

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აკაკი კაკაურიძე

*ელექტროწიდური გადადნობის ლუმენის არადნობადელექტროდებიანი
კრისტალიზატორის კონსტრუქციის დამუშავება და კვლევა
საშემდუღებლო საელექტროდე მასალის მიღების მიზნით*

საინჟინრო მეცნიერებებში დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად წარდგენილი

დისერტაცია

სპეციალობა: მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგია (0408)

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ემერიტუსი
პროფესორი მარლენ შალამბერიძე

თანახელმძღვანელი:

აკადემიური დოქტორი,
პროფესორი პარმენ ყიფიანი

ქუთაისი

2017

სარჩევი

შესავალი.....	4
თავი 1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის თავისებურებანი და პრობლემები.....	6
1.1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები და კრისტალიზატორის კონსტრუქციები	6
1.2. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მოდელირების საკითხები	14
1.3. კრისტალიზატორის გაგრილების პრობლემები	17
დასკვნები	23
თავი 2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე პარამეტრების გავლენა	24
2.1. ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის ფორმირების პირობები	24
2.2. დნობადი ელექტროდიდან წიდის აბაზანაში გამდნარი ლითონის გადატანის პროცესი	28
2.3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში სითბოს გამოყოფა და განაწილება.....	37
2.4. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის განსაზღვრა და მის სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა	39
2.5. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოყოფილი სითბოს გავრცელება და დანაკარგები	47
2.6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე წიდის შემადგენლობის და შევსების კოეფიციენტის გავლენა.....	49
დასკვნები	55
თავი 3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესების კვლევა.....	56
3.1. ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები და მათზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორები	60

3.2. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი	64
3.3. ელექტროწიდური გადადნობის წიდაში პოტენციალის განაწილების კვლევა მოდელის მიხედვით და მისი გავლენის ანალიზი არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესზე	68
3.4. ელექტრული ველის კვლევა მათემატიკური მოდელით.....	79
დასკვნები	85
თავი 4. ელექტროწიდური გადადნობის მასალების (საელექტროდო მავთული) გამოყენება სხვადასხვა კონსტრუქციის შედუღება-დადუღებისას	87
4.1. ცხელი (კრისტალიზაციური) ბზარები შენადულ კონსტრუქციებში	88
4.2. კვლევის მეთოდიკა	92
4.3. ნიმუშების შედუღების ტექნოლოგია	95
4.4. ნიმუშების მომზადება მეტალოგრაფიული კვლევისათვის და ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები	96
დასკვნები	106
ძირითადი დასკვნები	107
გამოყენებული ლიტერატურა	110

შესავალი

მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში აშშ, ჩინეთი, იაპონია, გერმანია, ინგლისი, რუსეთი, უკრაინა და სხვა სადაც განვითარებულია მანქანათმშენებლობა ან პერსპექტივაში გათვალისწინებულია მისი განვითარება, ფართოდ გავრცელებულია ელექტრომეტალურგიის ისეთი დარგი, როგორცაა ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა. მისი დანიშნულებაა, ჩვეულებრივი მეტალურგიული მეთოდებით მიღებული ფოლადების ხელმეორედ გადადნობა მისი სტრუქტურის, მექანიკურ და ფიზიკური თვისებების გაუმჯობესების მიზნით. ჩვენს ქვეყანაში მეტალურგიის აღნიშნული დარგის განვითარებას ემსახურება წარმოდგენილი სამუშაო, რაც განსაზღვრავს მის აქტუალობას.

ჩვენ მიერ შემოთავაზებული კრისტალიზატორი და ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა განაპირობებს ელექტრომეტალურგიის განვითარებას არა მარტო ჩვენს ქვეყანაში. მიზნად იქნა დასახული დამუშავებულიყო ახალი კრისტალიზატორის კონსტრუქცია ე.წ. არადნობადელექტროდებიანი სექციებიანი კრისტალიზატორი, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა პრაქტიკულად თავიდან ყოფილიყო აცილებული ამ პროცესისათვის დამახასიათებელი, განსაკუთრებით დიდი ფორმის კოეფიციენტის მქონე კრისტალიზატორისათვის დამახასიათებელი გადადნობის დენის დაშუნტვა, ფორმის კოეფიციენტის გაზრდის შესაძლებლობით არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში შემცირებულიყო თბური დანაკარგები, გაზრდილიყო პროცესის მარგიქმედების კოეფიციენტი, გაზრდილიყო პროცესის წარმადობა და დნობის სიჩქარე. გარდა ამისა, კრისტალიზატორში წიდის გამდნარი მდგომარეობაში შენარჩუნება შესაძლებელი ყოფილიყო მაშინაც კი, როცა კრისტალიზატორში არ მიმდინარეობს ლითონის დნობის პროცესი. შესაძლებელი ყოფილიყო როგორც ლითონური ფხვნილოვანი, ასევე არალითონური მასალის გადადნობა.

აღნიშნულიდან გამომდინარე წარმოდგენილ სამუშაოში კვლევის ამოცანებია:

- ელექტროწიდური გადადნობის მოდელირების საკითხები;

- კრისტალიზატორის გაგრილების თავისებურებანი;
- ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე, წიდის შემადგენლობის და შევსების კოეფიციენტის გავლენის კვლევა;
- სხმულის ფორმირება;
- წიდის აბაზანაში ლითონის წვეთების გადატანის პირობები;
- კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის განსაზღვრა და მის სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა;
- კრისტალიზატორის კონსტრუქციის და გადადნობის ახალი სქემის შემუშავება;
- ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელის დამუშავება;
- ელექტროწიდური გადადნობის წიდაში პოტენციალის განაწილების კვლევა, ფიზიკური მოდელის მიხედვით.
- ელექტროწიდური გადადნობის მათემატიკური მოდელის დამუშავება.
- მაგისტრალურ მილსადენებში, ელექტროწიდური გადადნობის ლითონის ელექტრორკალურ შედუღების საელექტროდო მასალად გამოყენების შესაძლებლობების კვლევა.

დისერტაციაში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნას ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის, ფოლადების ლეგირების საკითხების გადაწყვეტაში. აგრეთვე, შემუშავებული კონსტრუქცია და გადადნობის სქემა შეიძლება გამოვიყენოთ არალითონური მასალების გადამუშავებისათვის.

გადადნობით მიღებული მაღალი თვისებების ფოლადები შეიძლება გამოყენებული იქნას საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების ელექტრორკალურ შედუღებაში საელექტროდო მასალად.

თავი 1

1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის თავისებურებანი და პრობლემები

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა ელექტრომეტალურგიის ერთ-ერთი გავრცელებული მეთოდია. იგი ძირითადად გამოიყენება ფოლადების ხელმეორედ გადადნობით, მაღალხარისხოვანი ფოლადების მიღებისათვის [3,4,14,31,41]. ასეთი ფოლადების მიღების აუცილებლობა გამოიწვია მანქანათმშენებლობაში ლითონური კონსტრუქციებისადმი გაზრდილმა ტექნოლოგიურმა მოთხოვნილებებმა (ვიბრაციებისადმი მედეგობა, ცვეთამედეგობა და სხვ.). ამის გამო, ლითონების ელექტროწიდური გადადნობით მიღების აუცილებლობა, საკუთარი მრეწველობის განვითარების მიზნით, შეიქმნა ისეთ მაღალგანვითარებულ ქვეყნებში, როგორცაა: აშშ, კანადა, დიდი ბრიტანეთი, იაპონია, გერმანია, აგრეთვე, ყოფილი საბჭოთა ქვეყნები: რუსეთი, უკრაინა. საქართველოში ელექტროწიდური გადადნობის ტექნოლოგიური პროცესების კვლევა და ათვისება ხდებოდა საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მეტალურგიის სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში.

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მექანიკა-მანქანათმშენებლობის დეპარტამენტის პირველი მცდელობაა წვლილი შეიტანოს ელექტრომეტალურგიის აღნიშნული დარგის განვითარებაში მოყვანილი კვლევების მიხედვით.

1.1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები და კრისტალიზატორის კონსტრუქციები

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარი შედგება (სურ. 1.1): კვების წყაროს, კრისტალიზატორის, გადასადნობი ფოლადისაგან დამზადებული დნობადი ელექტროდის, გადამდნარი სხმულის კრისტალიზატორიდან გამოწელების მექანიზმისა და დნობადი ელექტროდის მიმწოდის მექანიზმისაგან [5,6,8,10,19].

წარმოდგენილი სახის დანადგარი გვხვდება სხვადასხვა მეტალურგიულ ქარხანაში, მაღალხარისხოვანი ფოლადების წარმოების საამქროებში. უკრაინის მეცნიერებათა აკადემიის ე. პატონის სახელობის ელექტროშედულების სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის ექსპერიმენტული ქარხანა აწარმოებს ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარს სამეცნიერო-კვლევითი მიზნებისათვის.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის კვების წყარო წარმოადგენს ძაბვის დამადაბლებელ ერთფაზა ტრანსფორმატორს ხისტი გარე მახასიათებლით. გადადნობის დენის რეგულირება შესაძლებელია ტრანსფორმატორის ხვიათა რიცხვის ცვლით, მის მეორად გრაგნილზე ძაბვის საფეხუროვანი რეგულირებით. კვების წყაროს გამომყვანი მომჭერები მიერთებულია კრისტალიზატორის ძირთან და მიმწოდ მექანიზმში ჩამაგრებულ გადასადნობ ელექტროდთან.

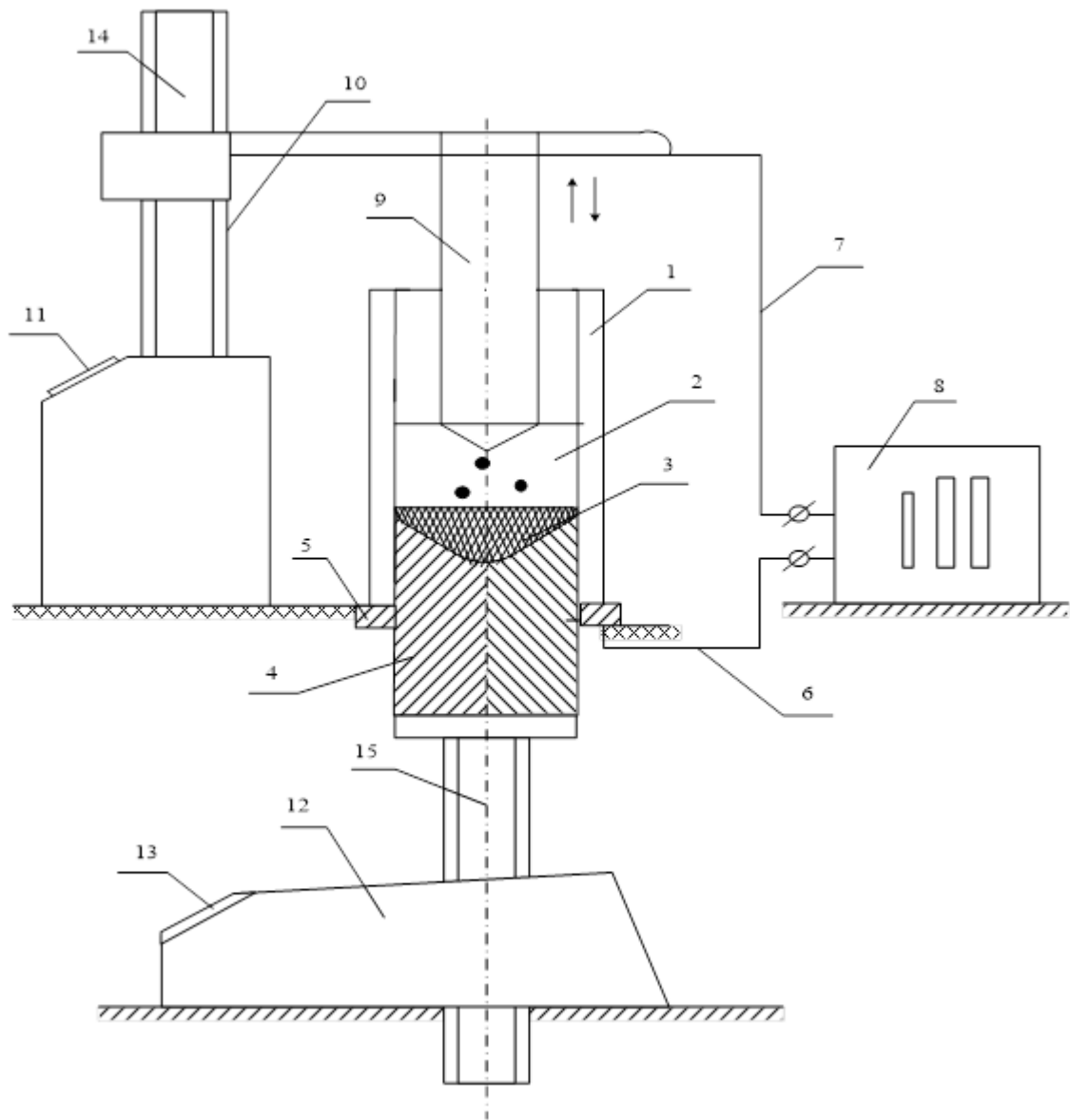
მიმწოდი მექანიზმი აწვდის გადასადნობ ელექტროდს კრისტალიზატორში, გამდნარ წიდაში, ელექტროდის გადნობის სიჩქარის შესაბამისად. ისე, რომ გამდნარი წიდის სიმაღლე ელექტროდსა და გადამდნარი ლითონის აბაზანას შორის დარჩეს უცვლელი.

