიკური დეფორმაციის პირობები მასზე კუმშვის ძალის მოქმედებისას;

3. ელექტროდის მუშა ზედაპირის ცვეთის ინტენსიობაზე.

ეს უკანასკნელი შეიძლება მოდელში არ იქნას გათვალისწინებული, რადგან შედუღებისათვის დამუშავებულია პრაქტიკულად უცვლელი ელექტროდის კონსტრუქცია.

ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის წინალობათა სიდიდე დამოკიდებულია აგრეთვე დეტალების ზედაპირების შედუღებამდე წინასწარი მომზადების სახეობაზე.

ერთმანეთთან კონტაქტში მყოფი 10 მმ დიამეტრის მუშა ზედაპირის ფართის მქონე ელექტროდისა და 1,5...2 მმ სისქის მქონე დაბალნახშირბადიანი ფოლადის კონტაქტური წინალობა, ელექტროდზე 200 დკნ (დეკანიუტონი) კუმშვის ძალის მოქმედებისას შეადგენს [58]:

1. დეტალის ზედაპირების ქიმიური საშუალებებით დამუშავებისას – 120...180 მკომს;
2. დეტალის ზედაპირის მექანიკური საშუალებებით დამუშავებისას – 40...80 მკომს;
3. ზედაპირის საჭრისით დამუშავებისას – 500...700 მკომს;
4. ზედაპირზე ჟანგის ფენის არსებობისას – 3000...550000 მკომს.

ლიტერატურაში [118] მიჩნეულია, რომ ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტის ზონაში კონტაქტის წინალობა შეადგენს შესაძულ დეტალებს შორის კონტაქტის წინალობის ნახევარს: $r_{კლ} \approx 0,5 r_{დე}$. ამით არის განპირობებული, რომ ტემპერატურა ელექტროდისა და დეტალის კონტაქტის ზონაში ორჯერ ნაკლებია დეტალებს შორის კონტაქტის ტემპერატურის.

ზემოთ აღნიშნულის საფუძველზე ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის $r_{კლ1}, r_{კლ2}, r_{კლ3}, r_{კლ4}, r_{კლ5}, r_{კლ6}, r_{კლ7}, r_{კლ8}$ წინალობების ცვლილება

კონტაქტური ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელში გათვალისწინებულია 100-დან 50000 მკომამდე.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში ჩართული $r_{ღ1}, r_{ღ2}, r_{ღ3}, r_{ღ4}$ წინაღობების სიდიდეები დამოკიდებულია ელექტროდებს შორის ბიჯზე და შესადუღებელი დეტალების მასალების სახეობაზე, რაც შედუღების კონკრეტულ შემთხვევაში არ იმოქმედებს დენის დაშუნტვის პირობებზე.

ამ წინაღობების სიდიდე, აგრეთვე, დამოკიდებულია შესადუღებელი დეტალის სისქეზე და შეიძლება შემდეგი გამოსახულებით გამოითვალოს:

$$r_{ღ} = \frac{2\rho}{\pi\delta} \ln \left[\frac{c}{d_{\text{ჟ}}} + \sqrt{\left(\frac{c}{d_{\text{ჟ}}}\right)^2 - 1} \right], \quad (3.6)$$

სადაც ρ – შესადუღებელი დეტალის მასალის ხვედრითი წინააღობა;

δ – შესადუღებელი დეტალის სისქე შედუღების ადგილას;

$d_{\text{ჟ}}$ – ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრია;

c – წყვილ ელექტროდებს (1,2), (3,4), (5,6), (7,8) შორის ბიჯია.

წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული შესადუღებელი დეტალის წინააღობის $r_{ღ1}, r_{ღ2}, r_{ღ3}, r_{ღ4}$ სიდიდეს პრაქტიკულად განსაზღვრავს შესადუღებელი მასალის ხვედრითი წინააღობა.

დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული ფურცლების შედუღების პირობებში $r_{ღ} \approx 30 \dots 150$ მკომი, ამიტომ ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მოდელში გათვალისწინებულია $r_{ღ1}, r_{ღ2}, r_{ღ3}, r_{ღ4}$ წინააღობების ცვლილება აღნიშნულ დიაპაზონში.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მოდელში შემავალი 1,2 და 5,6 შორის ან იგივეა 3,4 და 7,8 წყვილელექტროდთა შორის $r_{\text{ა1}}, r_{\text{ა2}}$ წინააღობების სიდიდე, ასევე დამოკიდებულია შესადუღებელი დეტალების მასალის სახეობაზე, დეტალების სისქეზე და წყვილელექტროდთა შორის ბიჯის სიდიდეზე.

როგორც წესი, ეს უკანასკნელი აიღება ყოველთვის წყვილელექტროდებს შორის ბიჯზე ნაკლები. ამიტომ მიღებული იქნა, რომ $r_{\text{წ1}}, r_{\text{წ2}}$ წინააღმდეგობების ცვლილების დიაპაზონი ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკურ მოდელში არ უნდა აღემატებოდეს წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის $r_{\text{დ1}}, r_{\text{დ2}}, r_{\text{დ3}}, r_{\text{დ4}}$ წინააღმდეგობების ცვლილების დიაპაზონს.

ფიზიკური მოდელის მიხედვით ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების დენის დაშუნტვის პირობების გამოკვლევის მიზნით:

1. ვცვლიდით წყვილელექტროდებს შორის მდებარე დეტალის წინააღმდეგობის $r_{\text{დ1}}, r_{\text{დ2}}, r_{\text{დ3}}, r_{\text{დ4}}$ სიდიდეებს, ხოლო მოდელში შემავალ დანარჩენ წინააღმდეგობებს მათ შესაძლო ცვლილების დიაპაზონში ვაძლევდით ერთ კონკრეტულ მნიშვნელობას და ვტოვებდით უცვლელს. ამით სინამდვილეში, ვიკვლევდით წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის (l) ცვლილების გავლენას შედუღების დენის დაშუნტვაზე;
2. წყვილელექტროდთა შორის მდებარე დეტალის $r_{\text{წ1}}, r_{\text{წ2}}$ წინააღმდეგობებს ვაძლევდით მისი ცვლილების დადგენილი დიაპაზონიდან სხვადასხვა მნიშვნელობებს, ხოლო მოდელში შემავალ სხვა დანარჩენ წინააღმდეგობებს ვაძლევდით ერთ კონკრეტულ მნიშვნელობას მათი ცვლილების დიაპაზონიდან ერთ-ერთს. ამით სხვა დანარჩენ უცვლელ პირობებში, ვცვლიდით წყვილელექტროდთა შორის ბიჯს და ვიკვლევდით ამ უკანასკნელი ბიჯის გავლენას შედუღების დენის დაშუნტვაზე;
3. დეტალებს შორის კონტაქტის წინააღმდეგობის $r_{\text{დდ1}}, r_{\text{დდ2}}, r_{\text{დდ3}}, r_{\text{დდ4}}$ ცვლილებით, მოდელში შემავალი სხვა წინააღმდეგობების უცვლელობის შემთხვევაში, გამოკვლევული იქნა მათი გავლენა შედუღების დენის გადანაწილებაზე შედუღების ზედა და ქვედა კონტურებზე;
4. იმის გამო, რომ შედუღების სხვადასხვა რეჟიმზე მუშაობისას იცვლება კონტაქტური ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მანქანის უქმი სვლის ძაბვა, იმის დასადგენად, თუ როგორ იმოქმედებს შედუღების რეჟიმის ცვლილება დენის დაშუნტვის გამოკვლევის შედეგებზე, გამოკვლევები

ჩატარებული იქნა დენის წყაროს ე.მ.ძ-ის მნიშვნელობებზე $E = 1, E = 5, E = 10, E = 15, E = 20$ ვ.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მიღებულ მოდელში პარამეტრების ცვლილების ზემოთ მითითებულ მნიშვნელობებზე აუცილებელია განსაზღვრული იქნას მისი ცალკეულ ელემენტში გამავალი დენის მნიშვნელობა.

3.4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელის ელემენტებში გამავალი დენების ანგარიში

ელემენტებში გამავალი დენების განსაზღვრისათვის გამოყენებული იქნა კონტურული დენების მეთოდი [61,83,90,94,151]. შენაცვლების სქემაზე გვაქვს ცხრა კონტური. მათგან ექვსში ჩართულია დენის წყაროები.

რამდენიმე კვების წყაროს შემცველი განშტოებული წრედების ანალიზისა და გაანგარიშების უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს კირხჰოფის პირველი და მეორე კანონის უშუალო გამოყენების მეთოდი, შესაბამისად, კვანძური წერტილებისა და შეკრული კონტურისათვის.

რადგანაც ჩვენს შემთხვევაში შტოებისა და კვანძური წერტილების რიცხვი საკმაოდ დიდია, აუცილებელია განტოლებათა სისტემის ამოხსნა. ამ განტოლებების ჩაწერა შეიძლება, თუ ცნობილია ე.მ.ძ-ების სიდიდე და დენების მიმართულებები. ჩვენს შემთხვევაში ცნობილია ე.მ.ძ-ების სიდიდე და წინალობები. ჩვენს ამოცანას შეადგენს დენის სიდიდეების განსაზღვრა ცალკეულ შტოში და კონტურში. კირხჰოფის კანონების გამოყენებით შეგვიძლია შევადგინოთ იმდენი დამოუკიდებელი განტოლება, რამდენი სხვადასხვა უცნობი დენიცაა წრედში. მაგრამ ამ განტოლებების შესადგენად წინასწარ უნდა შევარჩიოთ უცნობი დენების ნებისმიერი მიმართულება, რომელიც დადებითად იქნება მიჩნეული. თუ შედგენილი განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შედეგად დენის ნაპოვნ სიდიდეს „პლუს“ ნიშანი აქვს, ეს ნიშნავს, რომ მისი მიმართულება ემთხვევა ადრე არჩეულ

დადებით მიმართულებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში, დენის ფაქტიური მიმართულება საწინააღმდეგოა შერჩეული დადებითი მიმართულებისა.

დამოუკიდებელ განტოლებათა საჭირო რაოდენობის მისაღებად კირხჰოფის პირველი კანონი უნდა გამოვიყენოთ ყველა კვანძური წერტილისათვის, გარდა ერთისა. ე.ი. დაცული უნდა იქნას პირობა: თუ კვანძების რიცხვია n , მაშინ შედგენილი უნდა იქნას $n-1$ განტოლება. დანარჩენი განტოლებები უნდა შედგეს კირხჰოფის მეორე კანონის მიხედვით ისე, რომ შეუძლებელი იყოს ყოველი შემდგომი განტოლების მიღება წინა განტოლებებიდან.

კირხჰოფის კანონების საფუძველზე შედგენილი განტოლებების მიხედვით შენაცვლების სქემის გაანგარიშებას შემდეგი თანმიმდევრობით ვახდენთ:

1. სქემაზე მონიშნავენ ე.მ.ძ-ის ცნობილ მიმართულებებს;
2. შეირჩევენ დენების ნებისმიერ დადებით მიმართულებებს;
3. ყველა კვანძური წერტილისათვის, გარდა ერთისა, ადგენენ განტოლებებს კირხჰოფის პირველი კანონის მიხედვით;
4. კონტურებს შემოუვლიან საათის ისრის ან მისი საწინააღმდეგო მიმართულებით და ადგენენ დანარჩენ განტოლებებს კირხჰოფის მეორე კანონით. ამასთანავე, ე.მ.ძ-ებს და დენებს, რომლებიც თანხვდება შემოვლის მიმართულებას, მიიჩნევენ დადებითად, ხოლო ამ მიმართულების საწინააღმდეგო დენებსა და ე.მ.ძ-ებს მიიჩნევენ უარყოფითად.
5. ამოხსნიან შედგენილ განტოლებათა სისტემას და განსაზღვრავენ უცნობ დენებს. თუ დენების ზოგიერთ მნიშვნელობას „მინუს“ ნიშანი ექნება, ეს ნიშნავს, რომ მათი მიმართულება საწინააღმდეგოა გაანგარიშების დასაწყისში პირობით შერჩეული მიმართულებისა.

დენის ორმხრივი მიყვანით, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების შენაცვლების სქემის მიხედვით შედგენილი იქნა განტოლებები კონტურული დენების მეთოდით და მიღებულ იქნა შემდეგი განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} (r_{\text{კლ1}} + r_{\text{კლ2}} + r_{\text{ლ1}})I_I - r_{\text{კლ2}}I_{II} - r_{\text{ლ1}}I_{IV} = -E; \\ (r_{\text{კლ2}} + r_{\text{ა1}} + r_{\text{კლ3}})I_{II} - r_{\text{კლ2}}I_I - r_{\text{ა1}}I_V - r_{\text{კლ3}}I_{III} = E; \\ (r_{\text{კლ3}} + r_{\text{კლ4}} + r_{\text{ლ2}})I_{III} - r_{\text{კლ3}}I_{II} - r_{\text{ლ2}}I_{VI} = -E; \\ (r_{\text{ლლ1}} + r_{\text{ლ2}} + r_{\text{ლლ2}} + r_{\text{ლ1}})I_{IV} - r_{\text{ლ1}}I_I - r_{\text{ლ2}}I_{VII} - r_{\text{ლლ2}}I_V = 0; \\ (r_{\text{ლლ2}} + r_{\text{ლლ3}} + r_{\text{ა2}} + r_{\text{ა1}})I_V - r_{\text{ლლ2}}I_{IV} - r_{\text{ლლ3}}I_{VI} - r_{\text{ა1}}I_{II} - r_{\text{ა2}}I_{VIII} = 0; \\ (r_{\text{ლ4}} + r_{\text{ლ3}} + r_{\text{ლლ3}} + r_{\text{ლლ4}})I_{VIII} - r_{\text{ლ6}}I_{III} - r_{\text{ლ4}}I_V - r_{\text{ლ4}}I_{IX} = 0; \\ (r_{\text{კლ5}} + r_{\text{კლ6}} + r_{\text{ლ2}})I_{VII} - r_{\text{ლ2}}I_{IV} - r_{\text{კლ6}}I_{VIII} = -E; \\ (r_{\text{კლ6}} + r_{\text{კლ7}} + r_{\text{ა2}})I_{VII} - r_{\text{კლ6}}I_{III} - r_{\text{ა2}}I_V - r_{\text{კლ7}}I_{IX} = E; \\ (r_{\text{კლ7}} + r_{\text{კლ8}} + r_{\text{ლ4}})I_{IX} - r_{\text{კლ7}}I_{VIII} - r_{\text{ლ4}}I_{VI} = E. \end{cases} \quad (3.7)$$

რომელსაც კონკრეტული შემთხვევისათვის ($r_{\text{კლ}}=1$ ომი; $r_{\text{ლ}}=0,5$ ომი; $r_{\text{ლლ}}=0,5$ ომი; $r_{\text{ა}}=2$ ომი; $E=15$ ვ) აქვს სახე:

$$\begin{cases} 2,5I_I - I_{II} - 0,5I_{IV} = -15; \\ 4I_{II} - I_I - 2I_V - I_{III} = 15; \\ 2,5I_{III} - I_{II} - 0,5I_{VI} = -15; \\ 2I_{IV} - 0,5I_I - 0,5I_{VII} - 0,5I_V = 0; \\ 5I_V - 0,5I_{IV} - 0,5I_{VI} - 2I_{II} - 2I_{VIII} = 0; \\ 2I_{VI} - 0,5I_{III} - 0,5I_V - 0,5I_{IX} = 0; \\ 2,5I_{VII} - 0,5I_{IV} - I_{VIII} = -15; \\ 4I_{VIII} - I_{VII} - 2I_V - I_{IX} = 15; \\ 2,5I_{IX} - I_{VIII} - 0,5I_{VI} = -15. \end{cases} \quad (3.8)$$

(3.8) სისტემის ამოსახსნელად გამოყენებული იქნა გაუსის მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს შემდეგში: მიახლოებითი ამონახსნის მაღალი სიზუსტით მისაღებად მთავარ კოეფიციენტად ირჩევენ კოეფიციენტებიდან მოდულით უდიდესს და ახორციელებენ გაუსის მეთოდით გამორიცხვას.

განვიხილოთ (3.8) სისტემის გაფართოებული მატრიცა:

$$M = \begin{pmatrix} 2,5 & -1 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -1 & 4 & -1 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & -1 & 2,5 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -0,5 & 0 & 0 & 2 & -0,5 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{-2} & \mathbf{0} & \mathbf{-0,5} & \mathbf{[5]} & \mathbf{-0,5} & \mathbf{0} & \mathbf{-2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & -0,5 & 0 & -0,5 & 2 & 0 & 0 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 2,5 & 1 & 0 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & -1 & 4 & -1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & -1 & 2,5 & -15 \end{pmatrix}; \quad (3.9)$$

5 – არის მოდულით უდიდესი ელემენტი – მთავარი ელემენტი. მამრავლებია:

$$m_1 = -\frac{0}{5} = 0; \quad m_2 = -\left(-\frac{2}{5}\right) = 0,4; \quad m_3 = -\frac{0}{5} = 0; \quad m_4 = -\left(-\frac{0,5}{5}\right) = 0,1; \quad m_5 = -\left(-\frac{0,5}{5}\right) = 0,1;$$

$$m_6 = -\frac{0}{5} = 0; \quad m_7 = -\left(-\frac{2}{5}\right) = 0,4; \quad m_8 = -\frac{0}{5} = 0.$$

5-ის შემცველ სტრიქონს მთავარი სტრიქონი ჰქვია. სრულდება შემდეგი ოპერაციები: მთავარი სტრიქონისა და m_i მამრავლის ნამრავლს ემატება თითოეული არამთავარი სტრიქონი. მიიღება ახალი მატრიცა, რომლის 5-ის შემცველი სვეტის ყველა ელემენტი, გარდა მთავარი ელემენტისა, ნულის ტოლია. ამ სვეტისა და მთავარი სტრიქონის ამოშლით მიიღება ახალი მატრიცა, რომელსაც ერთით ნაკლები სტრიქონი და სვეტი აქვს.