სურ. 1.2-ზე წარმოდგენილია ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის ერთი დნობადელექტროდიანი სქემა, ხოლო სურ. 1.3-ზე ნაჩვენებია გადადნობა ორი ელექტროდით.

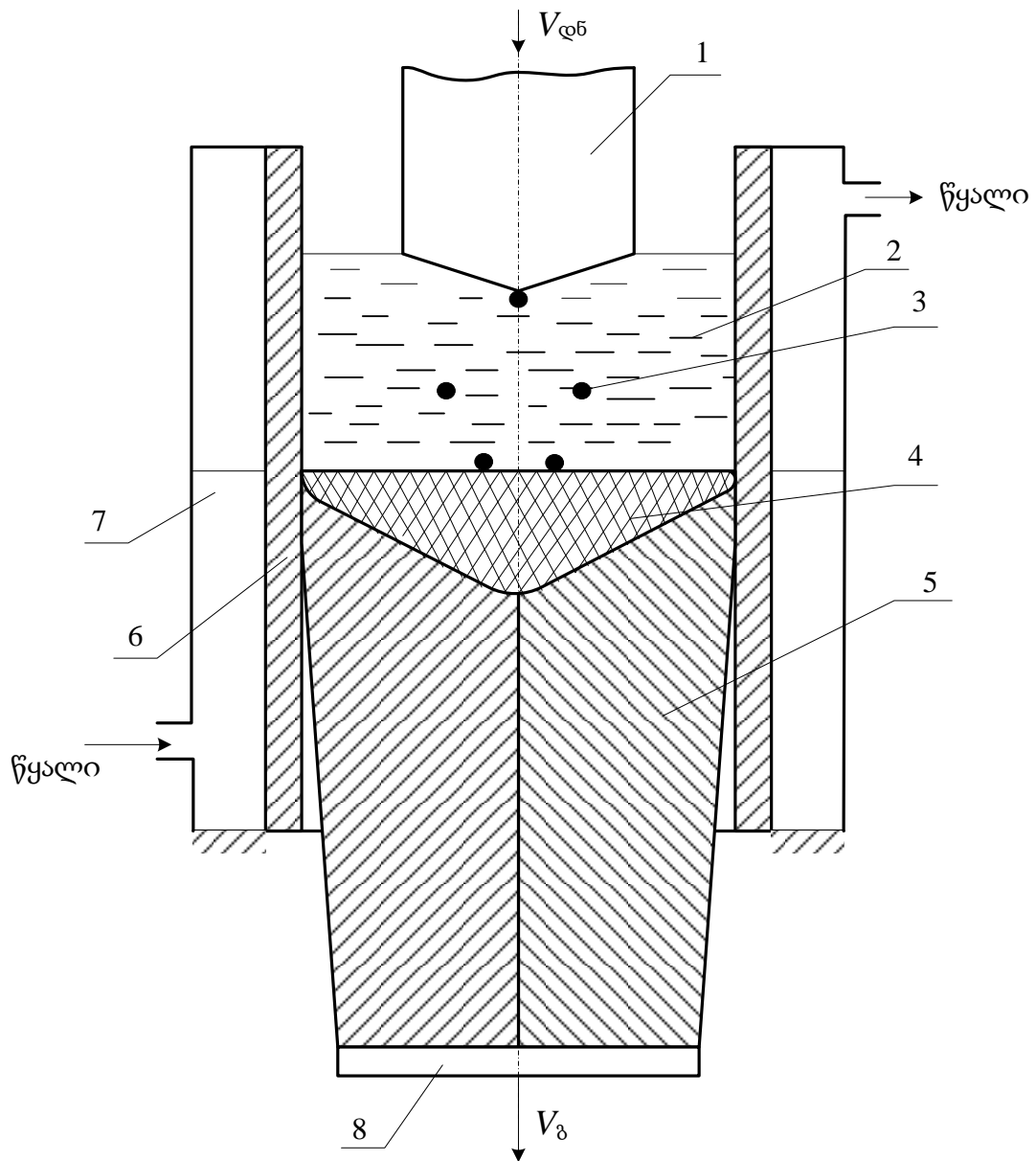
ატომური ენერგეტიკის განვითარებამ, აგრეთვე მძლავრი გენერატორების და ტურბინების შექმნის აუცილებლობამ ბოლო წლებში აქტუალური გახადა დიდი წონის და ზომის სხმულების მიღების გზების ძიება. ამ პრობლემის გადაწყვეტა მიმდინარეობს ორი მიმართულებით. პირველი მდგომარეობს გიგანტური სხმულის თუჯის ბოყვში ჩამოსხმის კლასიკური მეთოდების სრულყოფაში, მეორე მიმართულება გულისხმობს ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი მეთოდების შექმნას.

პირველ მიმართულებაში ცნობილია 400 ტ წონის სხმულის მიღება იაპონური ფირმა „Джапан стил веркс“-ს მიერ. მიუხედავად იმისა, რომ ამ ფირმის მიერ უზრუნველყოფილია სხმულის მთელ სიმაღლეზე ქიმიური შემადგენლობის

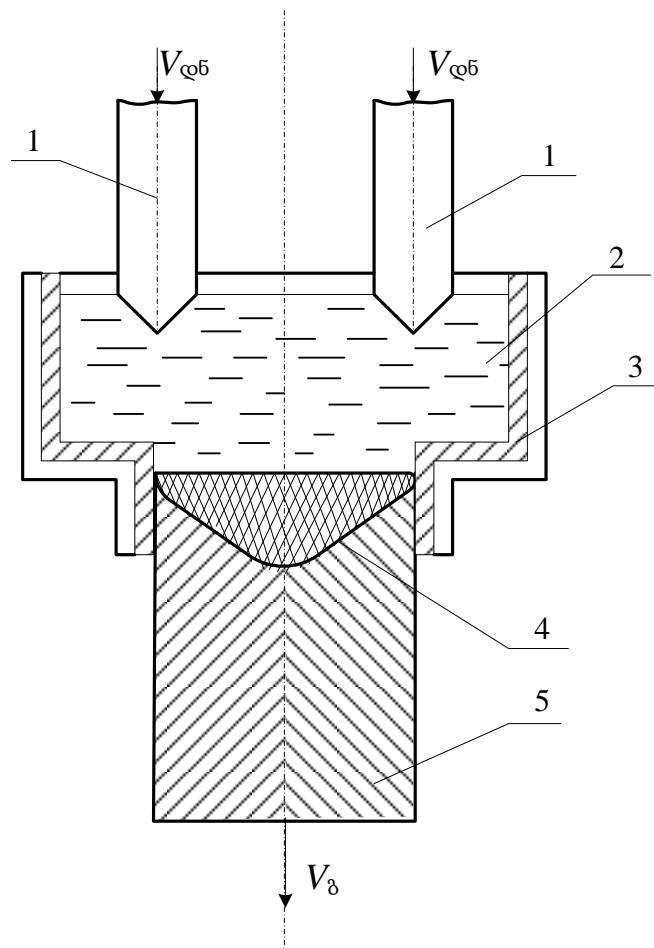
ერთგვაროვნება, იგი არაა თავისუფალი ისეთი დეფექტებისაგან, როგორცაა: ფორები, არაღერძული ლიკვაცია, არალითონური ჩანართები და სხვა. [42,43,44,45]



სურ. 1.1 ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის სქემა
 1- კრისტალიზატორი, 2- გამდნარი წიდის აბაზანა, 3 - გადამდნარი ლითონის აბაზანა, 4-მყარი სხმული; 5 - კრისტალიზატორის ძირი; 6-7 - დენმიმცვანები; 8 - კვების წყარო; 9 - დნობადი ელექტროდი; 10 - ელექტროდის მიმწოდი მექანიზმი; 11 - მიმწოდი მექანიზმის პულტი; 12 - სხმულის გამომწევი მექანიზმი; 13 - სხმულის გამომწევი მექანიზმის პულტი; 14-15 - მიმწოდი და გამოწევის მექანიზმების ხრახნები.

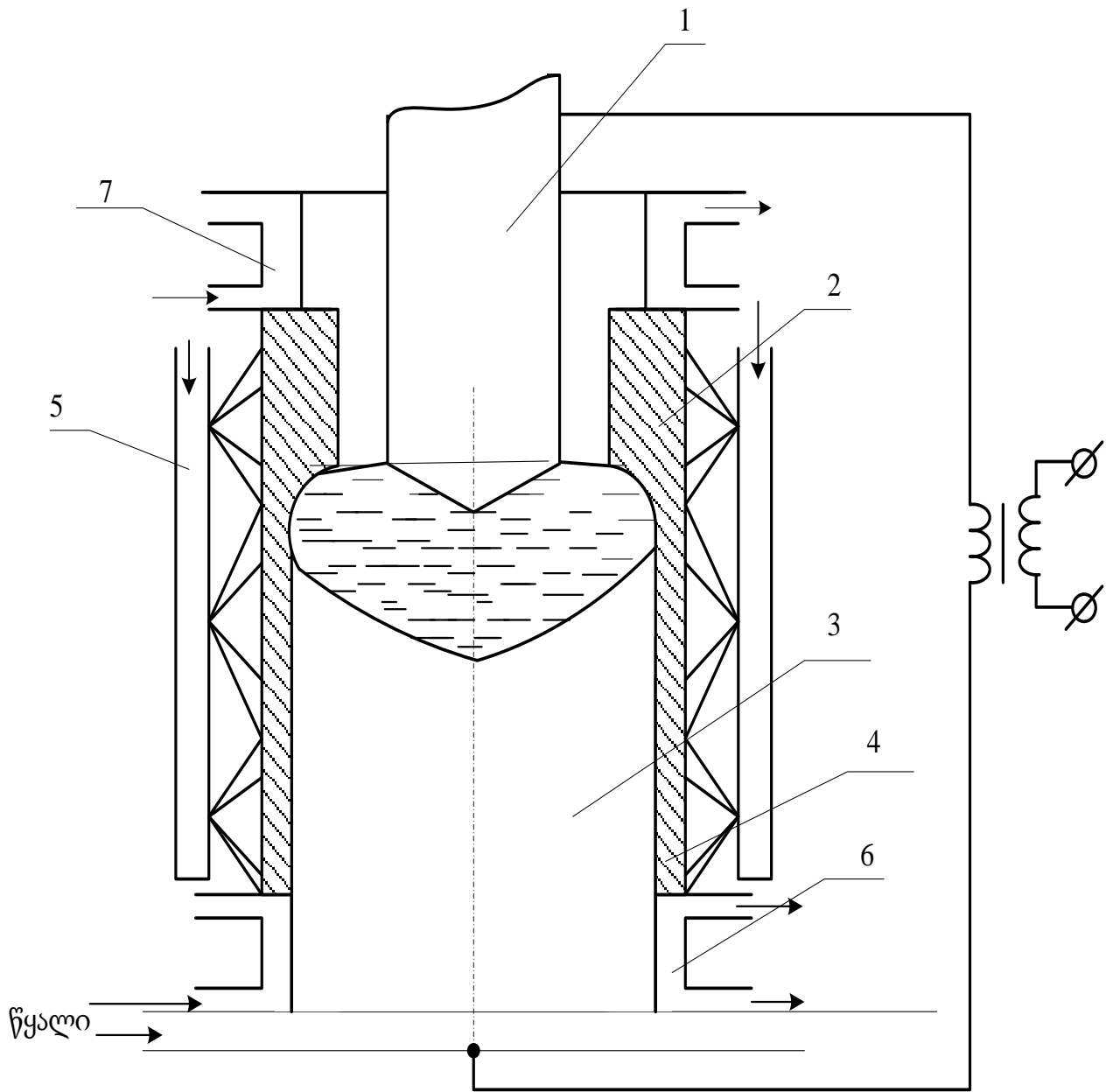


სურ. 1.2 ელექტროწილური გადადნობის სქემა ერთი დნობადი ელექტროდით
 1– დნობადი ელექტროდი; 2– თხევადი წიდა; 3– თხევადი ლითონის წვეთები;
 4– ლითონის აბაზანა; 5– სხმული; 6– წიდის ქერქი; 7– კრისტალიზატორი;
 $V_{დნ}$ – დნობადი ელექტროდის წიდის აბაზანაში მიწოდების სიჩქარე;
 $V_{გ}$ – სხმულის გამოწევის სიჩქარე; 8 – ძირი.

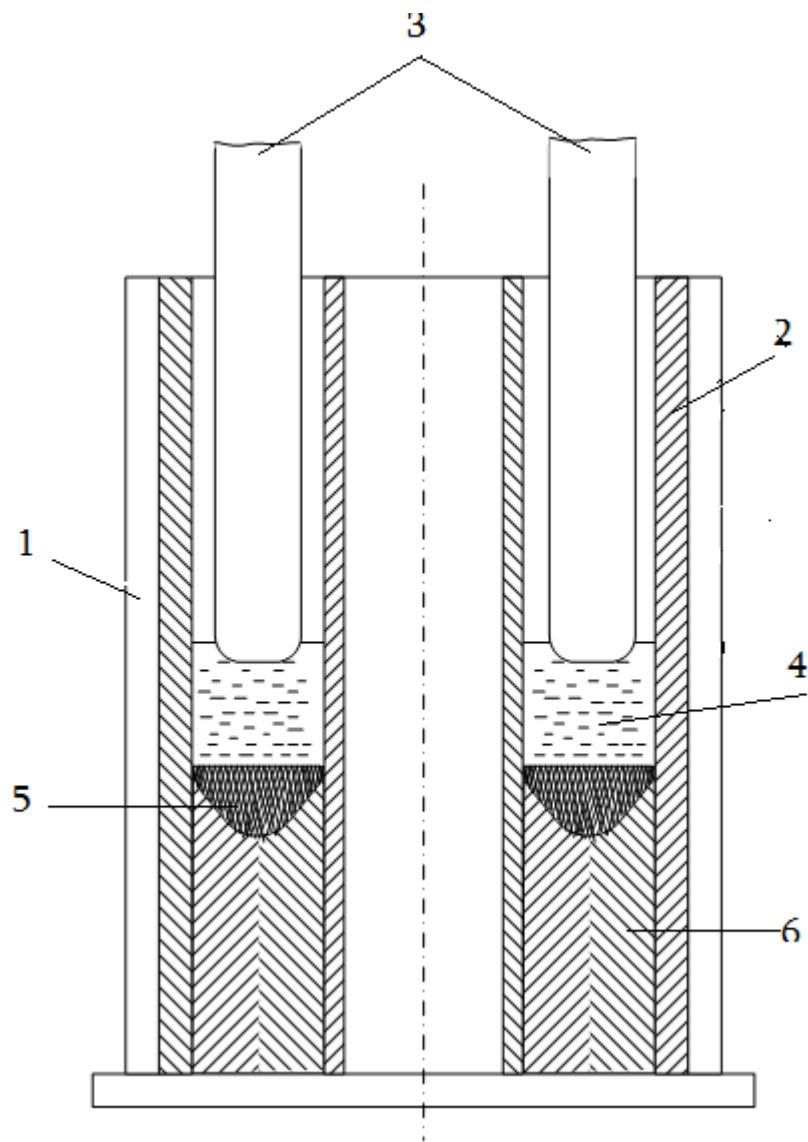


სურ. 1.3 ელექტროქიმიური გადადნობის სქემა ორი დნობადი ელექტროდით

1-დნობადი ელექტროდი; 2-წიდის აბაზანა; 3-კრისტალიზატორი; 4- ლითონის აბაზანა; 5- სხმული; $V_{გ}$ - სხმულის გამოწვევის სიჩქარე; $V_{დნ}$ - ელექტროდის მიწოდების სიჩქარე.



სურ. 1.4 დნობადი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობის სქემა
 1-დნობადი ელექტროდი; 2 - დნობადი კრისტალიზატორი; 3- ელექტროწიდური
 გადადნობის სხმული; 4 - დნობადი კრისტალიზატორის არადნობადი ნაწილი;
 5 - სხმულის გარე ზედაპირის გაგრილების სისტემა; 6,7 - ქვედა და ზედა არადნობადი
 კრისტალიზატორი.



სურ. 1.5 ელექტროქიმიური გადადნობის სქემა ღრუ სხმულის მისაღებად,
 უძრავი გარე და შიგა კრისტალიზატორებით.

1- უძრავი გარე კრისტალიზატორი; 2 - შიგა კრისტალიზატორი; 3 - დნობადი ელექტროდი; 4 - თხევადი წიდა; 5- თხევადი ლითონის აბაზანა; 6 - სხმული.

ზემდამე სხმულების მიღების ერთ–ერთი მეთოდის დროს ხდება დნობადი ელექტროდის ელექტროწიდური გადადნობა დნობად კრისტალიზატორში (სურ. 1.4). დნობადი კრისტალიზატორად გამოყენებულია ღრუ ელექტროწიდური სხმული ან ღრუ ნამზადი, გამოჭედილი ელექტროწიდური სხმულისაგან. ამ მეთოდის დროს დნობადი ელექტროდი (1), დნება დნობად კრისტალიზატორში (2), კრისტალიზატორის კედლის გადნობის სიღრმის რეგულირება ხდება ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმის პარამეტრების და კრისტალიზატორის გარე ზედაპირის გაგრილების ინტენსიობის ცვლით. დნობადი ელექტროდის და კრისტალიზატორი დნობადი ნაწილის ლითონით ფორმირდება სხმული (3), რომელიც გარედან გრილდება კრისტალიზატორის არადნობადი ნაწილით (4). დნობადი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის წონა შეიძლება გაზრდილი იქნას 3–4–ჯერ, ჩვეულებრივ კრისტალიზატორში დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდურ გადადნობასთან შედარებით. აღსანიშნავია, რომ კრისტალიზატორის ჩადნობადი ნაწილის კედელში დაგროვილი სითბოს ხარჯზე მნიშვნელოვნად იზრდება სითბოს სასარგებლო გამოყენების კოეფიციენტი დიდი ზომის სხმულის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებისას და ამის გამო შესაძლებელია გადადნობისათვის საჭირო ელექტრული ენერჯის შემცირება.

დნობადი კრისტალიზატორით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას შესაძლებელია სხმულის სტრუქტურის გაუმჯობესება, ჩვეულებრივ კრისტალიზატორში, მიღებული დიდი წონის სხმულის სტრუქტურასთან შედარებით. სურ. 1.5-ზე ნაჩვენებია ღრუ სხმულის მისაღები ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის სქემა.

1.2. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მოდელირების საკითხები

უკრაინელი მეცნიერების: ბ.ე. პატონი, ბ.ი. მედოვარი. გ.ა. ბოიკო და სხვათა მიერ დამუშავებული იქნა დნობადი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მათემატიკური მოდელი ლითონური აბაზანის სიღრმის, კრისტალიზატორის გადნობის ზონის ხანგრძლივობის და სხმულის ზედაპირის ტემპერატურის რეგულირებისათვის [6,14,16]. ეს მოდელი სამართლიანია პროცესისათვის, რომლის დროსაც ხდება 100–150 ტონამდე წონის სხმულის მიღება. ელექტროწიდური გამოდნობისას სხმულის ტემპერატურული ველის მათემატიკურ მოდელს აქვს სახე:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C\rho T + \kappa \rho h(T, T_s, T_\infty)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right), \quad (1)$$

სადაც $0 < r < R_2$, როცა $0 < Z < S(t)$; $R_1 < r < R_2$, როცა $S(t) < Z < H$; $T(r, Z, T)$ – ტემპერატურა, $^{\circ}\text{C}$;

λ, C, ρ – თბოგამტარობა, სითბოტევადობა და სხმულის სიმკვრივე;

R_1 და R_2 , – დნობადი კრისტალიზატორის შიგა და გარე კედლის რადიუსებია;

$S(t)$ – კრისტალიზატორში თხევადი ლითონის დონეა;

H – კრისტალიზატორის (იგივე სხმულის) სიმაღლეა.

$$\eta(T, T_3, T_\infty) = \begin{cases} 1, & T > T_\infty \\ e(T), & T_3 \leq T \leq T_\infty; e(T) = \frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} \end{cases}, \quad (2)$$

მათემატიკური მოდელის შესაბამისი მათემატიკური გამოსახულების ამოხსნისას სასაზღვრო პირობები ასახავენ შესაბამის უბანზე თბომიმოცვლის თავისებურებებს და აქვს სახე:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

- სხმულის ტემპერატურული ველის ღერძის მიმართ სიმეტრიულობის სასაზღვრო პირობაა;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_1 (T - T_{cp}) + \varepsilon \sigma T^4 (R_r, Z, t), \quad (4)$$

- სხმულის კედლების გარემომცველ გარემოსთან თბომიმოცვლის პირობა;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 (Z, t), \quad S(t) < Z < h(t), \quad (5)$$

α_1 - თბოგადაცემის კოეფიციენტი;

T - სხმულის ზედაპირის ტემპერატურა,

T_{cp} - სხმულის გარემომცველი გარემოს ტემპერატურა;

სითბოს ნაკადის განმსაზღვრელი სასაზღვრო პირობა, რომელიც მიმართულია წიდიდან კრისტალიზატორის კედლისაკენ;

$h(t)$ - წიდის დონე კრისტალიზატორში.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \psi \varepsilon \sigma [T^4 (R, Z, t) - T_1^4], \quad h(t) < Z < H, \quad (6)$$

კრისტალიზატორის შიგა კედლის გახურების პირობა აბაზანიდან გამოსხივების გზით

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = a_n (T - T_B), \quad (7)$$

სხმულის ძირის გაგრილების პირობა

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=S(t)} = q(r, t) + CM(r, t)(T_z - T), \quad (8)$$

სხმულის თბომემცველობის პირობა

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=H} = a_z (T - T_{cp}), \quad (9)$$

ტემპერატურული მდგომარეობის პირობა კრისტალიზატორის კვეთში. სიდიდე $M(r, t)$ შეირჩევა შემდეგი თანაფარდობიდან

$$Z\sigma \int_0^{R_K} M(r, t) r dr = G(t),$$

სადაც $G(t)$ - გადადნობის პროცესის მწარმოებლობაა;

R_K - გამდნარი წვეთის ვარდნის ზონის რადიუსია.

მოდელი (1) – (9) გამოყენებულია ტემპერატურული ველის გამოთვლისათვის გამომთვლელი მანქანის გამოყენებით. იგი საშუალებას იძლევა გადადნობის პროცესის და გაგრილების რეჟიმის შესაბამისად განსაზღვრული იქნას: ლითონის აბაზანის სიღრმე, დნობადი კრისტალიზატორის დნობის სიგანე, კრისტალიზატორის გარე კედლის ტემპერატურა.