ახალ მატრიცაზე მეორდება იგივე ოპერაციები და მიიღება $M...M_8$ მატრიცათა მიმდევრობა. ამ მიმდევრობის მატრიცათა მთავარი სტრიქონების გაერთიანებით მიიღება სისტემა, რომლის ამოხსნით განისაზღვრება უცნობები:

$$M = \begin{pmatrix} 2,5 & -1 & 0 & -0,5 & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -1 & 3,2 & -1 & -0,2 & \mathbf{0} & -0,2 & 0 & -0,8 & 0 & 15 \\ 0 & -1 & 2,5 & 0 & \mathbf{0} & -0,5 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -0,5 & -0,2 & 0 & 1,95 & \mathbf{0} & -0,05 & -0,5 & 0,2 & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{-2} & \mathbf{0} & \mathbf{-0,5} & [5] & \mathbf{-0,5} & \mathbf{0} & \mathbf{-2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 0 & -0,2 & -0,5 & -0,05 & \mathbf{0} & 1,95 & 0 & -0,2 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & \mathbf{0} & 0 & 2,5 & 1 & 0 & -15 \\ 0 & -0,8 & 0 & -0,2 & \mathbf{0} & -0,2 & -1 & 3,2 & -1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} & -0,5 & 0 & -1 & 2,5 & -15 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$M = \begin{pmatrix} 2,5 & -1 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -1 & [3,2] & -1 & -0,2 & -0,2 & \mathbf{0} & -0,8 & \mathbf{0} & \mathbf{15} \\ 0 & -1 & 2,5 & 0 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ -0,5 & -0,2 & 0 & 1,95 & -0,05 & -0,5 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & -0,2 & -0,5 & -0,05 & 1,95 & 0 & -0,2 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 2,5 & 1 & 0 & -15 \\ 0 & -0,8 & 0 & -0,2 & -0,2 & -1 & 3,2 & -1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & -1 & 2,5 & -15 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$M = \begin{pmatrix} 2,19 & \mathbf{0} & -0,31 & -0,56 & -0,062 & 0 & -0,25 & 0 & -10,35 \\ -\mathbf{1} & \mathbf{3,2} & -\mathbf{1} & -\mathbf{0,2} & -\mathbf{0,2} & \mathbf{0} & -\mathbf{0,8} & \mathbf{0} & \mathbf{15} \\ -0,31 & \mathbf{0} & 2,19 & -0,062 & -0,56 & 0 & -0,25 & 0 & -10,35 \\ -1,13 & \mathbf{0} & -0,63 & 1,824 & -0,176 & -0,5 & -0,704 & 0 & 9,45 \\ -0,63 & \mathbf{0} & -1,13 & -0,176 & 1,824 & 0 & -0,704 & -0,5 & 9,45 \\ 0 & \mathbf{0} & 0 & -0,5 & 0 & 2,5 & 1 & 0 & -15 \\ -0,25 & \mathbf{0} & -0,25 & -0,25 & -0,25 & -1 & 3 & -1 & 18,75 \\ 0 & \mathbf{0} & 0 & 0 & -0,5 & 0 & -1 & 2,5 & -15 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 2,19 & -0,31 & -0,56 & -0,062 & 0 & -0,25 & 0 & -10,35 \\ -0,31 & 2,19 & -0,062 & -0,56 & 0 & -0,25 & 0 & -10,35 \\ -1,13 & -0,63 & 1,824 & -0,176 & -0,5 & -0,704 & 0 & 9,45 \\ -0,63 & -1,13 & -0,176 & 1,824 & 0 & -0,704 & -0,5 & 9,45 \\ 0 & 0 & -0,5 & 0 & 2,5 & 1 & 0 & -15 \\ -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{1} & [\mathbf{3}] & -\mathbf{1} & \mathbf{18,75} \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & -1 & 2,5 & -15 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$M'_2 = \begin{pmatrix} 2,17 & -0,33 & -0,56 & -0,082 & -0,08 & 0 & -0,08 & -8,85 \\ -0,33 & 2,17 & -0,082 & -0,58 & -0,08 & 0 & -0,08 & -8,85 \\ -1,19 & -0,69 & 1,764 & -0,236 & -0,75 & 0 & -0,23 & 13,76 \\ -0,69 & -1,19 & -0,236 & 1,764 & -0,23 & 0 & -0,73 & 13,76 \\ 0,08 & 0,08 & -0,42 & 0,08 & 2,83 & 0 & 0,33 & -21,19 \\ -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{0,25} & -\mathbf{1} & [\mathbf{3}] & -\mathbf{1} & \mathbf{18,75} \\ -0,08 & -0,08 & -0,08 & -0,58 & -0,33 & 0 & 2,17 & 8,81 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} 2,17 & -0,33 & -0,58 & -0,082 & -0,08 & -0,08 & -8,85 \\ -0,33 & 2,17 & -0,082 & -0,58 & -0,08 & -0,08 & -8,85 \\ -0,19 & -0,69 & 1,764 & -0,236 & -0,73 & -0,23 & 13,76 \\ -0,69 & -1,19 & -0,236 & 1,764 & -0,23 & -0,73 & 13,76 \\ \mathbf{0,08} & \mathbf{0,08} & -\mathbf{0,42} & \mathbf{0,08} & [\mathbf{2,83}] & \mathbf{0,33} & -\mathbf{21,19} \\ -0,08 & -0,08 & -0,08 & -0,58 & -0,33 & 2,17 & 8,81 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$M'_3 = \begin{pmatrix} 2,17 & -0,33 & -0,58 & -0,082 & \mathbf{0} & -0,07 & -9,49 \\ -0,33 & 2,17 & -0,082 & -0,58 & \mathbf{0} & -0,07 & -9,49 \\ -0,17 & -0,67 & 1,65 & -0,22 & \mathbf{0} & -0,14 & 8,25 \\ -0,68 & -1,18 & -0,27 & 1,77 & \mathbf{0} & -0,70 & 12,06 \\ \mathbf{0,08} & \mathbf{0,08} & -\mathbf{0,42} & \mathbf{0,08} & [\mathbf{2,83}] & \mathbf{0,33} & -\mathbf{21,19} \\ -0,07 & -0,07 & -0,13 & -0,57 & \mathbf{0} & 2,21 & 11,35 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$M_4 = \begin{pmatrix} 2,17 & -0,33 & -0,58 & -0,082 & -0,07 & -9,49 \\ -0,33 & 2,17 & -0,082 & -0,58 & -0,07 & -9,49 \\ -0,17 & -0,67 & 1,65 & -0,22 & -0,14 & 8,25 \\ -0,68 & -1,18 & -0,27 & 1,77 & -0,70 & 12,06 \\ -\mathbf{0,07} & -\mathbf{0,07} & -\mathbf{0,13} & -\mathbf{0,57} & [\mathbf{2,21}] & -\mathbf{11,35} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$M'_4 = \begin{pmatrix} 2,17 & -0,33 & -0,58 & -0,10 & 0 & -9,83 \\ -0,33 & 2,17 & -0,086 & -0,60 & 0 & -9,83 \\ -0,17 & -0,67 & 1,64 & -0,25 & 0 & -7,57 \\ -0,70 & -1,20 & -0,31 & 1,59 & 0 & 8,43 \\ -\mathbf{0,07} & -\mathbf{0,07} & -\mathbf{0,13} & -\mathbf{0,57} & [\mathbf{2,21}] & -\mathbf{11,35} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$M_5 = \begin{pmatrix} [\mathbf{2,17}] & -\mathbf{0,33} & -\mathbf{0,58} & -\mathbf{0,10} & -\mathbf{9,83} \\ -0,33 & 2,17 & -0,086 & -0,60 & -9,83 \\ -0,17 & -0,67 & 1,64 & -0,25 & -7,57 \\ -0,70 & -1,20 & -0,31 & 1,59 & 8,43 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$M'_5 = \begin{pmatrix} [\mathbf{2,17}] & -\mathbf{0,33} & -\mathbf{0,58} & -\mathbf{0,10} & -\mathbf{9,83} \\ 0 & 2,17 & -0,086 & -0,60 & -9,83 \\ 0 & -0,67 & 1,64 & -0,25 & -7,57 \\ 0 & -1,20 & -0,31 & 1,59 & 8,43 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

$$M_6 = \begin{pmatrix} [\mathbf{2,12}] & -\mathbf{0,17} & -\mathbf{0,62} & -\mathbf{11,30} \\ -0,70 & 1,59 & -0,26 & -8,36 \\ -1,31 & -0,50 & 1,56 & 5,25 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$M'_6 = \begin{pmatrix} [\mathbf{2,12}] & -\mathbf{0,17} & -\mathbf{0,62} & -\mathbf{11,30} \\ 0 & 1,53 & -0,46 & -12,09 \\ 0 & -0,61 & 1,18 & -1,76 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$M_7 = \begin{pmatrix} [\mathbf{1,53}] & -\mathbf{0,46} & -\mathbf{12,09} \\ -0,61 & 1,18 & -1,76 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$M'_7 = \begin{pmatrix} [\mathbf{1,53}] & -\mathbf{0,46} & -\mathbf{12,09} \\ 0 & 0,996 & -6,59 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$M_8 = (0,996 \quad -6,59) \quad (3.25)$$

1. $0,996I_{IV} = -6,42;$
2. $1,53I_{IV} - 0,46I_{VI} = -12,09;$
3. $2,12I_{III} - 0,17I_{IV} - 0,62I_{VI} = -11,30;$
4. $2,17I_I - 0,33I_{III} - 0,58I_{IV} - 0,10I_{VI} = -9,83;$
5. $-0,07I_I - 0,07I_{III} - 0,13I_{IV} - 0,57I_{VI} + 2,21I_{IX} = -11,35;$
6. $0,08I_I + 0,08I_{III} - 0,42I_{IV} - 0,08I_{VI} + 2,83I_{VII} + 0,33I_{IX} = -21,19;$
7. $-0,25I_I - 0,25I_{III} - 0,25I_{IV} - 0,25I_{VI} - I_{VII} + 3I_{VIII} - I_{IX} = 18,75;$
8. $-I_I + 3,2I_{II} - I_{III} - 0,2I_{IV} - 0,2I_{VI} - 0,8I_{VIII} = 15;$
9. $-2I_{II} - 0,5I_{IV} + 5I_V - 0,5I_{VI} - 2I_{VIII} = 0.$

1. $0,996I_{VI} = -6,42;$ $I_{VI} = -6,45;$
2. $1,53I_{IV} - 2,97 = -12,09;$ $I_{IV} = -0,79;$
3. $2,12I_{III} + 0,13 + 4 = -11,30;$ $I_{III} = -7,28;$
4. $2,17I_I + 2,40 + 0,46 + 0,65 = -9,83;$ $I_I = -6,15;$
5. $0,43 + 0,51 + 0,10 + 3,68 + 2,21I_{IX} = -11,35;$ $I_{IX} = -7,27;$
6. $-0,49 - 0,58 + 0,33 - 0,5 + 2,83I_{VII} - 2,40 = -21,19;$ $I_{VII} = -8,77;$
7. $1,54 + 1,82 + 0,20 + 3,11 + 8,77 + 3I_{VIII} + 7,27 = 18,75;$ $I_{VIII} = -1,32;$
8. $6,15 + 3,2I_{II} + 7,28 + 0,16 + 1,29 + 1,87 = 15;$ $I_{II} = -0,55;$
9. $1,1 + 0,40 + 5I_V + 3,23 - 2,64 = 0;$ $I_V = -0,42.$

კონტურული დენების დაზუსტებული მნიშვნელობებია:

$$I_I = 6,15; I_{II} = 0,55; I_{III} = 7,28; I_{IV} = 0,79; I_V = 0,42; I_{VI} = 6,45;$$

$$I_{VII} = 8,77; I_{VIII} = 1,32; I_{IX} = 7,27.$$

კონტურული დენების განსაზღვრის შემდეგ მათი საშუალებით ვპოულობთ შენაცვლების სქემის ცალკეულ ელემენტში გამავალ დენებს.

კონტურისათვის, რომელშიც გადის I_I კონტურული დენი, $r_{კლ}$ წინაღობაში გამავალი დენი $I_1 = I_I, I_9 = I_{IV}, I_{16} = I_{VII}.$

კონტურული დენების მიხედვით უშუალოდ განისაზღვრება:

$$I_1 = I_I = 6,15; \quad I_4 = 0,55;$$

$$I_{16} = I_{VII} = 8,77; \quad I_{13} = 0,19;$$

$$I_9 = I_{IV} = 0,72; \quad I_{19} = 1,32;$$

$$I_7 = I_{III} = 7,28;$$

$$I_{20} = I_{IX} = 7,27;$$

$$I_{14} = I_{VI} = 6,45,$$

ხოლო დანარჩენ ელემენტებში გამავალი დენები:

$$I_2 = I_I - I_{II} = 6,15 - 0,55 = 5,60;$$

$$I_3 = I_I - I_{IV} = 6,15 - 0,79 = 5,36;$$

$$I_5 = I_{III} - I_{II} = 7,28 - 0,55 = 6,73;$$

$$I_6 = I_V - I_{II} = 0,55 - 0,42 = 0,13;$$

$$I_8 = I_{III} - I_{VI} = 7,28 - 6,45 = 0,83;$$

$$I_{10} = I_V - I_{IV} = 0,79 - 0,42 = 0,37;$$

$$I_{12} = I_V - I_{VI} = 6,45 - 0,42 = 6,03;$$

$$I_{15} = I_{IX} - I_{VI} = 7,27 - 6,45 = 0,82;$$

$$I_{17} = I_{VII} - I_{VIII} = 8,77 - 1,32 = 7,45;$$

$$I_{18} = I_{IX} - I_{VIII} = 7,27 - 1,32 = 5,95.$$

ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგების მიხედვით ორმხრივი მიყვანით, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების პროცესის ანალიზს ეთმობა შემდეგი განყოფილება.

3.5. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას დენის დაშუნტვაზე შედუღების და მისი მახლობელი ზონის წინაღობების გავლენა

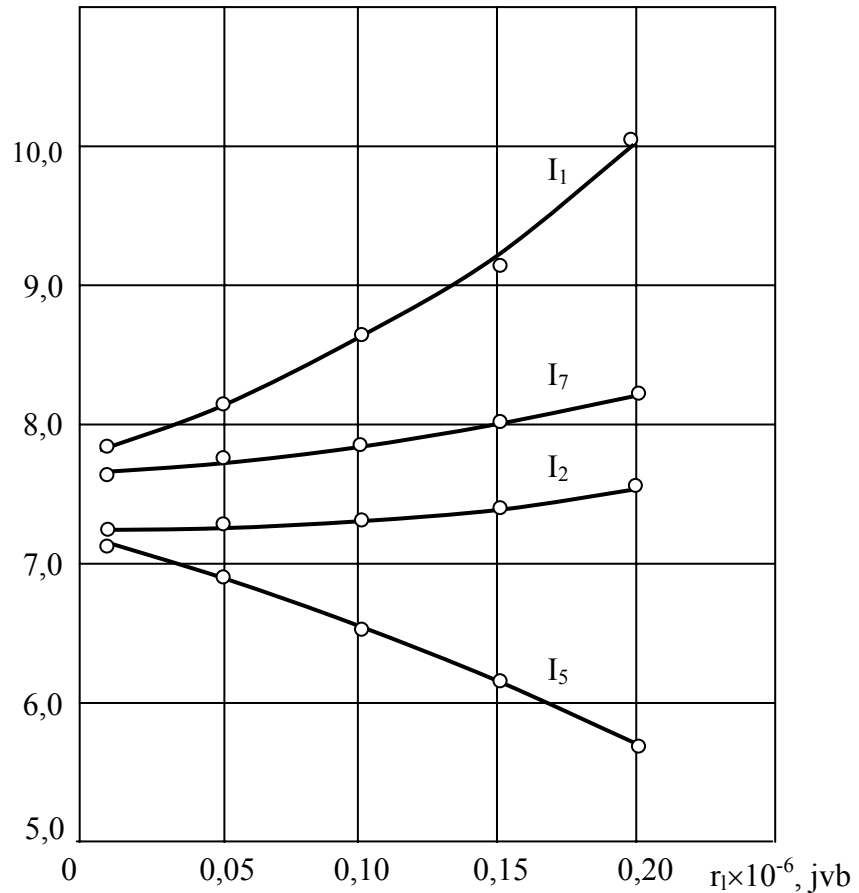
როგორც ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელიდან ჩანს (ნახ.3.5), პრაქტიკულად შესაძლებელია მხოლოდ შედუღების ზედა და ქვედა კონტურების დენმიმყვანებში გამავალი დენების გაზომვა. კერძოდ, ზედა ელექტროდებთან 1,2,5,7 დენმიმყვანებში გამავალი I_1, I_2, I_5, I_7 და ქვედა ელექტროდებთან (3,4,7,8) დენმიმყვანებში გამავალი $I_{16}, I_{17}, I_{18}, I_{20}$ დენების გაზომვა. იგივე დენები გადიან ელექტროდისა და შედუღების დეტალის კონტაქტში. კერძოდ, ზედა ელექტროდებსა (1,2,5,6) და ზედა დეტალის კონტაქტურ წინაღობებში ($r_{კდ1}, r_{კდ2}, r_{კდ5}, r_{კდ7}$) გადის I_1, I_2, I_5, I_7 დენები, ხოლო ქვედა ელექტროდებსა (3,4,7,8) და ქვედა დეტალის კონტაქტურ წინაღობებში ($r_{კდ5}, r_{კდ6}, r_{კდ7}, r_{კდ8}$) გადის $I_{16}, I_{17}, I_{18}, I_{20}$ დენები.

შედუღების პროცესთან დაკავშირებული დანარჩენი დენების მხოლოდ ანგარიშია შესაძლებელი. მათ შორის ზედა პირველ წყვილელექტროდებს (1,2) და

ზედა მეორე წყვილელექტროდს (5,6) შორის ზედა შესადული დეტალის წინაღობებში $r_{დ1}, r_{დ2}$ გამავალი დაშუნტვის I_3, I_8 დენები იანგარიშება შესაბამისად $I_I, I_{IV}, I_{III}, I_{VI}$ კონტურული დენების მიხედვით. ხოლო ქვედა პირველ წყვილელექტროდს (5,6) და ქვედა მეორე წყვილელექტროდს (7,8) შორის ქვედა დეტალის წინაღობებს $r_{დ2}, r_{დ4}$ შორის გაავალი დაშუნტვის დენი I_{11}, I_{15} იანგარიშება შესაბამისად I_{VII}, I_{IV}, I_{IX} კონტურული დენების მიხედვით. შედულების დენებია მხოლოდ $I_9, I_{10}, I_{12}, I_{14}$ დენები.

საანგარიშო დენებია, აგრეთვე ზედა წყვილელექტროდებს შორის ზედა დეტალის $r_{შ1}$ წინაღობაში გამავალი დაშუნტვის I_6 დენი. იგი იანგარიშება I_{II} და I_V კონტურული დენების მიხედვით. საანგარიშოა აგრეთვე ქვედა წყვილელექტროდებს შორის ქვედა შესადული დეტალის $r_{შ2}$ წინაღობაში გამავალი დაშუნტვის დენი I_{13} . ამ უკანასკნელის გამოთვლა ხდება I_V და I_{VIII} კონტურული დენების მიხედვით.

ზედა წყვილელექტროდებთან დენმიმყვანებში გამავალი გასაზომი დენების I_1, I_2, I_5, I_7 ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მათი ცვლილების ხასიათი არაა ერთნაირი (ნახ.3.6). ზედა წყვილელექტროდებს შორის ზედა დეტალის წინაღობების $r_{დ1}, r_{დ3}$, ასევე ქვედა წყვილელექტროდებს შორის დეტალის წინაღობების $r_{დ2}, r_{დ4}$ შედულების პირობებში შესაძლო მნიშვნელობების ზღვრებში ცვლილებისას, წინააღმდეგობების გაზრდით დენმიმყვანში გამავალი I_7 მკვეთრად იზრდება (ნახ.3.6.), მაშინ, როცა I_2, I_7 დენები თითქმის უცვლელი რჩება, ხოლო I_5 დენი კი მცირდება.

I_1, I_2, I_5, I_7, f 

ნახ.3.6. ზედა კონტურში გასაზომი დენების დამოკიდებულება დაშუნტვის პირობებზე წყვილელექტროდებს შორის ბიჯზე.

ანალოგიური სურათი შეიმჩნევა ქვედა წყვილელექტროდებთან დენმიმყვანებში გამავალი დენებისათვისაც (ცხრ.3.1) $I_{16}, I_{17}, I_{18}, I_{20}$ აღნიშნული დენების გაზრდა, შესაბამისი წინააღობების გაზრდით, მიმანიშნებელია იმისა, რომ დენის დაშუნტვის პირობები უმჯობესდება. ხოლო დენის უცვლელობა მიანიშნებს იმ ფაქტზე, რომ წინააღობის გაზრდა არ მოქმედებს ამ დენის დაშუნტვის პირობებზე, ხოლო დენის შემცირება ნიშნავს იმას, რომ წინააღობის გაზრდით დენის დაშუნტვის პირობები უარესდება.