კრისტალიზატორის კონსტრუქციის წარმოდგენელი ვარიანტი ყველაზე ახლოსაა ჩვენ მიერ შემოთავაზებულ ახალ კონსტრუქციასთან. მისი გამოკვლევა მიზანშეწონილია მათემატიკური მოდელის საშუალებით, ამიტომ ასე დაწვრილებით იქნა განხილული ავტორების მიერ დამუშავებული მათემატიკური მოდელი. ხშირ შემთხვევაში კრისტალიზატორი წარმოადგენს წყლით გაგრილების ორმაგი კედლის მქონე ცილინდრულ სხმულს, რომელიც დამზადებულია სპილენძისაგან. შიგა ცილინდრის შიგა ზედაპირს გააჩნია კონუსობა, რომ გაადვილებული იყოს გადამდნარი სხმულის კრისტალიზატორიდან გამოწევა.

კრისტალიზატორის შიგა და გარე ცილინდრის დამზადება ხდება შესაბამისი დიამეტრის მქონე სპილენძის მილისაგან.

ლითონების თანამედროვე ელექტროწიდური ტექნოლოგიებს (გადადნობა, ჩამოსხმა, რაფინირება, შედუღება, დადუღება) საფუძვლად უდევს ელექტროწიდური შედუღების პროცესი, რომელიც ორმოციანი წლების დასასრულსა და ორმოცდაათიანი წლების დასაწყისში დამუშავებული იქნა უკრაინის მეცნიერებათა აკადემიის ე. პატონის სახელობის ელექტროშედუღების ინსტიტუტში.

სამოცდაათიანი წლებიდან ელექტროწიდური პროცესი ფართოდ გამოიყენება მეტალურგიულ მრეწველობაში, როგორც ლითონური მასალების სისუფთავის და ხარისხის ამაღლების მაღალეფექტური საშუალება [16,17,24,32,69].

1.3. კრისტალიზატორის გაგრილების პრობლემები

ლითონების ელექტროწიდურ გადადნობას ხშირად ადარებენ ლითონების ვაკუუმურ ელექტრორკალურ გადადნობას, რაც გამოწვეულია იმით, რომ გადამდნარი ლითონის კრისტალიზაციის სქემა ორივე შემთხვევაში ერთნაირია. ამის გამო, ხშირ შემთხვევაში ერთნაირია კრისტალიზატორის კონსტრუქციაც [18,24,36,37].

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ძირითად თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ შესაძლებელია კრისტალიზაციის პარამეტრების კონტროლის მაღალი ხარისხი. ელექტროწიდური გადადნობისას თბური პროცესის მართვა შესაძლებელს ხდის ვიმოქმედოთ თბურ გრადიენტზე G და გადამდნარი ლითონის კრისტალიზაციის ν სიჩქარეზე. ცნობილია, რომ კრისტალიზაციის სტრუქტურა უშუალოდ განისაზღვრება ფაზური დიაგრამის მახასიათებლებით, რომელშიც შედის შენადნობის გამყარების დიაპაზონი FR .

კრისტალიზატორი და მისი გარემომცველი გარემო მოქმედებს თბურ პარამეტრებზე G და V . ამიტომ კრისტალიზატორისათვის მთავარია თბომიმოცვლის ფაქტორები. კრისტალიზატორის კედლის ტემპერატურული მდგომარეობა დამოკიდებულია გამოყოფილ Q_i და Q_a ართმეულ სითბოზე. როცა კრისტალიზატორს გააჩნია მაღალი თბოტევადობა და თბოგამტარობა, კრისტალიზატორის კედლისათვის დამახასიათებელია მაღალი ტემპერატურული გრადიენტი, რომელიც უზრუნველყოფს კრისტალიზაციის მაღალ ხარისხს, მისი მიმართულება შეიძლება ვმართოთ თბოართმევის Q_a მართვის საფუძველზე. ფაქტიურად, Q_a შედგება: აბაზანის ზედაპირიდან თბური დანაკარგებისაგან, რომელიც გამოსხივდება აბაზანის ზედაპირიდან და გადაეცემა კრისტალიზატორის კედელს, გარემომცველ გარემოს და ელექტროდს; აგრეთვე, მას მიეკუთვნება ართმეული სითბო, წიდის აბაზანიდან გამაგრილებელი წყლის დანაკარგები, რომელიც გამოწვეულია ლითონური აბაზანიდან სითბოს გადაცემით გამაგრილებელ წყალზე; დამყარებული სხმულის ზედაპირისაგან გამაგრილებელი წყლით ართმეული სითბო; კრისტალიზატორის ძირის გაგრილებით განპირობებული თბური დანაკარგები. აღნიშნულიდან გამომდინარე,

კრისტალიზატორის როლი მიღებული სხმულის სტრუქტურის ფორმირებასა და მის ღირებულებაში არსებითია.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარებში (ღუმელებში) გვხვდება სამი სახის კრისტალიზატორები: უძრავი კრისტალიზატორები, მოძრავი (გადაადგილებადი) კრისტალიზატორები, კრისტალიზატორები სხმულის გამოწნეხვით. დნობის პროცესში ელექტროდის შეცვლა ყველა შემთხვევაში დაკავშირებულია გადადნობის პროცესის ნაწილობრივ შეჩერებასთან.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის კრისტალიზატორის დამუშავება და კონსტრუირება საჭიროებს მეცნიერების და ტექნიკის ყველა დარგის ცოდნას.

სხმულის საბოლოო ღირებულების მინიმიზაციის მიზნით აუცილებელია კრისტალიზატორების კონსტრუირებისას მრავალი პარამეტრის ოპტიმიზაცია [21,28,35,64].

ამრიგად, ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარში კრისტალიზატორის ძირითადი ფუნქციაა წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს ართმევა. კრისტალიზატორის საექსპლოატაციო პარამეტრებია: წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ელექტროსიმძლავრე, კრისტალიზატორის დიამეტრი, მიღებული სხმულის სიმაღლე, გადამდნარი მასალის თვისებები, წიდის თვისებები, კრისტალიზატორის და ძირის ფორმა, პროცესის დაწყების სქემა (ცივი და თხევადი სტარტი). კრისტალიზატორის როგორც ლითონკონსტრუქციის მახასიათებლებია: გაგრილების სისტემის გარსაცმის სიმტკიცე და კონსტრუქცია, გამაგრილებელი არხების განლაგება, ფორმა და ზომები; კრისტალიზატორის მასალა (სუფთა სპილენძი, შენადნობი, კომპოზიციური კედელი და სხვა), მუშა კედლის სისქე, კრისტალიზატორის კვეთი, ფიზიკური, ქიმიური და მეტალურგიული თვისებები.

კრისტალიზატორის პარამეტრებთან ერთად მნიშვნელოვანია გაგრილების სისტემის პარამეტრები. გაგრილებისათვის გამოყენებულია წყალი. იგი უნდა იყოს სუფთა. მინარევების არსებობის შემთხვევაში მარილების დალექვა ხდება კრისტალიზატორის კედელზე, რომელიც ქმნის თბურ ბარიერს, რაც იწვევს კრისტალიზატორის სპილენძის კედლის მუშა ტემპერატურის გაზრდას. ეს თავის მხრივ, ასუსტებს კრისტალიზატორის

კედლის ფიზიკურ სიმტკიცეს და საბოლოო ჯამში შეიძლება მიგვიყვანოს კრისტალიზატორის კედლის ნადები ფენის მნიშვნელოვნად გაზრდამდე; შედეგად მცირდება კრისტალიზატორის მოხმარების ხანგრძლიობა.

კრისტალიზატორის შიგა კედლებზე სხვადასხვა მარილოვანი დანალექისაგან გაწმენდის ორი ხერხია გავრცელებული, ე.წ. მექანიკური დამუშავების და ქიმიური დამუშავების. მექანიკური დამუშავებით კრისტალიზატორის შიგა კედლის ზედაპირების გაწმენდა მეტად შრომატევადია. ამიტომ უფრო ხშირად მიმართავენ ე.წ. ქიმიურ ხერხს. ამ შემთხვევაში კრისტალიზატორში შეყავთ ქიმიკატები, ამ დროს აუცილებელია ყურადღება მიექცეს, არ განვითარდეს კედლის ზედაპირზე კოროზიის კერები ან მან გავლენა არ იქონიოს კრისტალიზატორის თბოგამტარობაზე.

აღნიშნულის გამო, დაცული უნდა იქნას რეკომენდაციები და საცნობარო მასალები კრისტალიზატორის კედლების გაწმენდისათვის ხსნარის მომზადებისას.

კრისტალიზატორის გაგრილების სისტემის პარამეტრებია: წყლის დინების სიჩქარე, გაგრილების სისტემის მოცულობა, წყლის სიჩქარე გაგრილების სისტემის სხვადასხვა წერტილში, სისტემაში წნევის ვარდნა. კრისტალიზატორის სხვადასხვა უბანია: წიდის აბაზანიდან გამოსხივებით კრისტალიზატორის კედლის გაცხელების უბანი, გამდნარი წიდის შესაბამისი უბანი, გამდნარი ლითონის აბაზანის მომცველი უბანი, ლითონური აბაზანის შემდეგი სხმულის მომცველი უბანი. მათ შორის კრისტალის კედლის თბოდაძაბული ნაწილები გრილდება წყლით, რომელიც მიყვანილია დუდილის მდგომარეობამდე, ე.წ. ბუმტუკებიან დუდილამდე. ამ დროს უზრუნველყოფილია კონვექციით სითბოს მაქსიმალური ართმევა. გაგრილების ამ სტაბილური რეჟიმის როგორც ქვემოთ, ასევე ზემოთ არ გვექნება ეფექტური გაგრილება; რეჟიმის გაძლიერების შემთხვევაში იზრდება წყალში ბუმტუკების რიცხვი, რაც გამოიწვევს ორთქლის თბოიზოლაციის ფენის წარმოქმნას. რომელმაც თავისთავად შეიძლება გამოიწვიოს კრისტალიზატორის კედლის ადგილობრივი დნობა ან ლითონისა და წიდის აბაზანების ზედაპირებზე არასტაბილურობა, რაც უარყოფითად აისახება სხმულის სტრუქტურასა და სხვა ფიზიკურ თვისებებზე.

ელექტროწიდური გადადნობისას, როცა გამოყენებულია მოძრავი კრისტალიზატორები, რომლისაგანაც გამოიწნეება სხმული, ტემპერატურა შენარჩუნებულია მუდმივი სიდიდის. ტემპერატურის ციკლურ ცვლას მიმართავენ მხოლოდ ელექტროდების გამოცვლის პროცესში.

უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის მთელ პროცესში თბური ციკლი უცვლელია. შესაძლებელია აგებული იქნას დამოკიდებულება კრისტალიზატორში გამავალი წყლის სიჩქარესა და თბურ ნაკადს შორის, რომელიც მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია კრისტალიზატორის ზომებზე (სურ. 1.6).

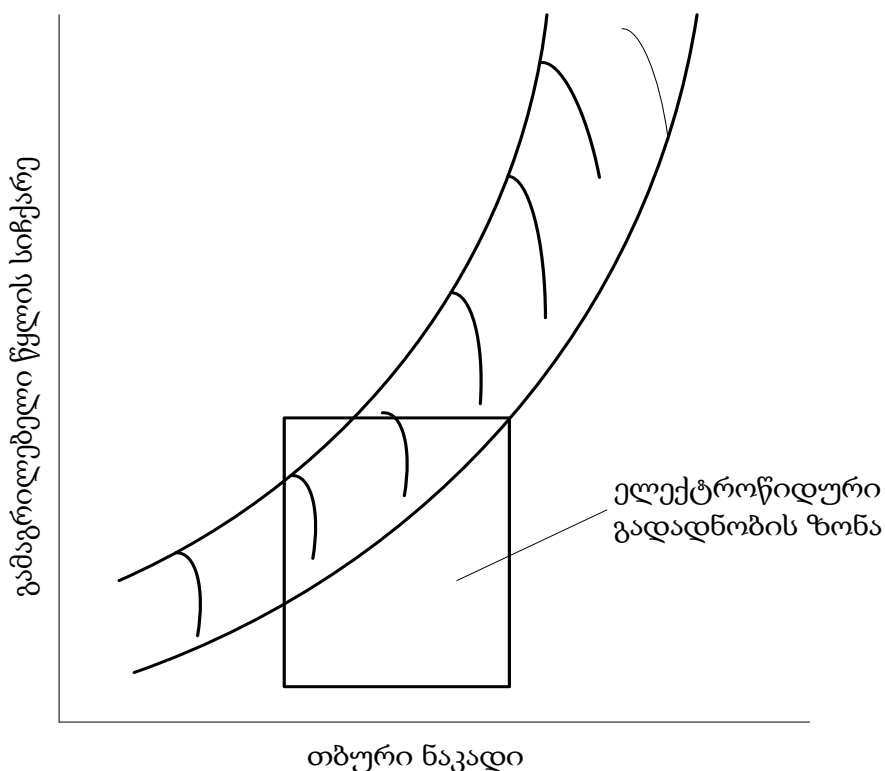
კრისტალიზატორის კვეთის ფართი დამოკიდებულია ტექნოლოგიურ მოთხოვნებზე და ისინი მუშაობენ ძირითადად წყლის გაგრილების სიჩქარის $0,9 \div 5,5$ მ/წმ ცვლილების დიაპაზონში.

კრისტალიზატორის გაგრილების სისტემის დაპროექტება იწყება გაგრილების სისტემაში წყლის მიწოდების სიჩქარის მიხედვით. ამის შემდეგ დაპროექტებას აგრძელებენ დანარჩენი პარამეტრების განსაზღვრით [21,28,33,35,64].

გამაგრილებელი წყალი კრისტალიზატორს მიეწოდება დნობის დაწყებიდან და სხმულის კრისტალიზაციის ყველა ეტაპზე, თუმცა პროცესის სხვადასხვა ოპერაციაზე მისი სიჩქარე შეიძლება იყოს სხვადასხვა. ამ სიჩქარის სწორ დაგეგმვაზე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული კონკრეტული დნობის პროცესის ეკონომიკური მაჩვენებლები.

კრისტალიზატორის კონსტრუირებისას გასათვალისწინებელია მრავალი ფაქტორი, რომლებიც არსებითად მოქმედებენ ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე. მათ შორის ერთ-ერთი მთავარია გადადნობის პროცესში გამოყოფილი სითბო და მისი წყარო, წიდა. გადადნობის პროცესში გამოყოფილი სითბო Q_i მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული გამდნარი წიდის წინააღმდეგობაზე. იგი დამოკიდებულია წიდის შემადგენლობაზე. ელექტროწიდური გადადნობისათვის გამოყენებული წიდა შეიცავს: 50-80% CaF_2 , 15-30% CaO , 0-5% MgO , 10-15% Al_2O_3 და მცირე დანამატებს, რომლებიც საჭიროა მოცემული ფოლადის მისაღებად. CaF_2 ამ შემადგენლობიდან განსაზღვრავს

წიდის თხევადდენადობას; CaO იწვევს გადადნობისას ლითონის დესულფურაციას; MgO და Al₂O₃ ოქსიდების შემცველობა განსაზღვრავს წიდის წინაღობის სიდიდეს.



სურ. 1.6. ელექტროწიდური გადადნობისას გამაგრლებელი წყლის სიჩქარისა და თბურ ნაკადს შორის დამოკიდებულების სქემა

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა შეიძლება განხორციელდეს როგორც ცვლად, ასევე მუდმივ დენზე. მუდმივი დენი შეიძლება წიდის გახურებისათვის იქნას გამოყენებული როგორც პირდაპირი, ასევე უკუპოლარობით. კრისტალიზატორი შეიძლება იყოს ნეიტრალური ან დენგამტარი. ამ უკანასკნელის შემთხვევაში კრისტალიზატორის ძირი დამიწებულია. ამასთანავე შეერთების ელექტრული სქემა შეიძლება იყოს მრავალნაირი, რაც მნიშვნელოვნად მოქმედებს კრისტალიზატორში გადადნობის პროცესში დენის განაწილებაზე. მასზეა დამოკიდებული წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა Q_i . იდეალურ შემთხვევაში კრისტალიზატორში გამოყოფილი სითბო უნდა მოხმარდეს ლითონის გადადნობის საჭირო წარმადობის უზრუნველყოფას და აბაზანის საჭირო კონფიგურაციის მიღებას. თუ გადავადნობთ

უფრო გადამეტებულ დიდ სიმძლავრეზე, მაშინ მიიღება სხმული ზედაპირული და სტრუქტურული დეფექტებით. აღნიშნული თავიდან იქნება აცილებული, თუ კრისტალიზატორის სწორი კონსტრუირებისას ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში დაცული იქნება საჭირო თანაფარდობა Q_a და Q_i სითბოს შორის.

კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის არსი მოცემულია ნახ. 1.1-ზე. მოყვანილი ილუსტრაციის მიხედვით, წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს მოქმედებით დნობადი ელექტროდი დნება და თხევადი ლითონი წვეთების სახით გაივლის რა წიდის აბაზანას, გადაიტანება გამდნარი ლითონის აბაზანაში. ელექტროწიდური გადადნობის დამყარებული რეჟიმის შემთხვევაში დროის ნებისმიერ მომენტში გადამდნარი და დამყარებული ლითონის მოცულობა ერთმანეთის ტოლია. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა ხდება წყლით გაგრილების კრისტალიზატორში. ელექტროდის დნობის სიჩქარის შესაბამისად აწვდიან წიდის აბაზანას [7,22,24,51].

სპეციალური შემადგენლობის თხევად წიდასთან გადამდნარი ლითონის წვეთების შეხებისას იგი სუფთავდება არასასურველი მინარევებისაგან (მაგ. გოგირდი, ფოსფორი და სხვ), აირებისაგან ე.ი. განიცდის რაფინირებას. გარდა ამისა, იძულებითი გაგრილების გამო, ფორმირდება ღერძის გასწვრივ მიმართული მიკროსტრუქტურის მქონე სხმული. ყოველივე აღნიშნულის გამო, მიღებული სხმული ხასიათდება ფიზიკური და ქიმიური ერთგვაროვნების მაღალი ხარისხით, რაც მიუღწეველია მეტალურგიული წარმოების კლასიკური სქემის მიხედვით. ყოველივე აღნიშნულმა, განაპირობა მთელ მსოფლიოში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის გამოყენება სხვადასხვა შენადნობის ფართო ასორტიმენტის მისაღებად [7,17,22,24,51].

წარმოდგენილი დადებითი თვისებების მიუხედავად, აღსანიშნავია, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ორჯერ მეტი ელექტროენერგია იხარჯება, ვიდრე იმავე მოცულობის ლითონის გამოდნობისას ფოლადსადნობ ჩვეულებრივ ელექტროლუმელებში. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ ლითონის ელექტროწიდური გადადნობა ხდება წყლით გაგრილების კრისტალიზატორში, სადაც ხდება გამოყოფილი სითბოს დიდი ნაწილის ართმევა წიდის აბაზანიდან.

დასკვნები

1. ნებისმიერი სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები არის გადამწყვეტი სხმულის საჭირო სტრუქტურის, შემადგენლობის და ხარისხის უზრუნველყოფისათვის;
2. ელექტროწიდური გადადნობის იდეალურ შემთხვევაში კრისტალიზატორში გამოყოფილი სითბო უნდა მოხმარდეს ლითონის საჭირო წარმადობის უზრუნველყოფას და აბაზანის საჭირო კონფიგურაციის მიღებას;
3. თუ ელექტროწიდურ გადადნობას ვაწარმოებთ გადამეტებულ დიდ ან მცირე სიმძლავრეებზე, ვიდრე იგი საჭიროა მოცემული წარმადობისათვის, მაშინ მიიღება სხმული ზედაპირული და სტრუქტურული დეფექტებით;
4. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორის სწორი კონსტრუირებისას და ექსპლუატაციის პროცესში დაცული უნდა იქნას საჭირო თანაფარდობა წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და კრისტალიზატორიდან ართმეული სითბოს შორის.
5. თუ კრისტალიზატორი იქნებოდა არადნობადი ზედა და ქვედა დამოუკიდებელი სექციებით, თითოეულ მათგანს ექნებოდა გაგრილების დამოუკიდებელი სისტემა, მაშინ გაადვილებული იქნება გამოყოფილ და ართმეულ სითბოს შორის საჭირო თანაფარდობის დამყარება.

თავი 2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე პარამეტრების გავლენა

2.1. ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის ფორმირების პირობები

გადამდნარი ლითონი, წვეთების სახით გაივლის წიდის აბაზანას, გროვდება კრისტალიზატორის ქვედა ნაწილში და წარმოქმნის ელექტროწიდურ სხმულს, კრისტალიზატორის კედლიდან გაგრილების სისტემის მიერ სითბოს ართმევის შედეგად ხდება თხევადი ლითონის ნაწილობრივი კრისტალიზაცია, ხოლო მისი ზედა ნაწილი მუდმივად თხევად მდგომარეობაშია და წარმოქმნის ე.წ. ლითონის აბაზანას. ლითონის აბაზანა შემოფარგლულია ქვევიდან და გვერდებიდან გამყარებული ლითონით, ხოლო ზემოდან შემოფარგლულია თხევადი წიდის აბაზანით. ლითონური აბაზანის მოცულობა იცვლება და იგი დამოკიდებულია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის რეჟიმსა და გამაგრილებელი ზედაპირების მდებარეობაზე [17,23,51,58].

ელექტროწიდური გადადნობის ოპტიმალურ პირობებში ლითონურ აბაზანას აქვს ცილინდრული ფორმა, რომელიც ზემოდან ამოზნექილია (სურ. 2.1.).

ლითონური აბაზანის ცილინდრულ ნაწილში მყოფ თხევად ლითონსა და წიდის ქერქს შორის მუდმივად იმყოფება თხევადი წიდის შრე (2), რაც განპირობებულია იმით, რომ წიდის ქერქის ზედაპირის ტემპერატურასა და ლითონის დნობის ტემპერატურას შორის სხვაობა 100°C -ზე მეტია. წიდის შრის (2) სისქე დამოკიდებულია წიდის და ლითონის სიმკვრივეთა სხვაობაზე, ლითონის ბოძის სიმაღლეს და ლითონისა და წიდას შორის ადგეზიის სიდიდეზე.

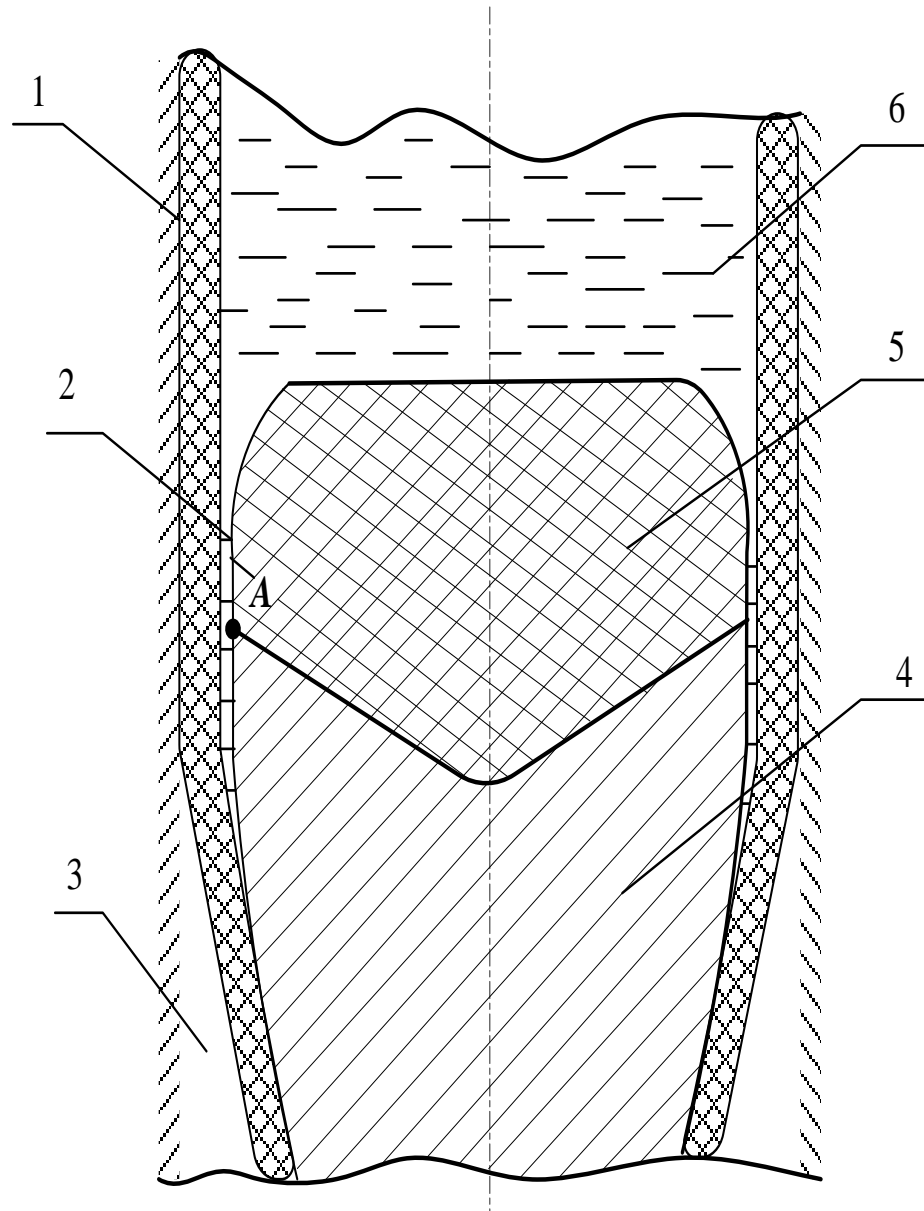
თხევადი ფენის სისქე მიახლოებით შეიძლება გამოითვალოს ფორმულით