ზედა და ქვედა კონტურებში გამავალ გასაზომ დენებზე

$r_{\text{დ}1}, r_{\text{დ}2}, r_{\text{დ}3}, r_{\text{დ}4}$ წინაღობების გავლენა

N	წინაღობების მნიშვნელობები x1000 მკომი				გასაანგარიშებელი სიდიდეები,ა							
	$r_{\text{დ}1}$	$r_{\text{დ}2}$	$r_{\text{დ}3}$	$r_{\text{დ}4}$	I_1	I_2	I_5	I_7	I_{16}	I_{17}	I_{18}	I_{20}
1	0,01	0,01	0,01	0,01	7,74	7,40	7,26	7,67	7,44	7,40	6,51	6,55
2	0,02	0,02	0,02	0,02	7,81	3,35	7,21	7,67	7,39	7,33	6,38	6,44
3	0,03	0,03	0,03	0,03	7,90	7,36	7,15	7,69	7,38	7,36	6,15	6,47
4	0,04	0,04	0,04	0,04	7,99	7,36	7,08	7,71	7,38	7,35	6,49	6,51
5	0,05	0,05	0,05	0,05	8,08	7,36	7,01	7,73	7,37	7,31	6,48	6,54
6	0,06	0,06	0,06	0,06	8,19	7,38	6,94	7,75	7,37	7,26	6,46	6,57
7	0,07	0,07	0,07	0,07	8,29	7,38	6,87	7,78	7,36	7,20	6,44	6,60
8	0,08	0,08	0,08	0,08	8,40	7,39	6,79	7,80	7,37	7,16	6,43	6,64
9	0,09	0,09	0,09	0,09	8,51	7,39	6,71	7,83	7,37	6,11	6,41	6,67
10	0,10	0,10	0,10	0,10	8,61	7,41	6,64	7,86	7,37	7,06	6,40	6,71
11	0,11	0,11	0,11	0,11	8,75	7,42	6,56	7,89	7,38	7,01	6,37	6,74
12	0,12	0,12	0,12	0,12	8,88	7,43	6,48	7,93	7,39	6,96	6,35	6,78
13	0,13	0,13	0,13	0,13	9,01	7,44	6,40	7,77	7,40	6,91	6,33	6,82
14	0,14	0,14	0,14	0,14	9,15	7,46	6,32	8,01	7,42	6,87	6,31	6,86
15	0,15	0,15	0,15	0,15	9,29	7,47	6,23	8,05	7,43	6,82	6,29	6,90
16	0,16	0,16	0,16	0,16	9,44	7,49	6,15	8,10	7,45	6,77	6,26	7,94
17	0,17	0,17	0,17	0,17	9,60	7,51	6,05	8,14	7,47	6,73	6,25	6,99
18	0,18	0,18	0,18	0,18	9,76	7,53	6,96	8,19	7,50	6,68	6,21	7,03
19	0,19	0,19	0,19	0,19	9,93	7,55	5,87	8,25	7,52	6,63	6,18	7,07
20	0,20	0,20	0,20	0,20	10,10	7,57	5,77	8,30	7,55	6,58	6,15	7,12

როგორც ნახ.3.6-დან და ცხრილიდან 3.1 ჩანს, წყვილ ელექტროდებს შორის მდებარე დეტალის წინააღმდეგობის $r_{\text{დ}1}, r_{\text{დ}2}, r_{\text{დ}3}, r_{\text{დ}4}$ ცვლილებისადმი მეტად მგრძობიარეა I_1, I_5 დენები. I_2, I_7 დენები პრაქტიკულად არ იცვლება. I_2, I_7 დენების უცვლელობა $r_{\text{დ}1}, r_{\text{დ}2}, r_{\text{დ}3}, r_{\text{დ}4}$ წინაღობების ცვლილებისას არ ნიშნავს, რომ

I_2, I_7 დენების დაშუნტვის პირობები გაუარესდა. უნდა ვიფიქროთ, რომ ეს მოქმედება გაბათილებულია დაშუნტვის დენების ჯამური ზეგავლენით. I_1, I_5, I_2, I_7 დენების დაშუნტვას ადგილი აქვს როგორც $r_{ღ1}, r_{ღ2}, r_{ღ3}, r_{ღ4}$ წინაღობებში, ასევე მოსალოდნელია მათი დაშუნტვა $r_{ა1}, r_{ა2}$ წინაღობებში.

ცხრილი 3.2

წყვილელექტროდებს შორის დეტალის წინააღობის გავლენა
ზედა კონტურში გამავალ დენებზე ($E = 20$ d)

N	ცვლადი სიდიდეები				გასაანგარიშებელი სიდიდეები,ა			
	$r_{ღ1} \times 10$ ომი	$r_{ღ2} \times 10$ ომი	$r_{ღ3} \times 10$ ომი	$r_{ღ4} \times 10$ ომი	I_1	I_2	I_5	I_7
1	0,01	0,01	0,01	0,01	10,30	9,80	9,71	10,21
2	0,02	0,02	0,02	0,02	10,41	9,80	9,62	10,23
3	0,03	0,03	0,03	0,03	10,53	9,81	9,80	10,25
4	0,04	0,04	0,04	0,04	10,65	9,81	9,44	10,28
5	0,05	0,05	0,05	0,05	10,78	9,82	9,35	10,31
6	0,06	0,06	0,06	0,06	10,92	9,83	9,25	10,34
7	0,07	0,07	0,07	0,07	11,05	9,83	9,15	10,37
8	0,08	0,08	0,08	0,08	11,20	9,85	9,05	10,49
9	0,09	0,09	0,09	0,09	11,35	9,86	8,95	10,44
10	0,10	0,10	0,10	0,10	11,51	9,88	8,85	10,48
11	0,11	0,11	0,11	0,11	11,67	9,89	8,80	10,53
12	0,12	0,12	0,12	0,12	11,84	9,91	8,65	10,58
13	0,13	0,13	0,13	0,13	12,02	9,93	8,54	10,63
14	0,14	0,14	0,14	0,14	12,20	9,94	8,42	10,68
15	0,15	0,15	0,15	0,15	12,39	9,96	8,31	10,74
16	0,16	0,16	0,16	0,16	12,59	9,99	8,20	10,80
17	0,17	0,17	0,17	0,17	12,80	10,01	8,07	10,86
18	0,18	0,18	0,18	0,18	13,01	10,03	7,95	10,86
19	0,19	0,19	0,19	0,19	13,24	10,07	7,83	11,00
20	0,20	0,20	0,20	0,20	13,47	10,09	7,69	11,07

წყვილელექტროდებს შორის დეტალის წინაღობის გავლენა
ზედა კონტურში გასაზომი დენების სიდიდეებზე ($E = 10$ d)

N	ცვლადი სიდიდეები				გასაანგარიშებელი სიდიდეები, ^ა			
	$r_{\text{ღ1}} \times 10$ ომი	$r_{\text{ღ2}} \times 10$ ომი	$r_{\text{ღ5}} \times 10$ ომი	$r_{\text{ღ7}} \times 10$ ომი	I_1	I_2	I_5	I_7
1	0,01	0,01	0,01	0,01	5,15	4,90	4,89	5,10
2	0,02	0,02	0,02	0,02	5,20	4,90	4,81	5,11
3	0,03	0,03	0,03	0,03	5,26	4,90	4,76	5,12
4	0,04	0,04	0,04	0,04	5,33	4,90	4,73	5,16
5	0,05	0,05	0,05	0,05	5,39	4,91	4,87	5,15
6	0,06	0,06	0,06	0,06	5,46	4,92	4,63	5,17
7	0,07	0,07	0,07	0,07	5,52	4,91	4,43	5,18
8	0,08	0,08	0,08	0,08	5,60	4,93	4,53	5,20
9	0,09	0,09	0,09	0,09	5,67	4,93	4,48	5,22
10	0,10	0,10	0,10	0,10	5,75	4,94	4,43	5,24
11	0,11	0,11	0,11	0,11	5,83	4,94	4,37	5,26
12	0,12	0,12	0,12	0,12	5,92	4,96	4,33	5,29
13	0,13	0,13	0,13	0,13	6,01	4,97	3,27	5,31
14	0,14	0,14	0,14	0,14	6,10	4,97	4,11	5,34
15	0,15	0,15	0,15	0,15	6,19	4,98	4,16	5,37
16	0,16	0,16	0,16	0,16	6,29	4,99	4,10	5,40
17	0,17	0,17	0,17	0,17	6,40	5,01	3,04	5,43
18	0,18	0,18	0,18	0,18	6,50	5,01	3,97	5,46
19	0,19	0,19	0,19	0,19	6,62	5,04	3,92	5,50
20	0,20	0,20	0,20	0,20	6,73	5,04	3,94	5,53

კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების რეჟიმის, კერძოდ შედუღების ზონაში თბური პროცესების მართვის მიზნით, შედუღების დენის რეგულირებას ახდენენ შედუღების მანქანის უქმი სვლის ძაბვის საფეხუროვანი რეგულირებით. ამიტომ ინტერესმოკლებული არ იყო იმის გამოკვლევა, თუ როგორ მოქმედებს უქმი სვლის ძაბვის ცვლა I_1, I_2, I_5, I_7 დენების ცვლილების ხასიათზე. ამ მიზნით ორმხრივი

მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების დამუშავებულ მოდელში I_1, I_2, I_5, I_7 დენები გამოთვლილი იქნა მოდელში ჩართული ენერჯის წყაროების სხვადასხვა ე.მ.პ-სათვის (ნახ.3.7, 3.8 და ცხრ.3.2, ცხრ.3.3) ამ უკანასკნელი ნახაზიდან და ცხრილებიდან 3.2, 3.3 ჩანს, რომ ე.მ.პ-ების სხვადასხვა მნიშვნელობებზე I_1, I_2, I_5, I_7 დენები იცვლებიან ერთიდაიმავე კანონით.

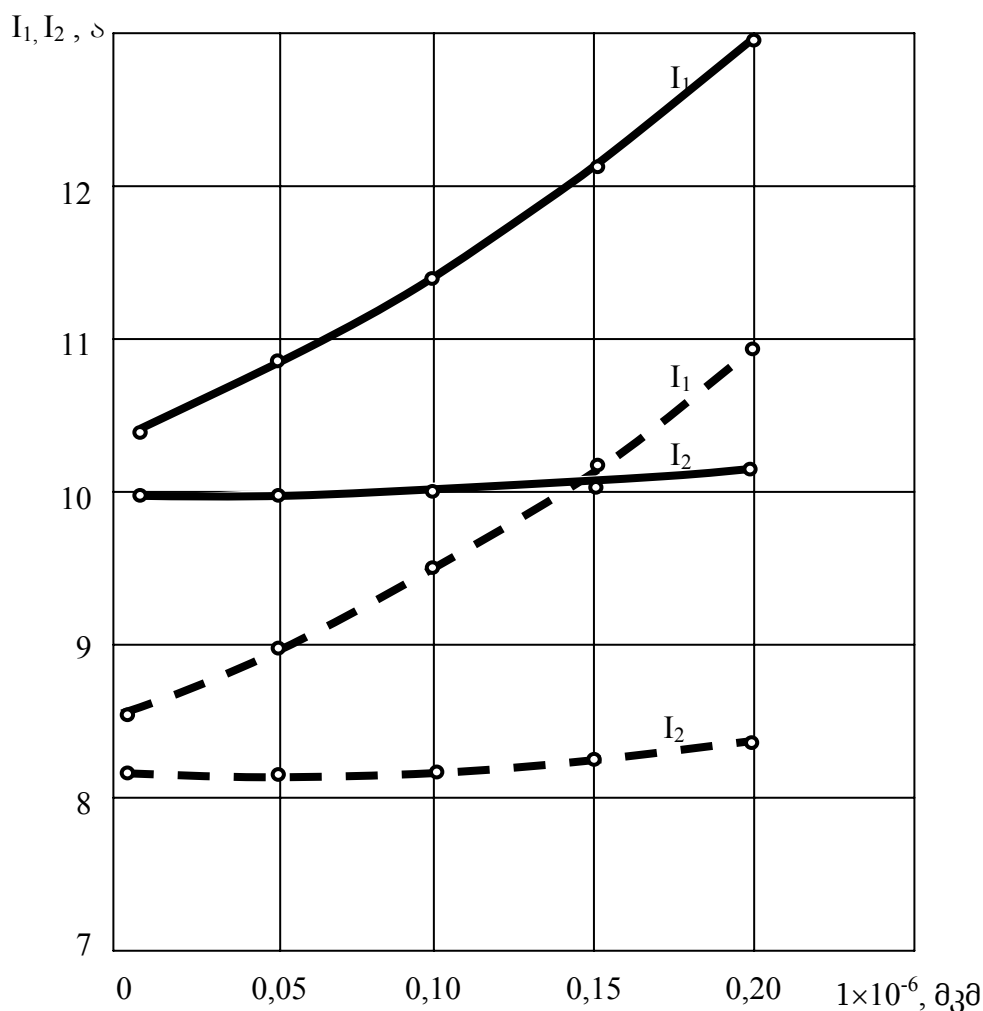
ცხრილი 3.4

შესადული დეტალების კონტაქტებში გამავალი დენის ცვლილება
კონტაქტის წინააღმდეგ დამოკიდებულებით

N	წინააღმდეგების მნიშვნელობები, x1000 მკომი				გასაანგარიშებელი სიდიდეები, ა			
	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	I_9	I_{10}	I_{12}	I_{14}
1	0,01	0,01	0,01	0,01	3,27	1,17	1,59	3,69
2	0,02	0,02	0,02	0,02	3,12	1,14	1,62	3,60
3	0,03	0,03	0,03	0,03	2,97	1,10	1,65	3,52
4	0,04	0,04	0,04	0,04	2,82	1,06	1,69	3,45
5	0,05	0,05	0,05	0,05	2,67	1,01	1,71	3,37
6	0,06	0,06	0,06	0,06	2,53	0,98	1,68	3,29
7	0,07	0,07	0,07	0,07	2,38	0,93	1,77	3,22
8	0,08	0,08	0,08	0,08	2,23	0,87	1,78	3,14
9	0,09	0,09	0,09	0,09	2,08	0,81	1,80	3,07
10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,93	0,76	1,83	3,00
11	0,11	0,11	0,11	0,11	1,78	0,69	1,84	2,93
12	0,12	0,12	0,12	0,12	1,63	0,63	1,85	2,85
13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,48	0,57	1,87	2,78
14	0,14	0,14	0,14	0,14	1,32	0,49	1,88	2,71
15	0,15	0,15	0,15	0,15	1,17	0,42	1,89	2,64
16	0,16	0,16	0,16	0,16	1,00	0,37	1,90	2,57
17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,84	0,25	1,91	2,50
18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,67	0,15	1,91	2,43
19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,50	0,06	1,92	2,36
20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,34	0,06	1,54	1,94

მაშასადამე, დამუშავებული მოდელის საშუალებით მიღებული შედეგები სამართლიანია სხვადასხვა უქმი სვლის ძაბვის მქონე რეჟიმზე შედულებისას.

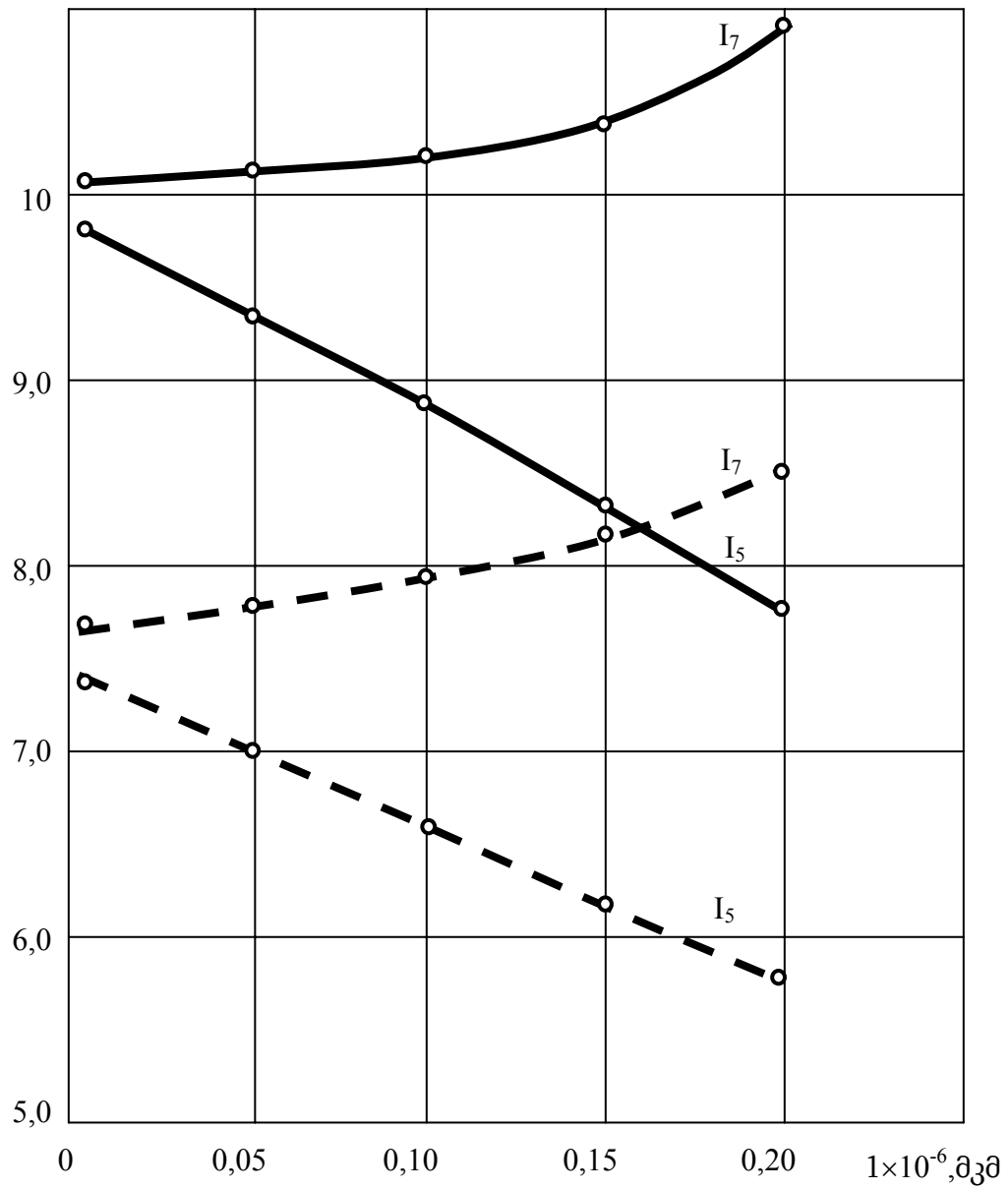
როგორც ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების ფიზიკური მოდელის ფორმის განსაზღვრისას იყო აღნიშნული, $I_9, I_{10}, I_{12}, I_{14}$ დენები წარმოადგენენ შესადული დეტალების 9,10 შორის შედულების ადგილას კონტაქტში, რომელიც გამოსახულია $r_{დღ1}, r_{დღ2}, r_{დღ3}, r_{დღ4}$ წინააღობების სახით, გამავალი დენები. ე.ი. უშუალოდ შედულების ზონაში გამავალ დენებს, რომლებიც წარმოადგენენ შედულების დენს. მათი ურთიერთდამოკიდებულება ჩანს ნახ.3.9-ზე და ცხრილში 3.4 წარმოდგენილი მონაცემებიდან.