$$\delta_{\text{შრ}} = \frac{\xi}{n(\gamma_{\text{ლ}} - \gamma_{\text{წ}})g},$$

სადაც ξ - წიდისა და ლითონს შორის ადგეზიაა $\xi = \sigma_{\text{ლ}} + \sigma_{\text{წ}} - \sigma_{\text{ლ.წ.}}$;

n - წიდის და ლითონის ცილინდრის სიმაღლე;

g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება.



სურ. 2.1. ლითონური აბაზანის ცილინდრული ზონის კრისტალიზატორის კედელთან კონტაქტის სქემა

1- წიდის ქერქი; 2- თხევადი წიდის ფენა; 3 - საჰაერო ღრეჩო; 4 - გამყარებული სხმული; 5 - თხევადი ლითონი; 6 - თხევადი წიდა.

მოყვანილი ფორმულით გამოთვლები აჩვენებს, რომ წიდის თხევადი ფენის სისქე წიდისა და ლითონის გამყოფი დონიდან 20, 30 და 40 მმ-ზე შესაბამისად დაახლოებით ტოლია 1 მმ, 0,66 მმ, 0,5 მმ.

თუ მივიღებთ, რომ თხევადი ფენის (2) თბოგამტარობა ტოლია წიდის ქერქის (1) თბოგამტარობის, მაშინ თბური ნაკადისათვის $1 \cdot 10^6$ კკალ/მ²-სთ, რაც დამახასიათებელია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესისათვის, თხევადი წიდის 0,5 მმ სისქეზე ტემპერატურული ვარდნა შეადგენს 200-250°C, რაც სრულიად საკმარისია იმისათვის, რომ ამ ზონაში შეწყდეს გამდნარი ლითონის კრისტალიზაციის პროცესი. გამდნარი წიდისა და ლითონის გამყოფი ზედაპირიდან დაშორებასთან ერთად თხევადი ფენის (2) ტემპერატურა მცირდება და იწყება გამდნარი ლითონის კრისტალიზაცია (სურ, 2.1. წერტილი A). პირველად წარმოიქმნება ქერქი, შემდეგ კი იწყება ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის სხმულის ზედაპირული ფენის წარმოქმნა. ე.ი. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში სხმული ფორმირდება ქერქის შიგა ზედაპირზე, თხევადი წიდის ფენაზე (2). ამის გამო, სხმულის ზედაპირის ხარისხი დამოკიდებულია წიდის ქერქის შიგა ზედაპირის პროფილზე, მისი სისქის სტაბილურობაზე, ასევე ქერქის უნარზე წინააღმდეგობა გაუწიოს მის მსხვრევას სხვადასხვა ძალის მოქმედებისას.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას მოძრავ კრისტალიზატორში მიღებულ სხმულს გააჩნია უსწორმასწორო ზედაპირი, ე.წ. დაგოფრილი ზედაპირი. ამ შემთხვევაში გამწვანებულია კრისტალიზატორის გადაადგილება გამდნარი წიდისა და ლითონის აბაზანასთან ერთად ლითონის დნობის სიჩქარის შესაბამისად უკვე გამყარებული სხმულის მიმართ. ამის გამო, სასურველია მიღებულ სხმულს ჰქონდეს სწორი ზედაპირი, ე. წ. სარკისებური ზედაპირი. აღნიშნული დეფექტის წარმოქმნის მიზეზი შეიძლება იყოს წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს მკვეთრი შემცირება დნობადი ელექტროდის გამოცვლისას ან მცირე დიამეტრის მქონე დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მიმდინარეობა; რადგანაც ეს უკანასკნელი დაკავშირებულია კრისტალიზატორის კედელთან ტემპერატურის შემცირებასთან.

სხმულის ზედაპირზე გოფრების სახის დეფექტის წარმოქმნის მექანიზმი შეიძლება იყოს შემდეგი [7].

ლითონის აბაზანა - წიდას გამყოფ ზედაპირზე, რომელსაც აქვს ამოზნექილი ფორმა, გამდნარი ლითონის ჩაღვრისას, გადაადგილდება კრისტალიზატორის კედლის მიმართ $u_{\text{ზრ}}$, რომელიც განსაზღვრავს ელექტროწიდური გადადნობის წარმადობას (სურ. 2.2). ამ დროს სხმულის კრისტალიზაციის ფრონტი გადაადგილდება α კუთხით სხმულის ზედაპირის გადაადგილების მიმართ $u_{\text{ფ}}$ სიჩქარით. $u_{\text{ფ}}$ სიჩქარე განისაზღვრება გამყოფ ზედაპირზე მიყვანილი სითბოს, მისგან ართმეული სითბოსთან შეფარდებით. α კუთხის დახრა დამოკიდებულია მაქსიმალური თბოართმევის მიმართულებაზე.

შეფარდება

$$\frac{u_{\text{ზრ}}}{u_{\text{ფ}}} \cos \alpha = \xi_{\text{ც}},$$

ახასიათებს ლითონური აბაზანის ცილინდრული ნაწილის სიმაღლის (h) ცვლილებას. როცა $\xi_{\text{ც}} = 1$, ლითონური აბაზანის ცილინდრული ნაწილის სიჩქარე უცვლელია. თუ $\xi_{\text{ც}} > 1$, მაშინ აბაზანის h სიმაღლე იზრდება, იზრდება აგრეთვე ლითონურ-აბაზანის მოცულობა. ეს შესაძლებელია სითბოს ართმევის შესუსტებით, რაც შეიძლება დაკავშირებული იყოს სხმულის სიმაღლის გაზრდასთან და ამით კრისტალიზატორის გაგრილებადი ძირიდან გამყოფი ზედაპირის დაშორების გამო.

როცა $\xi_{\text{ც}} < 1$, ლითონური აბაზანის ცილინდრული ნაწილის სიმაღლე მცირდება. მსგავს შემთხვევაში ადგილი აქვს წიდას აბაზანაში გამოყოფილი თბური სიმძლავრის ვარდნას.

თუ ელექტროწიდური გადადნობისას ლითონური აბაზანას აქვს ცილინდრული ნაწილი, მაშინ სხმული ფორმირდება ყოველგვარი ზედაპირული დეფექტების გარეშე.

როცა $\xi_{\text{ც}} < 1$, გადადნობილი სხმულის ფორმირების სიჩქარის მნიშვნელოვანი შემცირების გამო ლითონური აბაზანის ცილინდრული ნაწილი ქრება. ლითონური აბაზანის კრისტალიზაცია ხდება სხმულის არა მარტო ვერტიკალურ, არამედ ჰორიზონტალურ ზედაპირზე (სურ. 2.2 ა და სურ. 2.2 ბ).

კრისტალიზაციის ფრონტის სხმულის ზედაპირთან გადაკვეთის A წერტილის დაშორებით კრისტალიზატორის კედლისაგან μ_3 მცირდება. ამის მიზეზია თხევადი ლითონის აბაზანა - კრისტალიზატორის კედელთან თერმული წინაღობის გაზრდა. შესაბამისად, ξ_6 იზრდება მნიშვნელობამდე $\xi_6=1$., და A წერტილი არ გადაადგილდება სხმულის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე. შესაბამისად, ჩამოყალიბდება ახალი აპკი (სურ. 2.3), რომელიც იწყება გამყარებადი ლითონის წიბურებიდან. ეს აპკი არ კრისტალიზდება, რადგანაც იგი შორს არის გაგრილების მქონე კრისტალიზატორის კედლიდან. თავის მხრივ, ახლად წარმოქმნილი აპკი ახდენს ეკრანირებას წიდის აბაზანის ფენის, რომელიც იმყოფება გამყარებულ ლითონსა და წიდის ქერქს შორის. ეს ხელს უწყობს სწრაფ კრისტალიზაციას და ეს გამოიწვევს ქერქის სისქის გაზრდას. ახალი გამდნარი ლითონის მიწოდების ახალი დოზის აპკის ფაზათ შორის დამაბულობას არ შეუძლია გამდნარი ლითონის დაჭერა ადრე გამყარებული ქერქთან და იქმნება პირობები სხმულზე გოფირებული ზედაპირის ფორმირებისათვის. აღწერილი პროცესი მეორდება მანამ, სანამ არ იქნება უზრუნველყოფილი ლითონური აბაზანა ცილინდრული ნაწილით [9,39,56,59].

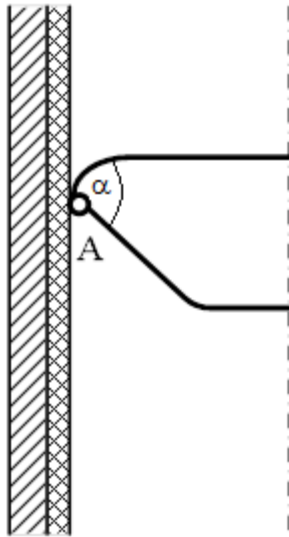
2.2. დნობადი ელექტროდიდან წიდის აბაზაში გამდნარი ლითონის გადატანის პროცესი

ელექტროდის დნობისას გამდნარი ლითონი ელექტროდის ტორსზე ჩაედინება და ზედაპირული დაჭიმულობის ძალით $F_{\text{წ}}$ გროვდება კონუსის წვერზე წვეთის სახით (სურ. 2.3). ამ წვეთზე მოქმედებს სიმძიმის ძალა F_g და ელექტროდინამიკური ძალა $F_{\text{ედ}}$, აგრეთვე ხახუნის ძალა F_A . გამდნარი ლითონის ახალი პორციის მიმატებით წვეთი იზრდება. მოქმედი ძალების შედეგად წვეთი წყდება ელექტროდს და ჩაიღვრება გამდნარ წიდაში.

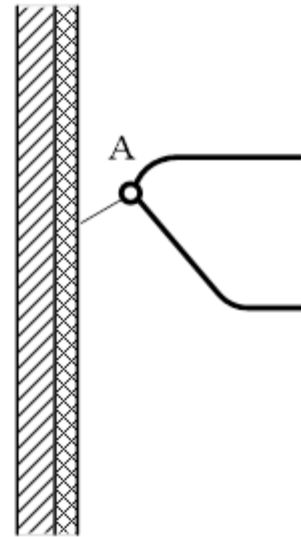
დნობადი ელექტროდის ტორსიდან გამდნარი წვეთის მოწყვეტის პროცესის კვლევისათვის სარგებლობენ დნობადი ელექტროდით და ალუმინისაგან დამზადებულ

კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესების რენტგენის სხივით გაშუქებით. ამ მიზნით, გამოყენებულია აგრეთვე, ე.წ. გამჭვირვალე მოდელით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის კვლევა. ამ მეთოდებით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე დაკვირვებით გამოვლენილია, რომ წვეთის ზრდასთან ერთად მასა და ელექტროდის ტორს შორის წარმოიქმნება თხევადი ზღუდარა. ხშირად ელექტროდიდან წვეთის მოწყვეტასთან ერთად წარმოიქმნება უფრო მცირე დამატებითი წვეთი, რომელიც ელექტროდინამიკური ძალების მოქმედებით გადაისროლება შორს დნობადი ელექტროდიდან. წვეთის წარმოქმნის სიხშირე და მისი ზომები დამოკიდებულია დენის სიდიდესა და სახეობაზე.