ნახ.3.7 დენების I_1, I_2 ცვლილება r_c წინააღობის გაზრდით:

———— I_1, I_2 , როცა $E = 20$ ვ;

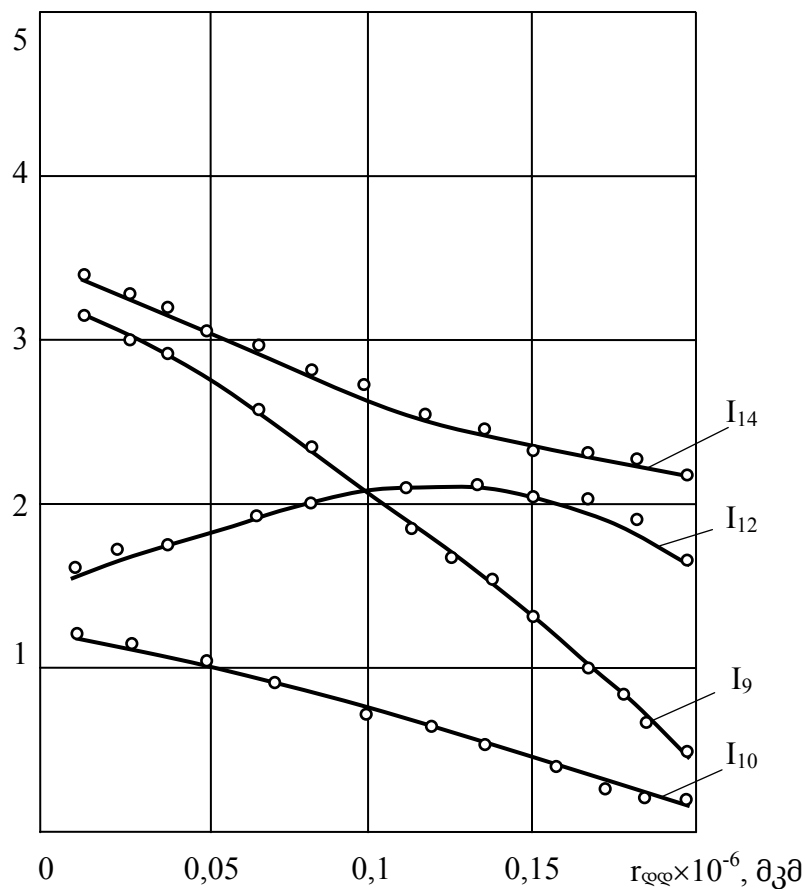
----- I_1, I_2 , როცა $E = 10$ ვ.

I_5, I_7, δ 

ნახ.3.8. დენების I_5, I_7 ცვლილება r_0 წინააღობის გაზრდით:

———— I_5, I_7 , როცა $E = 20$ ვ.

----- I_5, I_7 , როცა $E = 10$ ვ.

$I_9, I_{10}, I_{12}, I_{14}, \delta$


ნახ.3.9. შედუღების კონტურში გამავალი დენების ცვლილების ხასიათი.

დეტალებს შორის კონტაქტური წინააღობების გაზრდით მცირდება I_9, I_{10}, I_{14} შედუღების დენები. შედარებით უმნიშვნელოდ იცვლება I_{12} დენი, რომელიც გადის $r_{\text{დღ}3}$ კონტაქტურ წინააღობაში, რაც კანონზომიერი მოვლენაა, თუ არ გავითვალისწინებთ, რომ $r_{\text{დღ}3}$ -ის შემცირებით პრაქტიკულად უცვლელი რჩება I_{12} დენი. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ეს უკანასკნელი განპირობებულია შემდეგი გარემოებით – დენის გადანაწილება ხდება $r_{\text{დღ}3}$ კონტაქტური წინააღობიდან $r_{\text{დღ}1}$ -ში, რაზეც ირიბად მიუთითებს ის, რომ I_9 დენი უფრო ინტენსიურად მცირდება, ვიდრე დანარჩენი I_{10} და I_{14} დენები.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მისი ფიზიკური მოდელის მიხედვით ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ:

1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას შედუღების ელექტროდებთან დენმიმყვანებში გამავალი დენები სიდიდით განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. მათი სიდიდე დამოკიდებულია ელექტროდებს შორის მოთავსებული შესადული დეტალების უბნის სიგრძეზე (მოდელში $r_{დ1}, r_{დ2}, r_{დ3}, r_{დ4}$ წინააღობების სიდიდეზე), ანუ შედუღების ტექნოლოგიაში მიღებული ტერმინით წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის სიდიდეზე. ბიჯის შემცირების შემთხვევაში იზრდება დაშუნტვის დენის შემადგენელი. დენის დაშუნტვა ხდება ზედა ან ქვედა კონტურში (ნახ.1.3), დაშუნტვის დენის გავლით ზედა და ქვედა დეტალში.
2. შედუღების დენის დაშუნტვის ხასიათი არაა დამოკიდებული კონტაქტური შედუღების რეჟიმზე, კერძოდ კონტაქტური შედუღების მანქანის უქმი სვლის ძაბვაზე. შედუღების დენი შედუღების ადგილის სიმტკიცის შეფასების ერთ-ერთი მთავარი პარამეტრია, ამიტომ შედუღების ხარისხის პროგნოზირებისას აუცილებელია თითოეულ ელექტროდთან დენმიმყვანში დენის სიდიდის კონტროლი (გაზომვა).
3. დენმიმყვანებში გამავალი დენის სიდიდე, ელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის უბნის წინააღობის ($r_{ღ}$) ცვლილებისას $0,01 \cdot 10^2$ მკომიდან $0,2 \cdot 10^2$ მკომამდე იცვლება 30 %-ით და მეტით, რაც იმას ნიშნავს, რომ დაშუნტვის დენის სიდიდე ამ დროს იცვლება 30 %-ით. ამ უკანასკნელის გამო, დენის მიხედვით შედუღების სიმტკიცის პროგნოზირებისას, თითოეულ დენმიმყვანში დენის სიდიდის გაზომვის აუცილებლობის გარდა, საჭირო ხდება შემცირებული იქნას დაშუნტვის დენის სიდიდე, რადგანაც იგი მნიშვნელოვნად მოქმედებს შედუღების ადგილის სიმტკიცეზე, კერძოდ ამცირებს მას.

წყვილელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალის უბნის წინააღობის რეგულირება ნიშნავს წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის ცვლას, ამიტომ დაშუნტვის დენის შეზღუდვა შესაძლებელია წყვილ ელექტროდებს შორის მოთავსებული

დეტალის წინაღობების $r_{დ1}, r_{დ2}, r_{დ3}, r_{დ4}$ შემცირებით, ან რაც იგივეა შედუღების ელექტროდებს შორის მანძილის შემცირებით. ე.ი. შესადუღ წერტილებს შორის ბიჯის შემცირებით.

დაშუნტვის დენის 10 %-მდე შემცირებისათვის საკმარისია $r_{დ1}, r_{დ2}, r_{დ3}, r_{დ4}$ წინაღობები გაზრდილი იქნას 100 მკომამდე (ნახ. 3.6).

შედუღების დენის დაშუნტვის 10 %-მდე შეზღუდვა წერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას უნდა ჩაითვალოს ოპტიმალურ მნიშვნელობად [36].

ზემოთ აღნიშნულის გამო, დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული ფურცლოვანი მასალის ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას დაშუნტვის დენის 10 %-მდე შეზღუდვისათვის აუცილებელია წყვილელექტროდებს შორის მანძილი შეესაბამებოდეს

$$t_{\delta} = \frac{100}{\rho_0} \approx 8 \text{ სმ} = 80 \text{ მმ}, \quad (3.28)$$

სადაც ρ_0 – შესადუღი დეტალის ხვედრითი წინაღობაა.

დაბალნახშირბადიანი ფოლადისათვის $\rho_0 = 13$ მკომი.სმ.

აღსანიშნავია, რომ 2+2 მმ სისქის დეტალების ორმხრივი წერტილოვანი შედუღებისას მინიმალური დასაშვები ბიჯი უახლოეს წერტილებს შორის $t_{\delta} = 20$ მმ. ე.ი. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას მინიმალური დასაშვები ბიჯი 4-ჯერ მეტია, ვიდრე ჩვეულებრივი წერტილოვანი შედუღების შემთხვევაში.

ამრიგად, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ფიზიკური მოდელის საშუალებით დენის დაშუნტვის პირობების ანალიზის საფუძველზე, შედუღების დენის დაშუნტვის პირობიდან გამომდინარე, რეკომენდირებულია გამოსახულება (3.28) წყვილელექტროდებს შორის მინიმალური ბიჯის განსაზღვრისათვის.

3.6. დაწყვილებულ ელექტროდებს შორის ბიჯის გავლენა დაშუნტვის დენის მნიშვნელობაზე

ელექტროდებს შორის მოთავსებული დეტალების $r_{დ1}, r_{დ2}, r_{დ3}, r_{დ4}$ წინააღობების დაშუნტვის დენზე გავლენის გამოკვლევისას წყვილელექტროდებს შორის $r_{შ1}, r_{შ2}$ წინააღობები რჩებოდა უცვლელი სიდიდის, რაც ნიშნავდა წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის უცვლელობას. როგორც ცნობილია, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღებისას წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი განსაზღვრავს შედუღების დენის დაშუნტვის პირობებს. ამ უკანასკნელის გამოკვლევის მიზნით, წყვილელექტროდებს შორის მდებარე, დეტალის წინააღობების $r_{შ1}, r_{შ2}$ ცვლილებისას (ცხრ.3.5) გამოკვლეული იქნა მისი გავლენა I_1, I_2, I_5, I_7 დენების სიდიდეზე. ამ დროს ელექტროდებს შორის დეტალის წინააღობები რჩებოდა უცვლელი (ცხრ.3.5). ამ წინააღობებისათვის ვთვლიდით I_1, I_2, I_5, I_7 დენების მნიშვნელობებს.

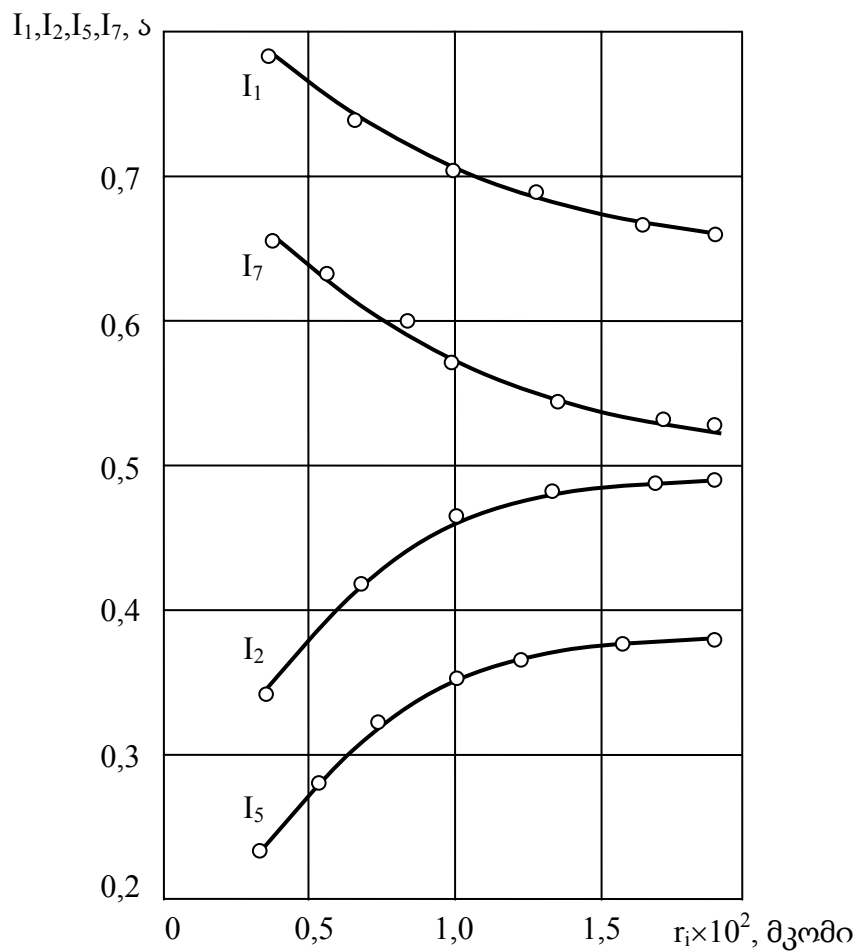
ცხრილი 3.5

წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის გავლენა დენმიმყვანებში
გამავალი დენის სიდიდეზე ($E = 1$ ვ)

N	ცვლადი სიდიდეები						გასაანგარიშებელი სიდიდეები, ა			
	$r_{შ1} \times 10^2$ მკომი	$r_{შ2} \times 10^2$ მკომი	$r_{დ1} \times 10^3$ მკომი	$r_{დ2} \times 10^3$ მკომი	$r_{დ3} \times 10^3$ მკომი	$r_{დ4} \times 10^3$ მკომი	I_1	I_2	I_5	I_7
1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,56	0,45	0,44	0,55
2	0,2	0,2					0,54	0,45	0,45	0,54
3	0,3	0,3					0,54	0,47	0,46	0,53
4	0,4	0,4					0,53	0,47	0,47	0,53
5	0,5	0,5					0,53	0,47	0,40	0,52
6	0,6	0,6					0,53	0,47	0,40	0,52
7	0,7	0,7					0,52	0,47	0,47	0,52
8	0,8	0,8					0,52	0,48	0,48	0,52
9	0,9	0,9					0,52	0,48	0,48	0,52
10	1,0	1,0					0,52	0,48	0,47	0,51

11	1,2	1,2					0,52	0,49	0,48	0,51
12	1,4	1,4					0,51	0,48	0,48	0,51
13	1,6	1,6					0,51	0,49	0,49	0,51
14	1,8	1,8					0,52	0,48	0,48	0,48

განგარიშებით მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ წყვილელექტროდებს შორის დეტალის $r_{\text{მ1}}, r_{\text{მ2}}$ წინააღობების ცვლილება მნიშვნელოვნად მოქმედებს ელექტროდთან დენმიმცვანებში გამავალ I_1, I_2, I_5, I_7 დენების სიდიდეებზე. ეს იმას ნიშნავს, რომ წყვილელექტროდებს შორის დეტალის წინააღობების სიდიდე არსებითად მოქმედებს შედეგების დენის დაშუნტვაზე წყვილელექტროდებს შორის დეტალის გავლით.



ნახ.3.10. წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის გავლენა დენმიმცვანებში გამავალი დენის სიდიდეზე.

წყვილელექტროდებს შორის წინაღობების $r_{\text{მ1}}, r_{\text{მ2}}$ მიახლოებით 75 მკომამდე გაზრდის შემდეგ I_1, I_2, I_5, I_7 დენებზე მათი მოქმედება უმნიშვნელოა. წყვილელექტროდებს შორის დეტალის წინაღობის $r_{\text{მ1}}, r_{\text{მ2}}$ აღნიშნული სიდიდის წინაპირობებს დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული ფურცლების შედუღებისას შეესაბამება წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი:

$$t_{\text{ბღ}} = \frac{75}{\rho_0} \approx 60 \text{ მმ}. \quad (3.29)$$

(3.29) გამოსახულებით, ანალოგიურად, შეიძლება განისაზღვროს წყვილელექტროდებს შორის ბიჯი სხვადასხვა მასალისაგან დამზადებული ლითონკონსტრუქციების ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას.

წყვილელექტროდებს შორის წარმოდგენილი მეთოდით ბიჯის განსაზღვრისას დაშუნტვის დენის სიდიდე არ აღემატება შედუღების დენის 10 %-ს.

ამრიგად, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების გამოკვლევის საფუძველზე დამუშავებულია წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის განსაზღვრის მეთოდი.

3.7. დასკვნები

1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ელექტრული სქემის გამოკვლევის და მასში შედუღების დენის შესაძლო დაშუნტვის ანალიზის საფუძველზე შემუშავებული იქნა ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ფიზიკური მოდელის ფორმა. იგი შედგება ერთმანეთის მიმდევრობით და პარალელურად ჩართული $r_{\text{დ}}, r_{\text{კდ}}, r_{\text{ლდ}}, r_{\text{წ}}$ წინაღობებისაგან და ექვსი ელექტრული ენერგიის კვების წყაროს ე.მ.ძ. ელემენტისაგან.
2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების გამოკვლევის საფუძველზე დადგენილია დენის დაშუნტვის შესწავლისათვის მიღებული ფიზიკური მოდელის ელემენტების მნიშვნელობები და მოდელის საშუალებით დენის დაშუნტვის შესწავლის მიზნით ამ ელემენტების ცვლილების დიაპაზონი.
3. განსაზღვრულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების მოდელის ცალკეულ ელემენტებში გამავალი დენები და გამოკვლეულია მათ სიდიდეებზე ელექტროდებს შორის და წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის და დეტალებს შორის კონტაქტის წინაღობის გავლენა.
4. გამოვლენილია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას დენის დაშუნტვის ერთმანეთისაგან მკვეთრად განსხვავებული სურათი მარჯვენა და მარცხენა შედუღების კონტურებს შორის. ელექტროდებს შორის და წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის გაზრდით მარჯვენა შედუღების კონტურში დენის დაშუნტვის ინტენსიობა იზრდება (როგორც ეს მოსალოდნელი იყო), ხოლო მარცხენა შედუღების კონტურში კი ეს ინტენსიობა სუსტდება.

4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების დენის საანგარიშო გამოსახულებების მიღება და სიმტკიცის შეფასების მრავალფაქტორიანი მოდელის დამუშავება

4.1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების დენის საანგარიშო გამოსახულებების დამუშავება

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებებისას შედუღების დენი წარმოადგენს შესადული დეტალების კონტაქტის ადგილის წინააღმდეგობაში $r_{დდ1}, r_{დდ2}, r_{დდ3}, r_{დდ4}$ გამავალი დენები.

ელექტროდებს შორის დეტალების $r_{დ1}, r_{დ2}, r_{დ3}, r_{დ4}$ წინააღმდეგობების, ასევე წყვილელექტროდებს შორის დეტალის $r_{შ1}, r_{შ2}$ წინააღმდეგობების უსასრულოდ დიდი მნიშვნელობებისათვის ($r_{დდ1}, r_{დდ2}, r_{დდ3}, r_{დდ4}$ კონტაქტის წინააღმდეგობებთან შედარებით), შედუღების ზედა და ქვედა კონტურზე მოდებული ერთნაირი ძაბვის შემთხვევაში, თითოეულ დენმიმყვანში გამავალი დენი იქნება ერთიდაიგივე სიდიდის. როცა წინააღმდეგობების სასრული მნიშვნელობები ტოლია ან მცირედ განსხვავდება $r_{დდ1}, r_{დდ2}, r_{დდ3}, r_{დდ4}$ წინააღმდეგობებისაგან, მაშინ ადგილი აქვს შედუღების დენის გადანაწილებას აღნიშნული წინააღმდეგობების გვერდის ავლით და ამბობენ, რომ ადგილი აქვს მის დაშუნტვას. ამ შემთხვევაში შედუღების კონტურების დენმიმყვანებში გამავალი დენები განსხვავებულია შესადუღებელ დეტალებს შორის კონტაქტის $r_{დდ1}, r_{დდ2}, r_{დდ3}, r_{დდ4}$ წინააღმდეგობებში გამავალი დენებისაგან.

ჩატარებული გამოკვლევების საფუძველზე და ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების მოდელის საშუალებით, შესწავლილი იქნა დენის დაშუნტვის პირობები. კერძოდ, გამოვლენილი იქნა, რომ დენმიმყვანებში გამავალი დენის სიდიდეზე არსებით გავლენას ახდენს ელექტროდებს შორის დეტალის წინააღმდეგობები, ე.ი. ელექტროდებს და წყვილელექტროდებს შორის ბიჯების სიდიდე (ნახ.3.6 და ნახ.3.10).

მათი გავლენა ძირითადად გამოიხატება დენის დაშუნტვის გზის წინაღობების $r_{\text{დ}1}, r_{\text{დ}2}, r_{\text{დ}3}, r_{\text{დ}4}$, ასევე წყვილელექტროდებს შორის დეტალების $r_{\text{მ}1}, r_{\text{მ}2}$ წინაღობების ცვლით შედულების დენის გადანაწილებაში შედულების ზონის გარეთ. ამ წინაღობათა ცვლით პრაქტიკულად ხდება შედულების ელექტროდებს შორის, ასევე წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის ცვლის იმიტაცია, რის შედეგადაც ჩვენს მიერ გამოკვლეულია დენის დაშუნტვაზე ელექტროდებს შორის ℓ , აგრეთვე წყვილელექტროდებს შორის $t_{\text{ბ}}$ ბიჯის ცვლილების გავლენა.

წინა თავში დადგენილი იყო ელექტროდებს შორის ბიჯის $t_{\text{ბ}}$ მინიმალური სიდიდე, დაშუნტვის დენის დასაშვები მნიშვნელობის პირობიდან გამომდინარე. აგრეთვე, ამავე პირობის გათვალისწინებით განსაზღვრული იქნა მინიმალური ბიჯი წყვილელექტროდებს შორის.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების ტექნოლოგიის დამუშავებისას წყვილელექტროდებს შორის ბიჯის შემოთავაზებული მეთოდით შერჩევისას, შედულების დენზე დაშუნტვის აღნიშნული ფაქტორის გავლენა შეიძლება მხვედველობაში არ იქნას მიღებული მისი ანგარიშის დროს.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების, მისი ფიზიკური მოდელით კვლევამ აჩვენა, რომ შესადული დეტალების ზემოთ განლაგებული მარჯვენა და მარცხენა შედულების კონტურებში საქმე გვაქვს დენების დაშუნტვის ერთმანეთისაგან განსხვავებულ სურათთან (ნახ.3.6). კერძოდ, ელექტროდებს შორის დეტალის $r_{\text{დ}1}$ წინაღობის (ე.ი. ბიჯის) გაზრდით, მარცხენა შედულების კონტურში გამავალი დენი I_1 იზრდება, ხოლო ამავე პირობებში, მარჯვენა შედულების კონტურში ელექტროდებს შორის დეტალის $r_{\text{დ}2}$ წინაღობის გაზრდით I_5 დენი მცირდება (ნახ.3.6, ცხრ.4.1).

შედულების დენის საანგარიშო გამოსახულებების მიღებისას გათვალისწინებული იქნა შემდეგი გარემოება. შედულების დენის დაშუნტვას არ აქვს ადგილი იმ შემთხვევაში, თუ ბიჯების ცვლილებისას, ან $r_{\text{დ}}$, $r_{\text{მ}}$ წინაღობების ცვლილებისას, უცვლელი რჩება შედულების დენის მნიშვნელობა. ამ პრინციპის გათვალისწინებით, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულების მოდელის კვლევის შედეგების ანალიზის საფუძველზე მიღებული იქნა ცხრილში 4.1 შეტანილი

მონაცემები. ამ უკანასკნელის მიხედვით მიღებული იქნა შედეგების დენების საანგარიშო გამოსახულებები:

– მარჯვენა შედეგების კონტურისათვის

$$I_{\text{მ2}} = I_{2\text{min}} + \Sigma\Delta; \quad (4.1)$$

– მარცხენა შედეგების კონტურისათვის

$$I_{\text{მ1}} = I_{1\text{max}} - \Sigma\Delta; \quad (4.2)$$

სადაც

$$\Sigma\Delta = \Delta_1 + \Delta_2. \quad (4.3)$$

სიდიდე Δ_1 წარმოადგენს მარჯვენა კონტურის მარცხენა შტოში გამავალი დენის სხვაობის მოდულს

$$\Delta_1 = |I_5 - I_{18}|. \quad (4.4)$$

ხოლო Δ_2 წარმოადგენს მარჯვენა შედეგების კონტურის მარჯვენა შტოში გამავალი დენების სხვაობის მოდულს

$$\Delta_2 = |I_7 - I_{20}|. \quad (4.5)$$

დაშუნტვის დენის (4.1) საანგარიშო გამოსახულებაში შემავალი $I_{2\text{min}}$ მნიშვნელობად აიღება მარჯვენა შედეგების კონტურის მარჯვენა შტოში ერთდროულად გაზომილ I_7 და I_{20} დენებს შორის უმცირესი.

დაშუნტვის დენის (4.2) საანგარიშო გამოსახულებაში შემავალი $I_{2\text{max}}$ მნიშვნელობად აიღება მარჯვენა შედეგების კონტურის მარცხენა შტოში ერთდროულად გაზომილ I_5 და I_{18} დენებს შორის უდიდესი.

მარჯვენა შედეგების კონტურისათვის გამოსახულება (4.1) შემდეგნაირად შეიძლება გადავწეროთ

$$I_{\text{მ2}} = I_{2\text{min}} + [|I_5 - I_{18}| + |I_7 - I_{20}|]. \quad (4.6)$$

თუ გავითვალისწინებთ კონტაქტში გამავალ დენებს, მაშინ მარჯვენა კონტურში გამავალი სრული დენი

$$I_{\text{მ2}} = I_{2\text{min}} + [|I_5 - I_{18}| + |I_7 - I_{20}|] + \Delta_{3-4}. \quad (4.7)$$

გამოსახულებაში (4.6) შემავალი

$$\Delta_{3-4} = |I_{12} + I_{14}|. \quad (4.8)$$

საბოლოოდ, მარჯვენა შედეგების კონტურში გამავალი სრული დენი:

$$I_{\text{მ2}} = I_{2\text{min}} + [|I_5 - I_{18}| + |I_7 - I_{20}|] + |I_{12} + I_{14}|. \quad (4.9)$$

მიღებული (4.9) გამოსახულების მიხედვით გაანგარიშებული სრული დენების მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში 4.1.

ცხრილი 4.1

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების
დენის (კა) საანგარიშო მნიშვნელობების განსაზღვრა

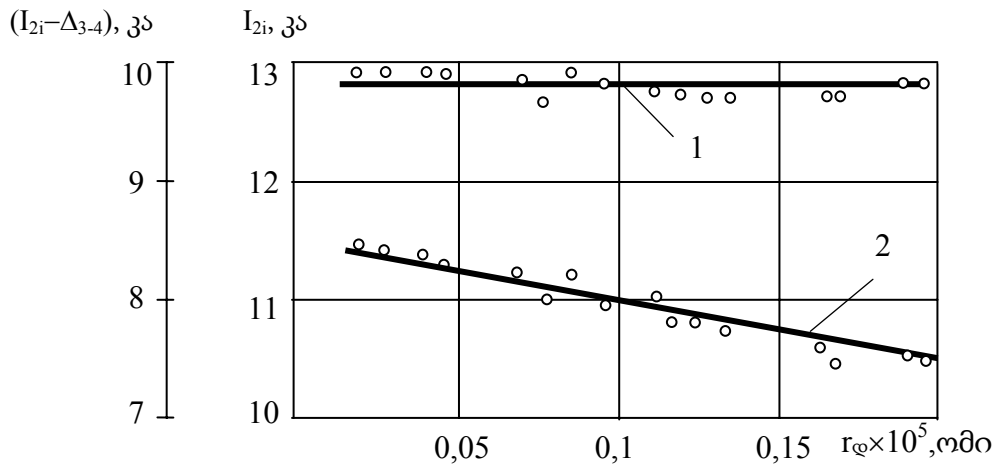
N	I_5	I_{18}	Δ_1	I_7	I_{20}	Δ_2	$\Sigma\Delta$	$I_{\text{მ2}}$	Δ_{34}	$I_{\text{მ2}} + \Delta_{34}$
1	7,26	6,51	0,75	7,67	6,55	1,12	1,87	8,38	3,48	11,88
2	7,21	6,38	0,83	7,67	6,44	1,23	2,06	8,44	4,28	12,72
3	7,15	6,15	1,00	7,69	6,47	1,22	2,22	8,37	4,34	12,71
4	7,08	6,49	0,59	7,71	6,51	1,20	1,79	8,28	4,41	12,69
5	7,01	6,48	0,53	7,73	6,54	1,19	1,72	8,20	4,47	12,67
6	6,94	6,46	0,38	7,35	6,57	0,78	1,26	7,72	4,13	11,85
7	6,87	6,44	0,43	7,78	6,60	1,18	1,61	8,05	4,59	12,64
8	6,79	6,43	0,36	7,80	6,40	1,14	1,50	7,90	4,60	12,50
9	6,71	6,41	0,30	7,83	6,67	1,16	1,46	8,13	4,70	12,83
10	6,64	6,40	0,24	7,86	6,71	1,15	1,39	7,79	4,77	12,56
11	6,56	6,37	0,19	7,89	6,74	1,15	1,34	7,71	4,83	12,54
12	6,48	6,35	0,13	7,93	6,78	1,15	1,28	7,63	4,87	12,50
13	6,40	6,33	0,07	7,97	6,82	1,15	1,22	7,62	4,92	12,54
14	6,52	6,31	0,01	8,01	6,86	1,15	1,16	7,46	4,99	12,45
15	6,23	6,29	0,06	8,05	6,90	1,15	1,21	7,44	5,97	13,41
16	6,15	6,26	0,11	8,10	6,94	1,16	1,27	7,42	5,08	12,50
17	6,05	6,25	0,20	8,14	6,99	1,15	1,35	7,40	5,14	12,54
18	5,96	6,21	0,25	8,19	7,03	1,16	1,41	7,37	5,17	12,54
19	5,87	6,18	0,31	8,25	7,07	1,18	1,49	7,36	5,22	12,58
20	5,77	6,15	0,38	8,30	7,12	1,18	1,56	7,33	5,28	12,61

შენიშვნა: ცხრილში 4.1 - $\Delta_{5-18}=I_5-I_{18}$; $\Delta_{7-20}=I_7-I_{20}$; $\Delta_{3-4}=I_{12}+I_{14}$;
 $\Delta_{\text{მ2}} = I_{\text{მ2}}'' - \Delta_{34}''$; $\Delta_{\text{მ2}}'' = I_{\text{min}} + \Delta_{5-18} - \Delta_{7-20}$.

ჩვენს მიერ მიღებული დამოკიდებულების (ნახ.3.6) და (4.2) გამოსახულების გათვალისწინებით მარცხენა შედუღების კონტურისათვის მიღებულია სრული დენის საანგარიშო ფორმულა:

$$I_{\text{მ1}} = I_{1\text{max}} - [|I_1 - I_{16}| + |I_2 - I_{17}|] + |I_9 + I_{10}|. \quad (4.10)$$

ცხრილის 4.1 მიხედვით აგებული დამოკიდებულებიდან (ნახ.4.1) ჩანს, რომ იმ შემთხვევაში, თუ მარჯვენა შედუღების კონტურში გამავალ სრულ დენს ვიანგარიშებთ მიღებული (4.9) გამოსახულების მიხედვით, მაშინ ელექტროდებს შორის ბიჯის ცვლა პრაქტიკულად არ მოქმედებს გაანგარიშებული დენის სიდიდეზე (ნახ.4.1), რაც იმის მაჩვენებელია, რომ გაანგარიშებული დენი პრაქტიკულად არ შეიცავს დაშუნტვის დენის სიდიდეს.



ნახ.4.1. შედუღების მარჯვენა კონტურში გამავალი დენის საანგარიშო სიდიდის დამოკიდებულება დაშუნტვის პირობებზე:
 1-გაანგარიშებული შედუღების დენისათვის; 2-გაანგარიშებული დენისათვის, რომელიც არ შეიცავს შესადული დეტალების კონტაქტებში გამავალ დენებს.

თუ მარჯვენა შედუღების კონტურში გამავალი დენი გაანგარიშებულია (4.6) მიღებული ფორმულით, მაშინ ბიჯის t (ან $r_{\text{ფ}}$ -ს) ცვლილების გავლენა მასზე უმნიშვნელოა, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ასეთნაირად განსაზღვრული დენი უმნიშვნელო სიდიდით 10 %-მდე, მაგრამ მაინც შეიცავს დაშუნტვის დენს (ნახ.4.1, მრუდი 2).

თუ დაუშვებთ, რომ (4.9) გამოსახულებაში $I_{12} \approx I_{14}$, ხოლო (4.10) გამოსახულებაში $I_9 \approx I_{10}$, მაშინ შეგვიძლია გამოვთვალოთ შედუღების დენები:

– მარჯვენა შედუღების ზედა და ქვედა კონტურში გამავალი შედუღების დენი

$$I_{12} = \frac{1}{2} [I_{\text{მ2}} - I_{\text{min}}] - \frac{1}{2} [|I_5 - I_{18}| + |I_7 - I_{21}|]; \quad (4.11)$$

– მარცხენა შედუღების ზედა და ქვედა კონტურში გამავალი შედუღების დენი

$$I_9 = \frac{1}{2}[I_{31} - I_{1\max}] + \frac{1}{2}[|I_1 - I_{16}| + |I_2 - I_{17}|]. \quad (4.12)$$

გამოსახულებების (4.11), (4.12) მიხედვით შეიძლება გაანგარიშებული იქნას მარცხენა და მარჯვენა კონტურებში გამავალი შედუღების დენები. როგორც (4.11), (4.12) გამოსახულებებიდან ჩანს, შედუღების დენები I_3, I_{12} გამოითვლება შედუღების კონტურის ცალკეულ ელემენტებში დენების გაზომვის შედეგების მიხედვით. ე.ი. როგორც ტრადიციულად მიღებულია, შედუღების დენის გაზომვას ახდენენ შედუღების კონტურის ერთ-ერთ დენმიმყვანში. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას შესაძლებელია დენის გაანგარიშება (4.11) და (4.12) გამოსახულებებით კონტურის ელემენტებში გამავალი დენების გაზომვის შედეგების მიხედვით.

როგორც პირველ თავში იყო ნაჩვენები, ტრადიციული მეთოდით შედუღების დენის განსაზღვრის შემთხვევაში, შედუღების დენი არ არის ინფორმაციის მატარებელი შედუღების ადგილის სიმტკიცის შესახებ. შემდეგ გამოკვლეული იქნება (4.11) და (4.12) გამოსახულებებით გაანგარიშებული დენების ინფორმაციულობა მრავალწერტილოვანი ორმხრივი კონტაქტური შედუღებისას.

4.2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას შედუღების დენის ინფორმაციულობის კვლევა

ჩვენს მიერ (4.11) და (4.12) გამოსახულებებით გამოთვლილი შედუღების დენის ინფორმაციულობის გამოკვლევისას (მრავალწერტილოვანი ორმხრივი კონტაქტური შედუღების სიმტკიცის შესახებ), ინფორმაციულობის კრიტერიუმად მიღებული იქნა კორელაციური კავშირის კოეფიციენტის სიდიდე r . რაც უფრო ახლოსაა მისი სიდიდე 1-თან, მით უფრო დიდი ინფორმაციის მატარებელია შედუღების დენი.

შედუღების დენის ინფორმაციულობის კვლევის მიზნით შედუღებული იქნა დაბალნახშირბადიანი საკონსტრუქციო ფოლადისაგან დამზადებული ორი ფურცელი (ზომით 3000 x 1000 x 1 მმ) ერთმანეთთან ორმხრივი მრავალწერტილოვანი

შედულების დანადგარზე. შედულების პროცესში ვზომავდით $I_1, I_2, I_5, I_7, I_{16}, I_{17}, I_{18}, I_{20}$ დენებს. შესაბამისი შენადული წერტილების ამოჭრით ვამზადებდით ნიმუშებს მათი შემდგომი მექანიკური გამოცდის მიზნით. გაზომვების და გამოცდის შედეგები, აგრეთვე გაანგარიშებული შედულების დენის მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 4.2.

ცხრილი 4.2

მონაცემები ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების დენსა და შენადული შეერთების სიმტკიცეს შორის კორელაციური კავშირის კოეფიციენტის გამოსათვლელად

N	I_1	$\Sigma\Delta$	$I_{\text{ყ}}(x)$	$F(y)$	X^2	Y^2	XY
	კა	კა	კა	დკ			
1	12,7	1,2	11,5	750	132,25	5625	862,5
2	12,8	1,3	11,5	740	132,25	5476	851,0
3	12,9	1,31	11,6	760	134,56	5776	881,6
4	13,0	1,4	11,6	730	134,56	5329	846,8
5	13,1	1,4	11,7	770	136,89	5929	900,9
6	13,2	1,4	11,8	780	139,24	6084	920,4
7	13,3	1,50	11,8	780	139,24	6084	920,4
8	13,4	1,55	11,85	730	139,24	5329	861,4
9	13,5	1,55	11,9	790	141,61	6241	940,1
10	13,6	1,5	12,10	860	146,41	7396	1040,6
11	13,8	1,6	12,2	880	148,84	7744	1073,6
12	13,9	1,65	12,5	820	148,84	6724	1000,4
13	14,0	1,6	12,4	810	153,76	6561	1004,4
14	14,2	1,70	12,5	850	156,25	7225	1062,5
15	14,3	1,75	12,5	850	156,25	7225	1062,5
16	14,4	1,70	12,7	810	161,29	6561	1028,7
17	14,6	1,75	12,8	880	163,84	7744	1126,4
18	14,8	1,8	13,0	900	169,00	8100	1170,0
19	14,9	1,8	13,1	910	171,61	8281	1192,1
20	15,1	1,8	13,3	930	176,89	8649	1236,9
	-		244,0	1633	2988,82	134083	19983,2

აღნიშნული ცხრილის მონაცემების საფუძველზე გათვლილი კორელაციური კავშირის კოეფიციენტი

$$r = \frac{m \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^m X_i Y_i}{m \sum_{i=1}^m X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m X_i \right)^2} \sqrt{\frac{m \sum_{i=1}^m X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m X_i \right)^2}{m \sum_{i=1}^m Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m Y_i \right)^2}} =$$

$$= \frac{20 \cdot 19983,2 - 244 \cdot 1633}{20 \cdot 2982,82 - 59536} \sqrt{\frac{20 \cdot 2982,82 - 59536}{2681660 - 2666689}} = 0,90.$$

გამოვლენილი მაღალი კორელაციური კავშირი იმის დამადასტურებელია, რომ მიღებული საანგარიშო ფორმულის საშუალებით საკმარისი სიზუსტით არის განსაზღვრული შედუღების დენის სიდიდე მისი დაშუნტვის გათვალისწინებით.

შედუღების დენი, განსაზღვრული ჩვენს მიერ მიღებული გამოსახულებით, შეიძლება გამოყენებული იქნას შედუღების ადგილის სიმტკიცის შეფასებისათვის ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას [12].

შედუღების დენის და შედუღების ადგილის სიმტკიცის ერთმანეთთან დამაკავშირებელი გამოსახულების კოეფიციენტი იანგარიშება ცხრილში 4.2 მოყვანილი მონაცემების გამოყენებით:

$$\beta = \frac{m \sum_{i=1}^m X_i Y_i - \sum_{i=1}^m X_i \sum_{i=1}^m Y_i}{m \sum_{i=1}^m X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m X_i \right)^2} = \frac{20 \cdot 19983,2 - 244 \cdot 1633}{20 \cdot 2982,82 - 1633} = 0,021.$$

აღნიშნული გამოსახულების თავისუფალი წევრი

$$\alpha = \frac{m \sum_{i=1}^m Y_i - \beta \sum_{i=1}^m X_i}{m} = \frac{1633 - 0,021 \cdot 244}{20} = 81,394.$$

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღებისას, შედუღების დენის სიმტკიცესთან დამაკავშირებელ გამოსახულებას აქვს სახე:

$$Y = 81,4 + 0,021X.$$

ცხრილიდან მიღებული X -ის და Y -ის მნიშვნელობების ჩასმით ვღებულობთ

$$P = 81,4 + 0,021I_{\text{გ}}. \quad (4.13)$$

თუ (4.13)-ში გავითვალისწინებთ შედუღების დენის საანგარიშო გამოსახულებებს (4.11), (4.12), მაშინ მარჯვენა შედუღების კონტურში შედუღების ადგილის სიმტკიცის, შედუღების დენთან დამაკავშირებელ მათემატიკურ გამოსახულებას ექნება სახე:

$$P_{\text{გკ}} = 81,4 + 0,021 \left\{ \frac{1}{2} [I_{\text{გ2}} - I_{\text{min}}] - \frac{1}{2} [|I_5 - I_{17}| + |I_7 - I_{20}|] \right\}. \quad (4.14)$$

მარცხენა შედულების კონტურში შედულების ადგილის სიმტკიცის, შედულების დენტან დამაკავშირებელ მათემატიკურ გამოსახულებას ექნება სახე:

$$P_{\text{ად}} = 81,4 + 0,021 \left\{ \frac{1}{2} [I_{\text{მ1}} - I_{1\text{max}}] + \frac{1}{2} [|I_1 - I_{16}| + |I_2 - I_{17}|] \right\}. \quad (4.15)$$

მიღებული (4.14) და (4.15) გამოსახულებები წარმოადგენენ მრავალწერტილოვანი ორმხრივი კონტაქტური შედულებისას მარჯვენა და მარცხენა შედულების კონტურებში დენტის და შედულების ადგილის სიმტკიცის ერთმანეთთან დამაკავშირებელ ერთფაქტორიან მათემატიკურ მოდელებს.