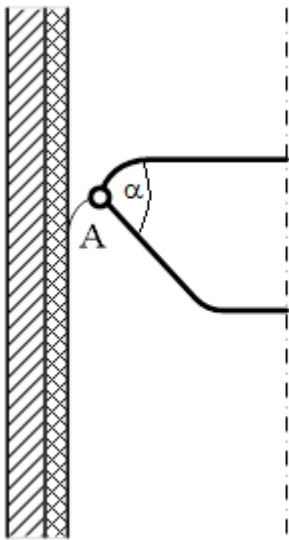
დადგენილია, რომ ყველაზე მსხვილი წვეთები წარმოიქმნებიან ცვლად დენზე ელექტროწიდური გადადნობისას. მნიშვნელოვნად წვრილი წვეთები წარმოიქმნება მუდმივ, არაპირდაპირ პოლარობაზე ელექტროწიდური გადადნობისას. დენის და ძაბვის გაზრდით წვეთის მოწყვეტის სიხშირე იზრდება, ხოლო ზომები მცირდება (სურ. 2.4.). ეს აიხსნება გადადნობის პროცესის წარმადობის და ელექტროდინამიური ძალების გაზრდით და კაპილარული ძალის შემცირებით [53]. ამავე მიზეზით აიხსნება წვეთების რიცხვის გაზრდა და მათი მასის შემცირება წიდის აბაზანის სიმაღლის (სურ. 2.5.) შემცირებით [53,57,61]. წიდის შემადგენლობა მოქმედებს, აგრეთვე წვეთის წარმოქმნის პროცესის სიჩქარეზე. ასე მაგალითად, წიდის შემადგენლობაზე ალუმინის დამატებით დაბალ ნახშირბადიანი ფოლადის გადადნობისას იწვევს წვეთის წარმოქმნის სიჩქარის შემცირებას. ამასთანავე წვეთის წარმოქმნის ძველი სიჩქარე (ალუმინის დამატებამდე) სწრაფად აღდგება. მაღალნახშირბადიანი და ლეგირებული ფოლადების გადადნობისას, წიდაზე ალუმინის დამატება წვეთის წარმოქმნის სიჩქარეზე გავლენას არ ახდენს. ეს გამოწვეულია იმით, რომ წიდაზე ალუმინის დამატებისას, გადასადნობ ლითონსა და წიდას შორის ფაზათშორისი ზედაპირული დაჭიმულობა მოქმედებს.



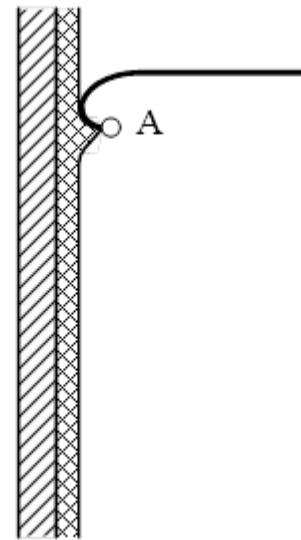
ა)



ბ)



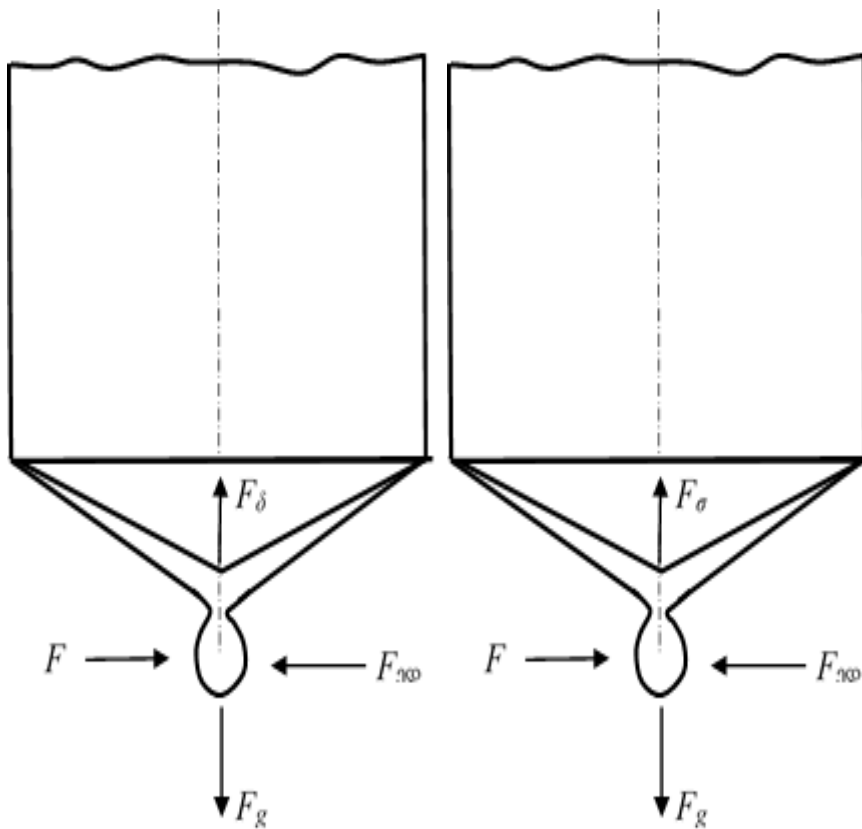
გ)



დ)

სურ. 2.2. ელექტროწიდური გადადნობის სხმულზე გოფირებული ზედაპირის ფორმირების სქემა

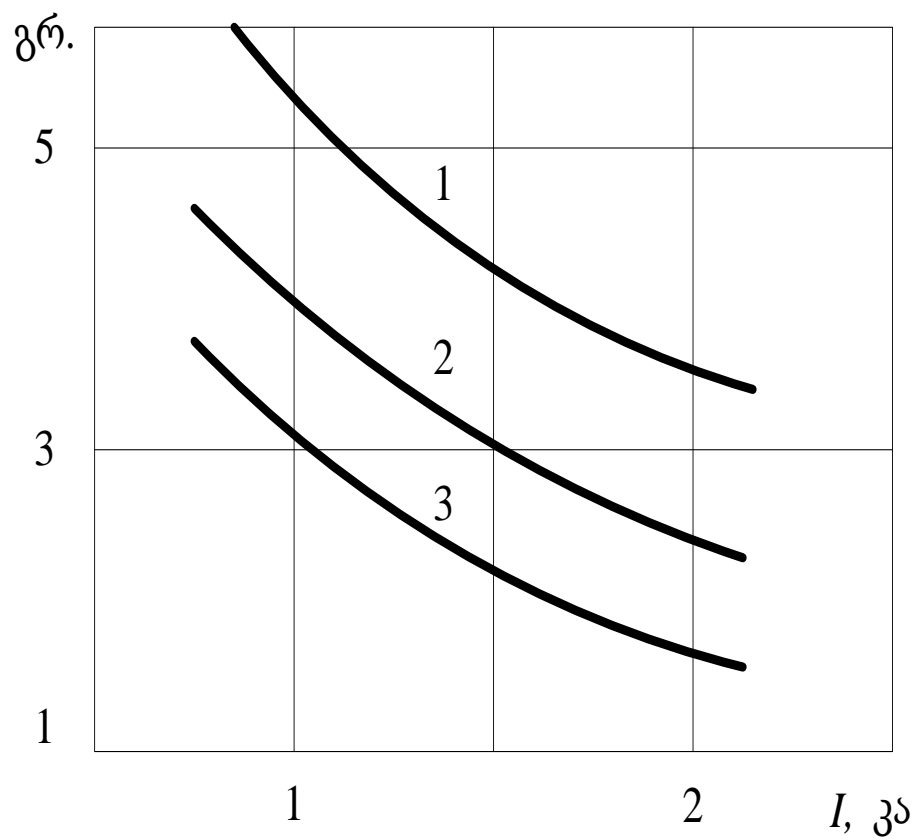
ა, ბ, გ, დ - სხმულის ფორმირების ეტაპები.



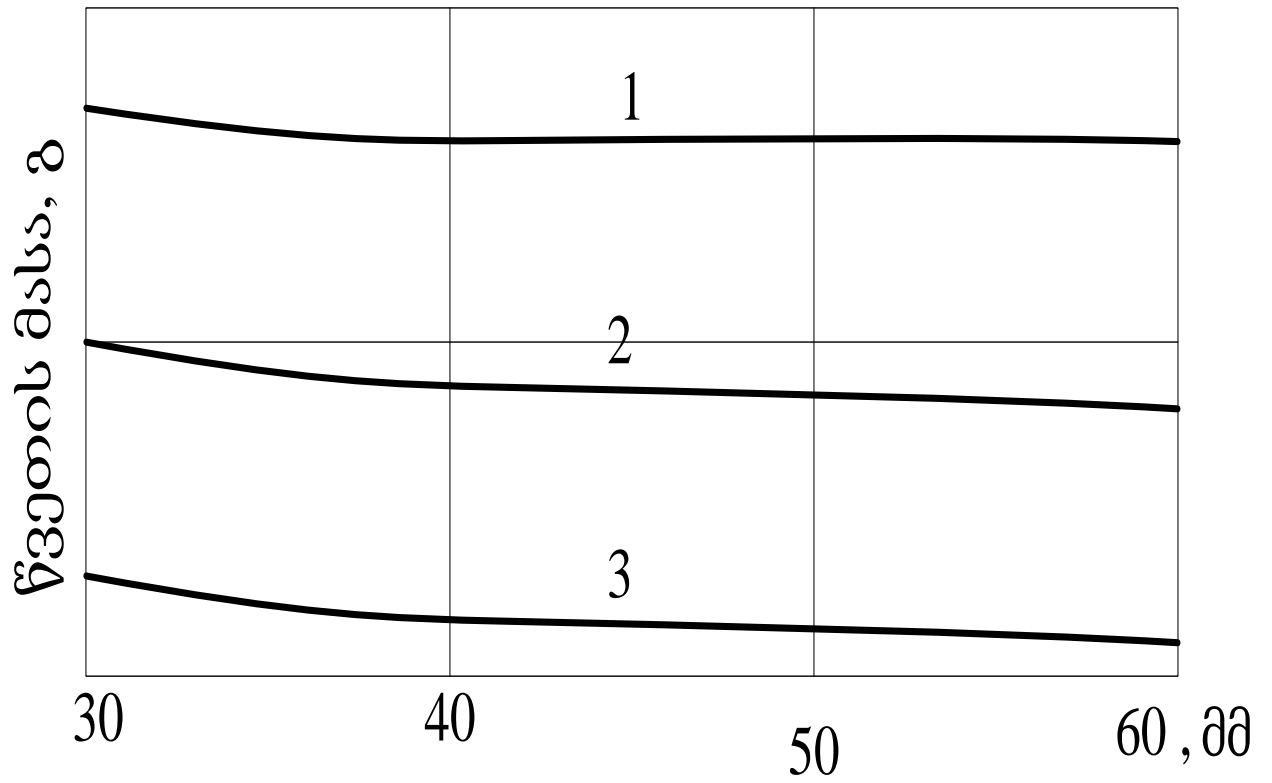
სურ. 2.3. ელექტროდზე წარმოქმნილ წვეთზე მოქმედი ძალები ელექტროწიდური გადადნობისას.

F_A - წვეთზე მოქმედი ხახუნის ძალა; F_g - სიმძიმის ძალა;

$F_{\text{ელ}}$ - ელექტროდინამიური ძალა; F_σ - ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა.



სურ. 2.4. ელექტროდიდან მოწყვეტილი წვეთის მასის დამოკიდებულება დენის სიდიდეზე, სხვადასხვა დიამეტრის ელექტროდებზე 1 - =60 მმ; 2 - =40 მმ; 3 - =30მმ.