4.3. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედულების სიმტკიცის შეფასების მრავალფაქტორიანი მოდელის დამუშავება

მრავალი გამოკვლევების [53,54,57] შედეგად ნაჩვენებია, რომ კონტაქტური შედულებისას, შედულების ადგილის სიმტკიცის შეფასება მაღალი საიმედოობით შეიძლება მრავალფაქტორიანი მოდელით, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს შედულების ადგილის სიმტკიცეს და მისი შედულებისას კუმშვის ძალის, შედულების ხანგრძლივობის, აგრეთვე შედულების დენტის მნიშვნელობებს.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულებისას, შედულების ადგილს სიმტკიცის შედულების დენტან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი მოდელი მიღებული იყო წინა პარაგრაფში.

სიმტკიცის, კუმშვის ძალასთან და შედულების ხანგრძლივობასთან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი მოდელები დამუშავებული იყო პროფესორ მ.შალამბერიძის მიერ [136,137,138].

$$\begin{aligned} P &= 342,85 - 0,76F_{\text{კ}}; \\ P &= 27,48 + 833,3t_{\text{გ}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

(4.16) გამოსახულების და ადრე ჩვენს მიერ მიღებული (4.15) გამოსახულების გათვალისწინებით, ვღებულობთ მარცხენა შედულების კონტურში ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედულების ადგილის სიმტკიცის შეფასების განტოლებათა სისტემას:

$$\begin{cases} P = 342,85 - 0,76F_j; \\ P = 27,48 + 833,3t_{\text{წ}}; \\ P = 81,4 + 0,021 \left\{ \frac{1}{2} [I_{\text{წ1}} - I_{\text{max}}] + \frac{1}{2} [|I_1 - I_{16}| + |I_2 - I_{17}|] \right\}. \end{cases} \quad (4.17)$$

როგორც გამოკვლევებმა აჩვენა [104,107,108,142,144], კონტაქტური შედეგებისას სიმტკიცის შეფასების მათემატიკური მოდელი შეიძლება ზოგადად წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \rho_2 X_2 + \rho_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (4.18)$$

სადაც Y – შედეგების ადგილის სიმტკიცეა;

X_1 – შედეგების დენია გაანგარიშებული (4.15) გამოსახულებით;

X_2 – კუმშვის ძალაა შედეგების დროს;

X_3 – შედეგების ხანგრძლივობაა;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – მათემატიკური მოდელის კოეფიციენტებია;

α – თავისუფალი წევრია.

გამოსახულებისათვის (4.18) უმცირეს კვადრატთა მეთოდით მიღებულ ფორმულას აქვს სახე:

$$D = \Sigma Y - A - B_1 X_1 - B_2 X_2 - B_3 X_3 - B_{12} X_1 X_2 - B_{13} X_1 X_3 - B_{23} X_2 X_3 - B_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (4.19)$$

სადაც A – თავისუფალი წევრის შესაძლო მნიშვნელობებია;

D – საშუალო კვადრატული გადახრაა;

B_1, B_2, B_3 – კოეფიციენტების შესაძლო მნიშვნელობებია.

გამოსახულების (4.19) მინიმიზაციის მიზნით მინიმუმის არსებობის პირობიდან (მისი კერძო წარმოებული უნდა იყოს ნულის ტოლი) ვწერთ [1,2,3,13,14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial A} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_1} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{1j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_2} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{2j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_3} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{3j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_{12}} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{1j} X_{2j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_{13}} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{1j} X_{3j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_{23}} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{2j} X_{3j} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B_{123}} &= 2 \sum_j \left[\left(Y_j - A - B_1 X_{1j} - B_2 X_{2j} - B_3 X_{3j} - B_{12} X_{1j} X_{2j} - B_{13} X_{1j} X_{3j} - B_{23} X_{2j} X_{3j} - B_{123} X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \left(-X_{1j} X_{2j} X_{3j} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

ამ განტოლების გამარტივების შემდეგ მიიღება ე.წ. ნორმალური

განტოლებები:

$$nA + B_1 \sum X_{1j} + B_2 \sum X_{2j} + B_3 \sum X_{3j} + B_{12} \sum X_{1j} X_{2j} + B_{13} \sum X_{1j} X_{3j} + B_{23} \sum X_{2j} X_{3j} + B_{123} \sum X_{1j} X_{2j} X_{3j} = \sum Y_j;$$

$$A \sum X_{1j} + B_1 \sum X_{1j}^2 + B_2 \sum X_{2j} X_{1j} + B_3 \sum X_{3j} X_{1j} + B_{12} \sum X_{1j}^2 X_{2j} + B_{13} \sum X_{1j}^2 X_{3j} + B_{23} \sum X_{2j} X_{3j} X_{1j} + B_{123} \sum X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} = \sum Y_j;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$A \sum X_{kj} + B_1 \sum X_{1j} X_{kj} + B_2 \sum X_{2j} X_{kj} + B_3 \sum X_{1j} X_{kj} + B_{12} \sum X_{1j} X_{2j} X_{kj} + B_{13} \sum X_{1j} X_{2j} X_{3j} X_{kj} + B_{23} \sum X_{2j} X_{3j} X_{kj} + B_{123} \sum X_{1j} X_{2j} X_{3j} X_{kj} = \sum Y_j X_{kj}.$$

(4.20)

მიღებული (4.20)-ის პირველი განტოლებიდან განისაზღვრება A

$$A = \bar{Y} - \sum_{j=1}^k B_j \bar{X}_j$$

და ჩაისმება დანარჩენ განტოლებებში. მიიღება:

$$\begin{aligned}
\Sigma Y_j &= n\alpha + B_1 \Sigma X_{1j} + B_2 \Sigma X_{2j} + B_3 \Sigma X_{3j} + B_{12} \Sigma X_{1j} X_{2j} + B_{13} \Sigma X_{1j} X_{3j} + B_{23} \Sigma X_{2j} X_{3j} + \\
&+ B_{123} \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} \\
\Sigma Y_j X_{1j} &= \alpha \Sigma X_{1j} + B_1 \Sigma X_{1j}^2 + B_2 \Sigma X_{2j} X_{1j} + B_3 \Sigma X_{3j} X_{1j} + B_{12} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} + B_{13} \Sigma X_{1j}^2 X_{3j} + \\
&+ B_{23} \Sigma X_{2j} X_{3j} X_{1j} + B_{123} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} \\
\Sigma Y_j X_{2j} &= \alpha \Sigma X_{2j} + B_1 \Sigma X_{1j} X_{2j} + B_2 \Sigma X_{2j}^2 + B_3 \Sigma X_{3j} X_{2j} + B_{12} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 + B_{13} \Sigma X_{1j} X_{3j} X_{2j} + \\
&+ B_{23} \Sigma X_{2j}^2 X_{3j} + B_{123} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j}
\end{aligned}$$

(4.21)

$$\begin{aligned}
\Sigma Y_j X_{3j} &= \alpha \Sigma X_{3j} + B_1 \Sigma X_{1j} X_{3j} + B_2 \Sigma X_{2j} X_{3j} + B_3 \Sigma X_{3j}^2 + B_{12} \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} + B_{13} \Sigma X_{1j} X_{3j}^2 + \\
&+ B_{23} \Sigma X_{2j}^2 X_{3j} + B_{123} \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j}^2 \\
\Sigma Y_j X_{1j} X_{2j} &= \alpha \Sigma X_{1j} X_{2j} + B_1 \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} + B_2 \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 + B_3 \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} + B_{12} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j}^2 + \\
&+ B_{13} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} + B_{23} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j} + B_{123} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j}^2 X_{3j} \\
\Sigma Y_j X_{1j} X_{3j} &= \alpha \Sigma X_{1j} X_{3j} + B_1 \Sigma X_{1j}^2 X_{3j} + B_2 \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} + B_3 \Sigma X_{1j} X_{3j}^2 + B_{12} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} + \\
&+ B_{13} \Sigma X_{1j}^2 X_{3j}^2 + B_{23} \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j}^2 + B_{123} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j}^2 \\
\Sigma Y_j X_{2j} X_{3j} &= \alpha \Sigma X_{2j} X_{3j} + B_1 \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} + B_2 \Sigma X_{2j}^2 X_{3j} + B_3 \Sigma X_{2j} X_{3j}^2 + B_{12} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j} + \\
&+ B_{13} \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j}^2 + B_{23} \Sigma X_{2j}^2 X_{3j}^2 + B_{123} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j}^2 \\
\Sigma Y_j X_{1j} X_{2j} X_{3j} &= \alpha \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j} + B_1 \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} + B_2 \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j} + B_3 \Sigma X_{1j} X_{2j} X_{3j}^2 + \\
&+ B_{12} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j}^2 X_{3j} + B_{13} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j}^2 + B_{23} \Sigma X_{1j} X_{2j}^2 X_{3j}^2 + B_{123} \Sigma X_{1j}^2 X_{2j}^2 X_{3j}^2
\end{aligned}$$

სისტემა (4.21) ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned}
\bar{Y} &= \alpha + B_1 \bar{X}_1 + B_2 \bar{X}_2 + B_3 \bar{X}_3 + B_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 + B_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_3 + B_{23} \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{123} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3; \\
\bar{Y} \bar{X}_1 &= \alpha \bar{X}_1 + B_1 \bar{X}_1^2 + B_2 \bar{X}_1 \bar{X}_2 + B_3 \bar{X}_1 \bar{X}_3 + B_{12} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 + B_{13} \bar{X}_1^2 \bar{X}_3 + B_{23} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + \\
&+ B_{123} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 \bar{X}_3; \\
\bar{Y} \bar{X}_2 &= \alpha \bar{X}_2 + B_1 \bar{X}_1 \bar{X}_2 + B_2 \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 + B_3 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 + B_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{23} \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + \\
&+ B_{123} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3; \\
\bar{Y} \bar{X}_3 &= \alpha \bar{X}_3 + B_1 \bar{X}_1 \bar{X}_3 + B_2 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_3 \bar{X}_3^2 + B_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_3^2 + B_{23} \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + \\
&+ B_{123} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2; \\
\bar{Y} \bar{X}_1 \bar{X}_2 &= \alpha \bar{X}_1 \bar{X}_2 + B_1 \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 + B_2 \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 + B_3 \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{12} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2^2 + B_{13} \bar{X}_1^2 \bar{X}_1 \bar{X}_3 + \\
&+ B_{23} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + B_{123} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3; \\
\bar{Y} \bar{X}_1 \bar{X}_3 &= \alpha \bar{X}_1 \bar{X}_3 + B_1 \bar{X}_1^2 \bar{X}_3 + B_2 \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_3 \bar{X}_1 \bar{X}_3^2 + B_{12} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_{13} \bar{X}_1^2 \bar{X}_3^2 + \\
&+ B_{23} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + B_{123} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2; \\
\bar{Y} \bar{X}_2 \bar{X}_3 &= \alpha \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_1 \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_2 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + B_3 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + B_{12} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + \\
&+ B_{13} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + B_{23} \bar{X}_2^2 \bar{X}_3^2 + B_{123} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3^2; \\
\bar{Y} \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 &= \alpha \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_1 \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 \bar{X}_3 + B_2 \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + B_3 \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + B_{12} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3 + \\
&+ B_{13} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2 \bar{X}_3^2 + B_{23} \bar{X}_1 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3^2 + B_{123} \bar{X}_1^2 \bar{X}_2^2 \bar{X}_3^2.
\end{aligned} \tag{4.22}$$

თუ მიღებულ (4.22) განტოლებათა სისტემას ჩავწერთ მატრიცის სახით, მივიღებთ

$$B = A^{-1}C$$

სადაც

	A	B
C		
$\begin{pmatrix} 1 & X_1 & X_2 & X_3 & X_1X_2 & X_1X_3 & X_2X_3 & X_1X_2X_3 \\ X_1 & X_1^2 & X_1X_2 & X_1X_3 & X_1^2X_2 & X_1^2X_3 & X_1X_2X_3 & X_1^2X_2X_3 \\ X_2 & X_1X_2 & X_2^2 & X_2X_3 & X_1X_2^2 & X_1X_2X_3 & X_2^2X_3 & X_1X_2^2X_3 \\ X_3 & X_1X_3 & X_2X_3 & X_3^2 & X_1X_2X_2 & X_1X_3^2 & X_2X_3^2 & X_1X_2X_3^2 \\ X_1X_2 & X_1^2X_2 & X_1X_2^2 & X_1X_2X_3 & X_1^2X_2^2 & X_1^2X_2X_3 & X_1X_2^2X_3 & X_1^2X_2^2X_3 \\ X_1X_3 & X_1^2X_3 & X_1X_2X_3 & X_1X_3^2 & X_1^2X_2X_3 & X_1^2X_3^2 & X_1X_2X_3^2 & X_1^2X_2X_3^2 \\ X_2X_3 & X_1X_2X_3 & X_2^2X_3 & X_2X_3^2 & X_1X_2^2X_3 & X_1X_2X_3^2 & X_2^2X_3^2 & X_1X_2^2X_3^2 \\ X_1X_2X_3 & X_1^2X_2X_3 & X_1X_2^2X_3 & X_1X_2X_3^2 & X_1^2X_2^2X_3 & X_1^2X_2X_3^2 & X_1X_2^2X_3^2 & X_1^2X_2^2X_3^2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Y \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{23} \\ B_{123} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Y \\ YX_1 \\ YX_2 \\ YX_3 \\ YX_1X_2 \\ YX_1X_3 \\ YX_2X_3 \\ YX_1X_2X_3 \end{pmatrix}$

მოცემული მატრიცის ამოსახსნელად დამუშავებულია ეგმ-ის პროგრამა, რომლის საშუალებითაც მიღებული იქნა კოეფიციენტების შემდეგი მნიშვნელობები

$$\alpha = 44,27; \quad \beta_1 = -20,69; \quad \beta_2 = -1,97; \quad \beta_3 = -0,88; \quad \beta_{21} = -0,19; \quad \beta_{13} = -0,107; \\ \beta_{23} = -0,003; \quad \beta_4 = 0,35.$$

ამგვარად, წერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღების პროცესის მრავალფაქტორიანი ექსპერიმენტულ-სტატისტიკურ მოდელს აქვს სახე:

$$Y = 44,27 - 20,69X_1 - 1,97X_2 - 0,88X_3 - 0,19X_1X_2 - 0,107X_1X_3 - 0,003X_2X_3 + 0,35X_1X_2X_3,$$

სადაც X_1 – შედუღების დენია; X_2 – კუმშვის ძალა; X_3 – შედუღების დროა.

შემოწმებული იქნა მიღებული მოდელის ადეკვატურობა.

მიღებული გამოსახულება შენადული შეერთების სიმტკიცის შეფასებისას უზრუნველყოფს საჭირო სიზუსტეს იმ შემთხვევაშიც კი, თუ მასში ჩართული არ იქნება 0,02-ზე ნაკლები სიდიდის კოეფიციენტები; გამოსახულება ღებულობს სახეს

$$P = 44,27 - 20,69I - 1,97F - 0,88t - 0,19IF - 0,107It + 0,35IFt . \quad (4.23)$$

4.4. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის ალგორითმი

ჩატარებული გამოკვლევების შედეგების შესაბამისად, ორმხრივი მრავალწერტილოვან შენადული შეერთების სიმტკიცის შეფასების ალგორითმი შემდეგნაირად შეიძლება წარმოვიდგინოთ:

- გაიზომოს დენები შედუღების კონტურის ცალკეულ ელემენტებში;
- გამოითვალოს, ჩვენს მიერ დამუშავებული (4.14), (4.15) ფორმულების მიხედვით შედუღების დენები;
- შედუღების ხანგრძლივობის, კუმშვის ძალის და გამოთვლილი შედუღების დენის, შენადული შეერთების სიმტკიცესთან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი მოდელებისაგან მრავალფაქტორიანი მოდელის მიღება;
- გამოითვალოს ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცე, დენმიმყვანებში გამავალი გაზომილი დენების მიხედვით გამოთვლილი

შედულების დენისა და შედულების რეჟიმით განსაზღვრული დროისა და კუმშვის ძალის კონკრეტულ მნიშვნელობებზე;

- შედარებული იქნას გამოთვლილი სიმტკიცის მნიშვნელობა, მის ნორმატიულ და მისაღებ დონეებთან ($P_H = 300$ ნიუტონი, $P_0 = 700$ ნიუტონი);

- შედარების შედეგის მიხედვით გამოცემული იქნას სიგნალი შენადული შეერთების ხარისხის შესახებ;

- დათვლილი იქნას ერთმანეთის გვერდიგვერდ მყოფი უხარისხო შენადული შეერთების რაოდენობა;

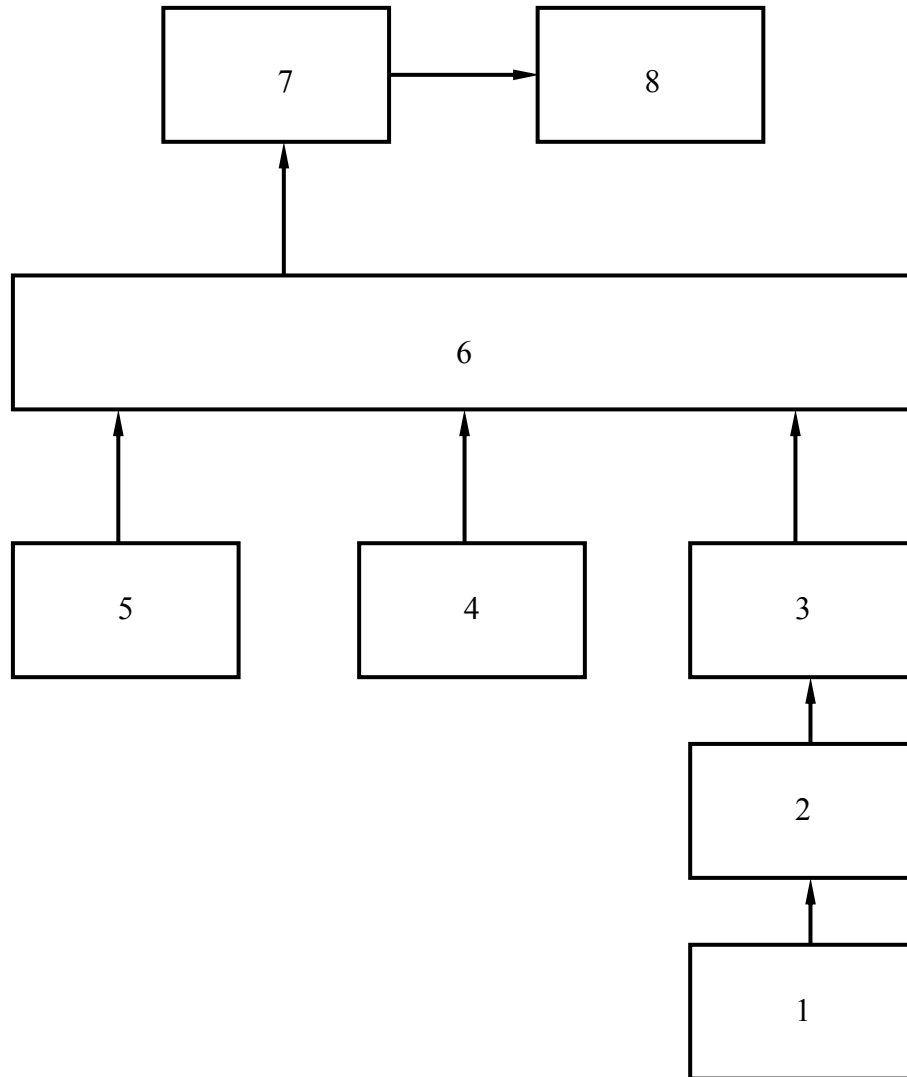
- დათვლილი იქნას ცალკეული კონსტრუქციის (ჩვენს შემთხვევაში KA3-4540 ავტომობილის ძარას გვერდითი კედლის) წუნდებული შენადული შეერთებების რაოდენობა;

- ჩათვლილი იქნას შენადული კონსტრუქცია ვარგისად (ხარისხიანად), თუ ნორმატიულ მნიშვნელობაზე ნაკლები სიმტკიცის მქონე შენადული შეერთებების რიცხვი კონსტრუქციაში არ აღემატება 5 %-ს, (KA3-4540 ავტომობილის ძარას გვერდითი კედლის შედულებისას სრულდება 400 შენადული შეერთება);

- თუ წუნდებულ შენადულ შეერთებათა რიცხვი კონსტრუქციაში აღმოჩნდება 5 %-ზე მეტი, მაშინ შენადული კონსტრუქცია ცხადდება უხარისხოდ, შედულების პროცესი წყდება და იწყება წუნდებული შეერთებების წარმოქმნის მიზეზის ძიება – ტექნოლოგიური პროცესის კონტროლი;

- თუ გამოთვლილი სიმტკიცის მიხედვით ნდობის ინტერვალში მოხვედრილი შენადული შეერთების საშუალო სიმტკიცე აღმოჩნდება P_0 მისაღებ დონეზე ნაკლები, აუცილებელია კორექტირებული იქნას შედულების რეჟიმი.

წარმოდგენილი ალგორითმის რეალიზაციის მიზნით დამუშავებული იქნა მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცის შეფასების სისტემა ნახ.4.2. იგი შედგება: შედულების დენის, დროის, კუმშვის ძალის გამზომი გადამწოდებისაგან და „ИСКРА 226“ ტიპის კომპიუტერისაგან.



ნახ.4.2. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის ალგორითმის ბლოკ-სქემა:

1-დენიმიცვანებში დენების გაზომვა; 2-შედუღების დენის გაანგარიშება; 3,4,5- შედუღების დენის, კუმშვის ძალის და შედუღების ხანგრძლიობის შენადული შეერთების სიმტკიცესთან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი მოდელები; 6-მრავალფაქტორიანი მოდელის მიღება; 7-შედუღების ხარისხის შესახებ ინფორმაციის დამუშავება; 8- ინფორმაცია შედუღების რეჟიმის კორექტირების შესახებ.

4.5. ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის

საიმედოობის შეფასება

ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდი გულისხმობს ყოველი შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლს, ამიტომ ხარისხის შეფასების საიმედოობა დამოკიდებულია მხოლოდ დეფექტების სტატისტიკური გამოვლენის უნარზე, სადაც ერთ-ერთი მთავარი მაჩვენებელია ხარისხთან პროცესის შერჩეული პარამეტრების კორელაციური კავშირის კოეფიციენტის სიდიდე.

როგორც აღნიშნული იყო, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ხარისხის ერთ-ერთი მთავარი მაჩვენებლის, შენადული შეერთების სიმტკიცის შეფასება ხდება ჩვენს მიერ დამუშავებული მრავალფაქტორიანი ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მოდელის საშუალებით. ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობის შეფასებისას ვისარგებლეთ ე.წ. შედარების მეთოდით [54]. ამ მეთოდით სარგელობისას წინასწარ ირჩევენ ეტალონურ მეთოდს და მას ადარებენ დამუშავებული მეთოდით ხარისხის შეფასების შედეგებს. შერჩეული ეტალონური მეთოდი უნდა იძლეოდეს შენადული შეერთების ხარისხის შესახებ უტყუარ ინფორმაციას. ჩვენს შემთხვევაში ეტალონურ მეთოდად შერჩეულია შედეგებული კონსტრუქციისაგან დამზადებული (ამოჭრილი) ნიმუშების მექანიკური გამოცდა.

შედარების მეთოდით საიმედოობის შეფასება ხდება შემდეგი ფორმულებით [55,56]:

$$D = \frac{n_3 + n_{\alpha 3}}{n_{\Sigma}}; \quad (4.24)$$

$$D_3 = \frac{n_3}{n_3 + n_{\alpha}}; \quad (4.25)$$

$$D_{\alpha 3} = \frac{n_{\alpha 3}}{n_{\alpha 3} + n_{\beta}}; \quad (4.26)$$

სადაც n_{Σ} – კონსტროლს დაქვემდებარებული შენადული შეერთებების საერთო რიცხვია;

D – კონტროლის მეთოდის საერთო საიმედოობა;

D_{β} – ვარგისი შენადული შეერთებების გამოვლენის საიმედოობაა;

$D_{\alpha\beta}$ – წუნდებული შენადული შეერთებების გამოვლენის საიმედოობაა;

n_{α} – ეტალონის მიხედვით ვარგისი;

n_{β} – ეტალონის მიხედვით წუნდებული;

n_{β} – ხარისხიანი შენადული შეერთებები;

$n_{\alpha\beta}$ – უხარისხო შენადული შეერთებები.

კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობის შეფასების შედარებითი მეთოდით სარგებლობისას აუცილებელი პირობაა $n_{\alpha\beta} \neq 0$, ე.ი. საკონტროლო ნიმუშებში აუცილებელია უხარისხო შენადული შეერთებების არსებობა.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შენადული შეერთების, პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის შედგენილი მრავალფაქტორიანი ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მოდელით შეფასების შედეგები მოცემულია ცხრილში 4.3.

ცხრილი 4.3

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შენადული შეერთებების სიმტკიცის, პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობის შეფასების მატრიცა

ხარისხის კონტროლის მეთოდები და მათი შეფასების შედეგები $n_{\Sigma} = 120\ 000$		ეტალონური მეთოდი - მექანიკური გამოცდა	
		ეტალონის მიხედვით ვარგისი $n_{\beta\beta} = n_{\beta} + n_{\alpha} =$ $= 99910 + 5540 = 105450$	ეტალონის მიხედვით წუნდებული $n_{\alpha\beta} = n_{\alpha} + n_{\beta} =$ $= 2980 + 11570 = 14550$
მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდი	ვარგისი	$n_{\beta} = 99910$	$n_{\beta} = 2980$
	წუნდებული	$n_{\alpha} = 5540$	$n_{\alpha\beta} = 11570$

დამუშავებული მეთოდის საიმედოობის შეფასებისათვის ქუთაისის საავტომობილო ქარხანაში ჩატარებული იქნა მეტად შრომატევადი სამუშაო.

გვერდულას შენადული კონსტრუქციიდან ერთი წლის განმავლობაში ამოჭრილი იქნა 120 000 ცალი ნიშში და ისინი მექანიკურ დატვირთვაზე გამოცდილი იქნა MP-500 გამჭიმავ მანქანაზე.

ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდით მწარმოებლის რისკის საიმედოობა:

$$D_{\Sigma(\alpha)} = \frac{120000 - 5540}{120000} = 0,95.$$

ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდით მომხმარებლის საიმედოობა:

$$D_{\Sigma(\beta)} = \frac{120000 - 2980}{120000} = 0,97.$$

ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საერთო საიმედოობა:

$$D_{\Sigma} = \frac{99910 + 11570}{120000} = 0,92.$$

ამრიგად, შედეგების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის დამუშავებული მეთოდი ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგებით ლითონკონსტრუქციების წარმოებისას ხასიათდება მაღალი საიმედოობით და იგი შეადგენს (0,92-0,97)-ს.

4.6. დასკვნები

1. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედეგების ფიზიკური მოდელის გამოკვლევის შედეგად მიღებულია შედეგების დენის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულებები:

– შედეგების მარჯვენა კონტურში შედეგების დენის გამოსათვლელი ფორმულა:

$$I_{12} = \frac{1}{2} [I_{\text{მ2}} - I_{\text{min}}] - \frac{1}{2} [|I_5 - I_{18}| + |I_7 - I_{20}|];$$

– შედეგების მარცხენა კონტურში შედეგების დენის გამოსათვლელი ფორმულა

$$I_9 = \frac{1}{2}[I_{31} - I_{1\max}] + \frac{1}{2}[|I_1 - I_{16}| + |I_2 - I_{17}|].$$

2. გამოვლენილია მაღალი კორელაციური კავშირი ჩვენს მიერ მიღებული მათემატიკური გამოსახულებით განსაზღვრული შედუღების დენსა და შენადული შეერთების სიმტკიცეს (ხარისხს) შორის ($r=0,9$), რაც მიუთითებს იმაზე, რომ შედუღების დენის მიღებული საანგარიშო გამოსახულებები საკმაოდ სიზუსტით გამოყოფს შედუღების დენს დაშუნტვის დენისაგან;

3. დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შენადული შეერთების სიმტკიცის შედუღების დენთან დამაკავშირებელი ერთფაქტორიანი ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მოდელები:

$$P_{\text{მკვ}} = 81,4 + 0,021 \left\{ \frac{1}{2}[I_{32} - I_{\min}] - \frac{1}{2}[|I_5 - I_{17}| + |I_7 - I_{20}|] \right\};$$

$$P_{\text{მცვ}} = 81,4 + 0,021 \left\{ \frac{1}{2}[I_{31} - I_{1\max}] + \frac{1}{2}[|I_1 - I_{18}| + |I_2 - I_{17}|] \right\}.$$

4. დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შენადული შეერთების სიმტკიცის, პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლისათვის მრავალფაქტორიანი ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მოდელი:

$$P = 44,27 - 20,69I_{\text{წ}} - 1,97F_{\text{ღ}} - 0,88t_{\text{წ}} - 0,191I_{\text{წ}}F_{\text{ღ}} - 0,107I_{\text{წ}}t_{\text{წ}} + 0,35I_{\text{წ}}F_{\text{კ}}t_{\text{წ}}.$$

5. გამოკვლეულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობა. იგი მაღალია და შეადგენს (0,92-0,97)-ს.

ძირითადი დასკვნები

არამრღვევი კონტროლის მეთოდების, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების სქემის ანალიზის და წინასწარი გამოკვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ დღეისათვის გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ხარისხის შედუღების პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის მეთოდის არ არსებობის მთავარ მიზეზს წარმოადგენს, მათი შენადული შეერთებების სიმტკიცის შესახებ შედუღების დენის დაბალი ინფორმაციულობა

(კორელაციური კავშირის კოეფიციენტი არ აღემატება 0,6-ს), რაც დაკავშირებულია აღნიშნული კონსტრუქციების შედუღებისას დენის დაშუნტვასთან.

დამუშავებულია კონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისათვის მაღალი ცვეთამდეგობის მქონე ელექტროდი, რომლის გამოყენებითაც სტაბილური გახდა ელექტროდსა და დეტალს შორის კონტაქტის წინაღობა.

აღნიშნულით შესაძლებელი გახდა ჩვენს მიერ პირველად შექმნილიყო, შედუღების დენის დაშუნტვის პროცესის გამოკვლევის მიზნით, ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ფიზიკური მოდელი.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების, მისი ფიზიკური მოდელის მიხედვით, კვლევის საფუძველზე გამოვლენილია შედუღების დენის დაშუნტვის თავისებურებანი და შექმნილია შედუღების დენის სიდიდის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულებანი. ისინი საშუალებას იძლევიან შედუღების კონტურის ელემენტებში გაზომილი დენების მიხედვით გაანგარიშებული იქნას შედუღების დენის რეალური მნიშვნელობა.

გამოვლენილია მაღალი კორელაციური კავშირი შემუშავებული მათემატიკური გამოსახულებებით გაანგარიშებული შედუღების დენსა და ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცეს შორის.

შექმნილია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის ორიგინალური მეთოდი (რაც დადასტურებულია საავტორო მოწმობით), რისთვისაც დამუშავებულია ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შედუღების ექსპერიმენტულ-სტატისტიკური მათემატიკური მოდელი. იგი ერთმანეთთან აკავშირებს შენადული შეერთების სიმტკიცეს და შედუღების პროცესის პარამეტრებს – შედუღების დენს, შედუღების ზონაზე მოქმედ კუმშვის ძალას და შედუღების ხანგრძლიობას.

ორმხრივი მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების ხარისხის პროცესის პარამეტრების მიხედვით კონტროლის დამუშავებული მეთოდის საიმედოობა შეადგენს 92...97 %. იგი დანერგილი იყო 1989 წელს ქუთაისის საავტომობილო ქარხანაში KA3-4540 ავტომობილის ძარას გვერდულას ხარისხის კონტროლისათვის. დამუშავებული კონტროლის მეთოდის გამოყენების შედეგად წლიურმა ეკონომიკურმა ეფექტმა შეადგინა იმ დროს 30 000 მანეთი.

ლიტერატურა

1. ბუაძე ა., გაბრაშვილი ა., წვენიაშვილი დ. ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებები. – თბილისი: სახ. უნივერს. გამომცემლობა, 1986.
2. ბუაძე ა., გაბრაშვილი ა., წვენიაშვილი დ. მათემატიკა ინჟინრებისათვის. – თბილისი: სახ. უნივერს. გამომცემლობა, 1986. – 501 გვ.
3. თოფურია ს., აბესაძე გ. და სხვ. გამოთვლითი მათემატიკა. – თბილისი: სახ. უნივერს. გამომცემლობა, 1981.
4. ფხაკაძე თ., სილაგაძე ს., ხვადაგიანი ა., შალამბერიძე მ. გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების შედუღების ხარისხის კონტროლის შესაძლებლობების კვლევა. /ქუთაისის სახელმწიფო ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომათა კრებული, №1(16). – ქუთაისი: საქართველო, 2005. – გვ.243-247.
5. შალამბერიძე მ., მინდაძე ს. ავტომობილის ლითონკონსტრუქციების შედუღების ხარისხის კონტროლი. /რესპუბლიკური კონფერენციის „მობილური მანქანების დინამიკა, სიმტკიცე და ხანმედეგობა“ თეზისების კრებული. – ქუთაისი, 1995.
6. შალამბერიძე მ., მინდაძე ს., ვაჩიბერაძე გ. წერტილოვანი შედუღების დეფექტების განაწილების ფუნქცია. /რესპუბლიკური კონფერენციის „მობილური მანქანების დინამიკა, სიმტკიცე და ხანმედეგობა“ თეზისების კრებული. – ქუთაისი, 1995.
7. შალამბერიძე მ. შედუღების დენის მიხედვით შენადული შეერთების სიმტკიცის პროგნოზირების შესაძლებლობის კვლევა. /საქარველოს მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, № 2. – თბილისი, 1998.
8. შალამბერიძე მ., შელია ნ. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი შენადული შეერთების სიმტკიცის შედუღების დენის მიხედვით პროგნოზირების შესაძლებლობის კვლევა. /საქარველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, №3(419). – თბილისი, 1998.
9. შალამბერიძე მ. შედუღების დენის თვითრეგულირების გავლენა შედუღების სიმტკიცეზე. /საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, №3. – თბილისი, 1998.
10. შალამბერიძე მ., შელია ნ. დენის ორმხრივი მიყვანით, ორმხრივი

მრავალწერტილოვანი შედუღების შენაცვლების სქემა. /საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომების კრებული, №1(417). – 1998.

11. შალამბერიძე მ., ცუცხვაშვილი გ., ფხაკაძე თ., კვანტრიშვილი გ. ელექტროკონტაქტური მრავალწერტილოვანი შედუღების დენის განსაზღვრა. /III რესპუბლიკური სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებათა კრებული „შედუღების პრობლემები საქართველოს სახალხო მეურნეობაში“, 11-14 ოქტომბერი, 1991 წ. – ქუთაისი, 1991. – გვ.149-158.
12. შალამბერიძე მ., ფხაკაძე თ., მინდაძე ს., შელია ნ. ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შენადული შეერთების ხარისხის კონტროლის ხერხი. P2820, ძალაშია 2000 წლის 21.12-დან. – GE P 2002 2820B, AP 2002, 2779A, B23K11/24, საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული ცენტრის „საქპატენტის“ პატენტი გამოგონებაზე ბიულეტენი № 7. – თბილისი, 2002.
13. ჭელიძე ვლ., წითლაძე ე. მათემატიკური ანალიზის კურსი. ტომი 2. – თბილისი: სახ. უნივერს. გამომცემლობა, 1975.
14. ხარაძე ა., ჭელიძე ვლ. და სხვ. მათემატიკური ანალიზის კურსი. – თბილისი: სახ. უნივერს. გამომცემლობა, 1954.
15. ხვადაგიანი ა. კომპოზიციური მასალების თერმომედეგობის შესწავლა. /ქუთაისის ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომები, № 1. – ქუთაისი: საქართველო, 1995.
16. ხვადაგიანი ა. SVC მეთოდით მიღებული სალი შენადნობის სისაღე. /საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, № 8. – 1997.
17. Andrews D.S., Dhattacharys S. Dynamic resistance and its application to in process control of spot welding. /Exploit weld. Nichol. Int. Cong., vol.1. – 1975. – P.221-227.
18. Andrews D.R., Dunn A., Broomhend J. Dynamic monitoring for resistance welding low lodged system. /Weld. Res. Int., 6, № 4. – 1976. – P.1-27.
19. Albring W. Angewandte stromungslehre. – Drezden: Verlag Sternkopff, 1970.
20. Blume F., Lange D., Schmiedgen D. Neue aspekte fur die Gutesicherung berm Widerstandspunktschweissen //Wissenschaftliche Zeitschrift. – 1977. – S.905-909.
21. Cunningnam, Begemen. Greater strength and improved consistency result with higher projections when using low current and long weld times. /Welding Research supplement, № 1. – 1966. – P.26-30.

22. Drab F., Teska I. Indulcni snimac na mereni Posuvu. /*Strojirensstvi*, 12, № 9. – 1962. – P.699-701.
23. Glark., Lederman W., Smith V.F. The fluidic vibrating shrink accelerometer. /*Automatica*, 6, № 4. – 1970. – P.497-503.
24. Janota M. Steuerung des Punktschweissens durch Verändern der Anpresskraft. /*Schweistechnik*, 27, № 9. 1977.– P.400-402.
25. Knobloch J., Suter R. Widerstandsschweissen – gestern, heute, mjrgen. //*Z. Schweisstechn*, 66, № 9. – 1979. – S.197-204.
26. Lipf Milan. Vplyv pribehn pritlacnej sily na rovnomernost akosti vystupkove zvaranych spojov. /*Zvarac spravy*. VUZ, 26, N2. – Bratislava, 1976. – P.25-32.
27. Mathematische Modelle fur die Gutesichterung beim Widerstandspunktschweissen. /Von Dieter Lange. //*ZIS- Mitteilung*, N4. – 1976. – S.357-364.
28. Miller N.P., Kovalianckas A.A. An ampere-squared-second indicator for resistance Welding. /*Electrical Engineering*, № 69. – 1950. – P.265-269.
29. Nagel K. Aufgabe der Zerstorungs frein schweissnoht und Werksroffprufung. /*Schweisschn*, 26, № 5. – 1974. – S.164-166.
30. Nakata Shuji, Nishikawa Masahiro, Suematsu Takanori. Proper heat input control methods relevant to different drooping characteristics of power sources. /*Trans. Jap. Weld. Soc.*, 8, №2. – 1977. – P.91-96.
31. Neumann A. *Schweisstechnisches Handbuch fur Lonstrukteure*. – Berlin: Verlag Technik, 1963.
32. Niemann G. *Maschinenelemente*. Bd. und 2. – Berlin: Gottingen, Heidelberg: Springerverlfg, 1960.
33. Schmeidgen Dietmor, Lange Dieter. Mathematisches Modell zur Gutebestimmung und Qualitatssicherung beim Widerstandspunktschweissen. /*Schqeisstechnic*, 24, № 5. – 1974.
34. Williams N.T. Recent developments in the resistance welding of zinc coated steels. /*Weld. and Metal Fabr.*, 45, № 5. – 1977. – P.275-282.
35. Адлер Ю.П., Грановский Е.В. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Москва: Наука, 1976. – 278 с.
36. Алов А.А., Булгачев Е.А. Формирование литого ядра при точечной и роликовой сварке. /*Журнал "Автоматическая сварка"*, №12. – 1960. – С.37-45.
37. Атаманов В.Н., Каганов Н.Л. и др. Разработка методики испытания соединений золоченного ковара с печатными проводниками. /*Известия вузов. Машиностроение*, № 7. – 1970. – С.143-146.

38. Атаманов В.Н., Исаев А.П. Исследование процесса сварки с микрозазором при автоматическом слежении за стадией плавления. /Журнал "Приборы и системы управления", № 6. – 1970. – С.39-42.
39. Атаманов В.Н. Разработка и исследование процесса конденсаторной микросварки гибридных схем. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва: МВТУ, 1968. – 12 с.
40. Александров А.Г., Заруба И.И., Пинковский М.В. Источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки. – Днепропетровск: Проминь, 1976. – 264 с.
41. Бабкин Л.Т., Горский В.В. Система автоматического регулирования процесса контактной сварки. /Журнал "Автоматическая сварка", № 6. – 1962. – С.39-47.
42. Балковец Д.С. Методы контроля точечной сварки. /Журнал "Автогенное дело", № 12. – 1947. – С.9-14.
43. Балковец Д.С. Прибор для дилатометрического контроля процесса точечной сварки. /Журнал "Автогенное дело", № 8. – 1951. – С.10-12.
44. Балахов О.В., Чье Ен Ун. Автоматизация контроля качества контактной точечной электросварки. /Известия Ленинградского электротехнического института, № 255. – 1979. – С.76-78.
45. Балашов Е.П., Долженков В.А. Статистический контроль и регулирование качества массовой продукции. – Москва: Машиностроение, 1984. – 230 с.
46. Балашов Е.П. Микроэлектронные многофункциональные модели и их применение. – Ленинград: Знание, 1979. – 18 с.
47. Балашов Е.П., Пузанов Д.В. Микропроцессоры и микропроцессорные системы. Учебник. Пособие для вузов. /Под ред. В.Б.Смолова. – Москва: Советское радио, 1980. – 328 с.
48. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Материалы в радиоэлектронике. – Москва: Госэнергоиздат, 1961. – 352 с.
49. Бородюк В.П., Чирков И.М. Получение математического описания методами пассивного и активного экспериментов. /Сборник научных трудов МЭИ. Вып.51. – 1963. – С.9-113.
50. Браткова О.Н. Источники питания дуговой сварки. – Москва: Высшая школа, 1982. – 181 с.
51. Вашкевич Н.П., Сергеев Н.П., Чижухин Г.Н. Электромагнитная техника. – Москва: Высшая школа, 1975.
52. Вентцель У.С. Теория вероятностей. – Москва: Наука, 1969. – 576 с.
53. Волченко В.Н., Куликов В.П. Повышение достоверности оценки качества при переходе от разрушающего к неразрушающему магнитографическому контролю

- соединений, выполненных точечной сваркой. /Журнал "Автоматическая сварка", №2. – 1980. – С.27-31.
54. Волченко В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов. – Москва: Изд-во стандартов, 1974. – 160 с.
55. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. – Москва: Металлургия, 1979. – 86 с.
56. Волченко В.Н. Вероятностные модели расчета достоверности неразрушающего контроля сварных соединений. /Журнал "Автоматическая сварка", № 12. – 1975. – С.34-37.
57. Волченко В.Н. Статистические методы управления качеством по результатам неразрушающего контроля. /Тезисы докладов Всесоюзной межвузовской конференции. – Москва, 1979. – С.57-61.
58. Гельман А.С. Технология и оборудование контактной электросварки. – Москва: Машгиз, 1960. – 368 с.
59. Гельман А.С. Теоретические основы контактной сварки. – Москва: НТО Машпром, 1962. – 90 с.
60. Гельман А.С. Основы сварки давлением. – Москва: Машиностроение, 1970. – 312 с.
61. Генгенбах О., Зиндельфинден В. Расчет электрических величин во вторичной цепи точечных сварочных устройств. /Schweis. und Schneid., т.16. Вып.2. Пер. с нем.–1964.
62. Глебов Л.В., Пескарев Н.А., Файгенбаум Д.С. Расчеты и конструирование машин контактной сварки. – Ленинград: Энергоиздат Ленинградское отд., 1985. – 423 с.
63. Гилевич В.А. Рельефная сварка деталей из сплава Д16А-БМ. /Журнал "Сварочное производство", № 9. – 1961. – С.4-6.
64. Гилевич В.А. Особенности образования соединения при рельефной сварке. /Журнал "Автоматическая сварка", № 12. – 1968. –С.35-38.
65. Гилевич В.А. Технология и оборудование рельефной сварки. – Ленинград: Машиностроение, 1976. – 152 с.
66. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – Москва: Высшая школа, 1977. – 480 с.
67. Горбачев В.И. Рельефная сварка сепараторов шарикоподшипников. /Журнал "Сварочное производство", № 8. – 1968. – С.28-30.
68. Гуляев А.И. Рельефная сварка в автостроении. /Журнал "Автогенное дело", № 11. – 1952. – С.16-20.
69. Гуляев А.И. Технология точечной и рельефной сварки сталей. – Москва: Машиностроение, 1969. – 240 с.

70. Гурвич Ф.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов. – Киев: Техника, 1972. – 460 с.
71. ГОСТ 16121-79. Реле слаботочные электромагнитные. – Москва: Изд-во стандартов, 1976.
72. ГОСТ 15467-79. Качество продукции. Термины. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 26 с.
73. ГОСТ 13377-75. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1980. – 35 с.
74. ГОСТ 16504-74. Качество продукции. Контроль и испытания. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 44 с.
75. ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электроники. Механические и климатические воздействия и методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1972. – 96 с.
76. ГОСТ 20736-75. Статистический приемочный контроль по количественному признаку. – Москва: Изд-во стандартов, 1975. – 91 с.
77. ГОСТ 20426-75. Контроль неразрушающий. Радиационные методы дефектоскопии. Область применения. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 32 с.
78. ГОСТ 15893-77. Статистическое регулирование технических процессов при нормальном распределении контролируемого параметра. – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 40 с.
79. ГОСТ 20737-75. Статистическое регулирование технологических процессов методом групп качества (переиздание). – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 20 с.
80. ГОСТ 16493-70. Качество продукции. Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку (переиздание). – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 43 с.
81. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. – Москва: Мир, 1980. – 610 с.
82. Дорофеев А.Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. – Москва: Машиностроение, 1967. – 232 с.
83. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. – Москва: Высшая школа, 1965.
84. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.
85. Исаев А.П., Шашин Д.М., Шаламберидзе М.Ш. Оценка прочности сварных узлов малогабаритных реле по параметрам процесса конденсаторной сварки. /Сборник научных трудов МВТУ им.Н.Э.Баумана, № 363. – 1981. – С.66-72.

86. Кабанов М.С. Сварка на контактных машинах. – Москва: Высшая школа, 1974. – 97с.
87. Калантаров П.Л., Цетлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Ленинград: Энергия, 1970
88. Кислюк Ф.И., Хараш Н.Я. Рельефная сварка стальных деталей разной толщины. /Журнал "Сварочное производство", № 10. – 1964. – С.24-26.
89. Комплексная система управления качеством продукции. Основные принципы разработки и внедрения. /Под ред. А.В.Гличева. – Москва: Машиностроение, 1977. – 68 с.
90. Константинов В.И., Мансуров Н.Н., Симонов А.Ф., Федоров., Королев А.А. Сборник задач по теоретических электротехнике. – Москва: Энергия, 1970.
91. Контроль качества сварки. /Под ред. В.Н.Волченко. – Москва: Машиностроение, 1975. – 328 с.
92. Круг Г.К. К вопросу отыскания алгоритма управления сложными техническими процессами. /Сборник научных трудов МЭИ. Вып.51. – 1963. – С.7-49.
93. Ланкин Ю.Н. Косвенные параметры, характеризующие качество рельефной сварки сепараторов шарикоподшипников. /Журнал "Автоматическая сварка", № 9. – 1966. – С.41-43.
94. Мансуров Н.Н., Попов В.С. Теоретическая электротехника. – Москва: Энергия, 1968.
95. Моисеенко Д.В., Исаев А.П., Шашин Д.М., Шаламберидзе М.Ш. Оценка качества сварных соединений узлов реле, выполняемых контактной сваркой с использованием обобщенного показателя. /Сборник научных трудов МВТУ им. Н.Э.Баумана, № 434. – Москва, 1985.
96. Моравский В.Э. Конденсаторная сварка металлов. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1964. – 300 с.
97. Моравский В.Э. Сварка аккумулированной энергией. – Киев: Гос. изд-во технической литературы УССР, 1963. – 298 с.
98. Назаров С.Т. Методы контроля качества сварных соединений. – Москва: Машиностроение, 1964. – 29 с.
99. Орлов Б.Д., Чулошников П.Л. и др. Контроль точечной и роликовой электросварки. – Москва: Машиностроение, 1973. – 304 с.
100. Орлов Б.Д., Дмитриев Ю.В., Марченко А.А. К вопросу о контроле качества точечной и роликовой конденсаторной сварки. /Журнал "Сварочное производство", № 7. – 1965. – С.11-12.
101. Патон Б.Е. Перспективы развития сварки. /Тезисы докладов Всесоюзной межвузовской конференции. – Москва, 1983. – С.4-6.

102. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для контактной сварки. – Москва: Машиностроение, 1969. – 440 с.
103. Патон Б.Е. Дальнейшее развитие систем автоматического управления и регулирования сварочных процессов. /Журнал "Автоматическая сварка", № 3. – 1963. – С.1-6.
104. Патон Б.Е., Подола Н.В., Квачев В.Г. и др. Математическое моделирование сварочных процессов для создания систем прогнозирования качества соединений и оптимального управления. /Журнал "Автоматическая сварка", № 7. – 1971. – С.1-5.
105. Патон Б.Е. Перспектива применения электронно-вычислительной техники в сварочной промышленности. /Журнал "Автоматическая сварка", № 11. – 1977. – С.1-3.
106. Паченцев Ю.А. Регулирование процесса точечной сварки по величине перемещения электродов сварочной машины. /Журнал "Автоматическая сварка", № 5. – 1961. – С.18-29.
107. Подола Н.А., Донченко Н.Л., Урсатьев А.А. Математическое описание процесса контактной точечной сварки легких сплавов изоморфными моделями. /Журнал "Автоматическая сварка", № 2. – 1974. – С.16-19.
108. Подола Н.В., Квачев В.Г., Урсатьев А.А. Оценка влияния параметров режима на размеры ядра при точечной сварке. /Журнал "Автоматическая сварка", № 11. – 1970. – С.24-28.
109. Попов В.С. Теоретическая электротехника. – Москва: Энергия, 1970. – 607 с.
110. Пустильник Е.Т. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – Москва: Наука, 1968. – 288 с.
111. Пхакадзе Ф.Ю., Хвадагиани А.И., Шаламберидзе М.Ш. Особенности шунтирования тока при двухсторонней многоточечной сварке. /Сборник докладов X Международной научно-технической конференции "Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий", 19-21 октября 2005 года. – Кутаиси, 2005. – С.137-141
112. РДМУ 109-77. Методическое указание. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технических процессов. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 63 с.
113. Рудик А.Р., Любинский Д.Л. Технология миниатюрных реле. – Ленинград: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
114. Севбо П.И. Комплексная механизация и автоматизация сварочного производства. – Киев: Техника, 1974.
115. Севбо П.И. Комбинированные машины для сварочного производства. – Киев: Техника, 1975.

116. Столбов Ю.И. Прерыватель сварочного тока для точечных машин с электронным счетчиком энергии. /Журнал "Сварочное производство", № 7. – 1963. – С.34-35.
117. Тарасов Н.М., Карташов В.К. Ультразвуковой контроль и автоматическое регулирование процесса точечной сварки. /Журнал "Сварочное производство", № 3. – 1966. – С.24-25.
118. Технология и оборудование контактной сварки. /Под ред. Б.Д.Орлова. – Москва: Машиностроение, 1975. – 536 с.
119. Фалькевич А.С., Хусаков М.Х. Магнитографический контроль сварных соединений. – Москва: Машиностроение, 1966. – 176 с.
120. Хвадагиани А.И. и др. Способ получения твердосплавного материала на основе боридов титана. А.с. № 1547178, СССР, 1.11.87 г.
121. Хвадагиани А.И. и др. Получение твердых сплавов на основе боридов титана и циркония методом СВС с прессованием. Препринт (ДСП). Уч. № 59/84, – Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1984
122. Хвадагиани А.И. и др. Свойства твердых сплавов на основе боридов титана и циркония. Препринт (ДСП). Уч. № 59/84, – Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1984
123. Хвадагиани А.И. и др. Физические особенности использования СВ-синтеза для получения твердых сплавов. /Отчет НИС (ДСП). ОИХФ АН СССР. Уч. № 51/84. – Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1984
124. Хвадагиани А.И., Шаламберидзе М.Ш. и др. Способ изготовления электродов для электроконтактной точечной сварки. А.с. № 1798087, СССР, 1992.
125. Хенсен В. Контроль качества. – Москва: Прогресс, 1968. – 520 с.
126. Худсон Д. Статистика для физиков. – Москва: Мир, 1970. – 296 с.
127. Хитровский Е.И. Автоматизированная система статистического контроля технического процесса СКТП-3. /Журнал "Электронная техника", №3. – 1970.– С.5-8.
128. Беречикидзе А.В. Определение оптимальной частоты вращения восстанавливаемой детали при электроконтактной наварке ленты. /Журнал "Сварочное производство", № 9. –1995. – С.38-39.
129. Чулошников П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. – Москва: Машиностроение, 1964. – 232 с.
130. Шаламберидзе М.Ш. и др. Повышение эффективности производства сварных конструкций. /Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Социально-экономические проблемы научно-технического прогресса в новых условиях хозяйствования", 20-23 октября, 1989. – Кутаиси: КПИ, 1989.

131. Шаламберидзе М.Ш., Исаев А.П., Шашин Д.М. Схема механических испытаний для оценки качества сварных соединений малогабаритных деталей. /Известия вузов. Машиностроение, № 3. – 1982. – С.105-109.
132. Шаламберидзе М.Ш., Шубладзе Т.Г., Цкалобадзе Л.П., Пхакадзе Ф.Ю. Оптимизация режима сварки кабин автомобиля КАЗ-4540. /Сборник статей Республиканской научно-технической конференции "Разработка и внедрение высокоэффективного сварочно-наплавочного оборудования и технологии", 10-14 ноября 1989 года. – Телави, 1989. – С.77-81.
133. Шаламберидзе М.Ш. и др. Разработка метода и устройства неразрушающего контроля и регулирования качеством сварки узлов автомобиля КАЗ-4540. НИС. – Кутаиси: Кутаисский политехнический институт, 1990.
134. Шаламберидзе М.Ш. и др. Способ изготовления электродов для электроконтактной точечной сварки. А.с. № 1660900, СССР, 1992.
135. Шаламберидзе М.Ш. Оптимизация режима сварки автомобиля КАЗ-4540. /Сборник научных трудов Грузинского технического университета, № 2(418). – Тбилиси, 1998.
136. Шаламберидзе М.Ш. Математическая модель контактной точечной сварки. /Сборник научных трудов Грузинского технического университета, № 3(419). – Тбилиси, 1998.
137. Шаламберидзе М.Ш. Моделирование контактной сварки. /Сборник научных трудов Грузинского технического университета, № 2(418). – Тбилиси, 1989.
138. Шаламберидзе М.Ш. и др. Вопросы моделирования контактной точечной сварки. /Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы сварки, металлургии и смежных технологий», 14-18 ноября, 1996. – Тбилиси, 1996.
139. Шашин Д.М., Исаев А.П. Разработка мероприятий, повышающих качество сварных соединений при конденсаторной сварке. /Сборник научных трудов МВТУ им. Н.Э.Баумана. – 1979. – С.26-28.
140. Шенк Ч. Теория инженерного эксперимента. – Москва: Мир, 1972. – 381 с.
141. Шимарев В.Г. Особенности формирования соединений при роликовой сварке разнородных и разнотолщинных сталей. /Журнал "Электротехническая промышленность. Электросварка". Вып.3. – 1970. – С.3-10.
142. Шиндовский Э.Б., Шюрц О. Статистические методы контроля производства. – Москва: Изд-во стандартов, 1969. – 544 с.
143. Шмелев В.К. Рентгеновские аппараты. – Москва: Энергия, 1973. – 325 с.
144. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. – Москва: Мир, 1970. – 370 с.

145. Подола Н. В., Руденко П.М., Гавриш В.С. Алгоритмы компенсации износа электродов при контактной точечной сварке. //Автомат. сварка. – 2005. – № 4. – С.18–23.
146. Подола Н. В., Руденко П.М., Гавриш В.С. Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами. //Автомат. сварка. – 2004. – № 6. – С.15–18.
147. Лебедев В.К., Письменный А.А Системы питания машин для контактной сварки. //Автомат. сварка. – 2001. – № 11. – С. 32–36.
148. Кривенко В.Г., Руденко П.М., Гавриш В.С. Компьютерная система управления КСУ КС 02 для контактных точечных машин. //Сварщик. – 2004. – № 3. – С.37.
149. Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. Экономико-статистические данные по сварочному производству (СВЭС-ТА-2005). – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 2005. – 87 с.
150. ფხაკაძე თ., შალამბერიძე მ., ხვადაგიანი ა. ორმხრივი მრავალწერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღების პროცესის და საშემდუღებლო ტრანსფორმატორების მიმდევრობით რეჟიმში მუშაობის ანალიზი. //საქართველოს მეცნ. ეროვნული აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო რეფერირებული ჟურნალი “მეცნიერება და ტექნოლოგიები”. – თბილისი, 2009. – № 7-9. – გვ.91-93.
151. ფხაკაძე თ., შალამბერიძე მ. მრავალწერტილოვანი კონტაქტური შედუღების დენის განსაზღვრა. //საქართველოს მეცნ. ეროვნული აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო რეფერირებული ჟურნალი “მეცნიერება და ტექნოლოგიები”. – თბილისი, 2009. – № 10-12. – გვ. 102-104.