სურ. 2.5. წვეთის მასის დამოკიდებულება წილის აბაზანის სიმაღლისაგან სხვადასხვა მანძილზე: 1 - 31 გ; 2 - 41 გ; 3 - 48 გ.

გამდნარი წვეთის ზომებზე გავლენას ახდენს სხვადასხვა შემაშფოთებელი ფაქტორი. ასეთი ფაქტორებია ელექტროდის ვიბრაცია და ელექტროდზე და წვეთზე ელექტრომაგნიტური ველით ელექტროდინამიკური მოქმედება, რომელიც გამოიხატება წვეთის დაწვრილმანებაში. განსაკუთრებით ეფექტურია ელექტროდის განივ მოქმედი მაგნიტური ველი. იგივე ეფექტს ახდენს წვეთის ზომებზე გადადნობისას წიდის აბაზანის ელექტროდის მიმართ ბრუნვა. გადადნობისას წვეთის ზომების შემცირება ზრდის მისი წიდასთან ურთიერთქმედების დროს, რაც დადებითად აისახება გადამდნარი ლითონის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. გამოკვლევებისათვის გამოიყენება გამჭვირვალე მოდელი. გადასადნობი ელექტროდის გადადნობის პროცესისას ლითონის წვეთების დაქუცმაცება იწვევს განგოგირდების პროცესის ინტენსიობის გაზრდას, რის შედეგადაც გოგირდის შემცველობა გადამდნარ სხმულში ინტენსიური განგოგირდების გამო ამცირებს 4-5-ჯერ.

მოწყვეტისას წვეთის ზომები დამოკიდებულია გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრზე. ელექტროდის დიამეტრის გაზრდით იზრდება წვეთის ზომები. რაც აიხსნება შემდეგნაირად: გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრის გაზრდით სუსტდება წვეთზე მოქმედი ელექტროდინამიკური ძალების გავლენა. ამის მიზეზია ელექტროდის ტორსულ სიბრტყესა და ლითონის აბაზანაში გამავალი ე.წ. გადადნობის ძირითადი დენის შემცირება. რაც გამოწვეულია იმით, რომ იზრდება ელექტროდისა და კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს შორის გამავალი დენი. ე.წ. დაშუნტვის დენი. ყოველივე აღნიშნულის გათვალისწინებით იანგარიშება წვეთის საორიენტაციო დიამეტრი [15,40].

წვეთის ზედაპირის პარამეტრების დამაკავშირებელ დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე

$$\frac{1}{R_K} + \frac{\sin \varphi_K}{x} = \frac{2}{b} + \frac{g(\gamma_M - \gamma_{III})}{\sigma} Z, \quad (2.1.)$$

სადაც $R_K = [1 + (Z')^2]^{3/2} / Z''$ - წვეთის სიმრუდის მთავარი რადიუსი;

$x / \sin \varphi_K$ - არაწრფივობის მთავარი რადიუსი;

$$\varphi_K = Z' / [1 + (Z')^2]^{1/2}$$

b - მრუდობის რადიუსი 0 წერტილზე.

2.1-ს გამარტივებული გამოსახულება მოცულობის გათვალისწინებით:

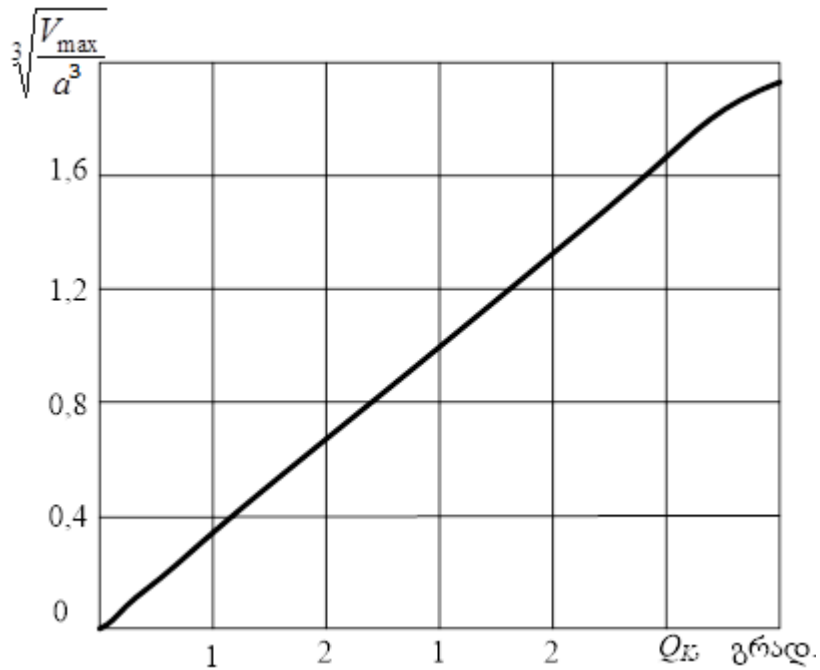
$$V_{\max} = C(Q_K) \left(\sqrt{\frac{2\sigma}{g(\gamma_M - \gamma_{III})}} \right)^3, \quad (2.2.)$$

$C(Q_K)$ - ფუნქცია, როცა $0 \leq Q_K \leq 130^0$ წრფივია და აიღება სურ. 2.6-ის მიხედვით.

თუ ჩავთვლით, რომ წვეთს აქვს სფეროს ფორმა, მაშინ

$$d_K = 1,75 \sqrt[3]{C(Q_K)} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\gamma_M - \gamma_{III})}}, \quad (2.3.)$$

ამ უკანასკნელის გამოსათვლელად არმკო-რკინისაგან დამზადებული ელექტროდის გადანობისას მონაცემები მოყვანილია ცხრ. 2.1-ში და ცხრ. 2.2-ში. მათი მონაცემების მიხედვით გათვლილი წვეთის დიამეტრი $d_{\text{წ}} \approx 5,4$ მმ.



სურ. 2.6. ფუნქციის $\sqrt[3]{\frac{V_{\max}}{a^3}}$ დამოკიდებულება Q_K კუთხეზე

მცირე დიამეტრის ელექტროდის გადადნობისას იზრდება წვეთის მოწყვეტის სიხშირე და გამდნარი ლითონი წიდის გავლით უწყვეტ ნაკადად გადადის გამდნარი ლითონის აბაზანაში. ასეთი პროცესი პრაქტიკულად შეიძლება დაფიქსირდეს გამჭვირვალე მოდელში ვუდას ელექტროდის გადადნობისას [57]. უწყვეტ ნაკადზე დამატებითი გარეგანი ელექტროდინამიკური ძალების მოქმედებისას ან უწყვეტი ნაკადის გავლისას მზრუნავი წიდის იმიტატორში ადგილი აქვს ნაკადის კვეთის ფართის შემცირებას და ამავე დროს იწყება მისი რხევითი მოძრაობები, რაც იწვევს უწყვეტი ნაკადის მცირე ზომის წვეთების სახით დაქუცმაცებას.

ცხრილი 2.1.

წიდების ქიმიური შემადგენლობა და სიმტკიცე, ფაზათშორისი დაძაბულობა
(არმკო რკინა, 1600°C)

№	ქიმიური შემადგენლობა, %					ρ, მ/სმ ³	Q, გრად.	σ _{M.III}	σ _{III}
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂				
1	58,0	20,0	5,0	10,0	7,0	2,76	52,5	1,140	0,423
2	55,3	19,0	9,5	9,5	6,7	2,72	53	1,145	0,415
3	52,7	18,2	13,7	9,1	6,4	2,75	52,5	1,138	0,429
4	50,4	17,4	17,4	8,7	6,1	2,75	53,0	1,150	0,423
5	55,3	19,0	4,8	9,5	11,5	2,76	51,5	1,138	0,410
6	54,2	18,7	4,7	9,3	13,1	2,75	51,0	1,140	0,400
7	52,7	18,2	4,6	9,1	15,5	2,72	49,0	1,130	0,395

ზოგიერთი ფოლადების ფაზათშორისი ძაბვა ფოლადის და ფლიუსის საზღვარზე

№	ფლიუსის შემადგენლობა	X20H77T210	X20H80T10	X15H970	OX18C8T	IIIХ-15
1	95% CaF ₂ 5% CaO	1,230	1,300	1,315	1,15	-
2	74% CaF ₂ 26% CaO	1,250	1,300	1,350	1,200	-
3	52% CaF ₂ 21% CaO 27% Al ₂ O ₃	1,300	1,380	1,530	1,310	
4	65% CaF ₂ 12% SiO ₂ 6% MgO 10% Al ₂ O ₃ 7% CaO	1,350	1,430	1,500	1,380	-
5	20% CaF ₂ 47% CaO 20% SiO ₂ 10% MgO					1,220

2.3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში სითბოს გამოყოფა და განაწილება

ლითონის გასადნობად საჭირო სითბო ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოიყოფა უშუალოდ ელექტროწიდური გადადნობის ღუმელის კრისტალიზატორში, თხევად ელექტროგამტარი წიდის მოცულობაში ე.წ. წიდის აბაზანაში, მასში დენის გავლით. გამოკვლევები აჩვენებს, რომ ელექტროწიდური გადადნობის სტაბილურ რეჟიმზე წიდაში გამავალი დენი და წიდის აბაზანაზე მოდებული ძაბვა სინუსოიდურია და ფაზით ემთხვევიან ერთმანეთს, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ გამდნარი წიდის აბაზანას აქვს სუფთა აქტიური წინაღობა [2,70,71,72,73].

წიდის აბაზანის ომური წინაღობა დამოკიდებულია წიდის შემადგენლობაზე, მის ტემპერატურაზე და დნობადი ელექტროდის მდებარეობაზე წიდის აბაზანაში, აგრეთვე

მისი დენის წყაროსთან მიერთების სქემაზე. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში დენის ნაწილი გადის ელექტროდოვან წიდის გავლით კრისტალიზატორის კედელში. წიდის აბაზანაში დენის განაწილების ხასიათი დამოკიდებულია მასში დენის გავლის გზის წინაღობაზე უბნებზე: დნობადი ელექტროდი - კრისტალიზატორის კედელი; დნობადი ელექტროდი - ლითონის აბაზანა (სურ. 2.7).

გადადნობის სრული დენიდან $I_{სრ}$ კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენი $I_{კრ}$ დამოკიდებულია დნობადი ელექტროდისა და კრისტალიზატორის შიგა კედელს შორის ღრეჩოს სიდიდეზე $L_{გ}$, კერძოდ, მის ფარდობაზე დნობად ელექტროდის ტორეცსა და ლითონის აბაზანას შორის მანძილზე e ,

$$I_{კრ} = 0,34 \frac{L_{გ}}{e} I_{სრ}, \quad (2.4)$$

გამოკვლევები აჩვენებს, რომ განსაკუთრებულ შემთხვევებში კრისტალიზატორში გამავალი დენი $I_{კრ}$ შეიძლება შეადგენდეს $I_{სრ}$ სრული დენის 90%-ს. ზოგჯერ $I_{კრ}$ -ს კრისტალიზატორის კედელში გამავალ დენს დაშუნტვის დენს უწოდებენ, რადგანაც კედელში გავლისას პრაქტიკულად იგი ლითონის გადნობისათვის საჭირო სითბოს არ გამოყოფს.

სითბოს გამოყოფს $I_{რ}$ დენი ელექტროდისა და ლითონის აბაზანას შორის წიდის არეში გავლისას. სრული დენი

$$I_{სრ} = I_{რ} + I_{კრ}, \quad (2.5)$$

კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის $I_{კრ}$ შეზღუდვისათვის აუცილებელია შეზღუდული იქნას დნობადი ელექტროდის დიამეტრი $d_{გ}$, ექსპერიმენტალურად დადგენილია, რომ $I_{კრ}$ კრისტალიზატორში გამავალი დენი შეზღუდულია თუ დნობადი ელექტროდის დიამეტრის $d_{გ}$ შეფარდება კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრთან

$$d_{გ} / d_{კრ} \leq 0,8, \quad (2.6)$$

ჩვენმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ შესაძლებელია

$$d_{გ} / d_{კრ} >> 0,8, \quad (2.7)$$

ამ მიზნით შემუშავებული იქნა კრისტალიზატორის სპეციალური კონსტრუქცია რომელიც საშუალებას იძლეოდა განსაზღვრული ყოფილიყო (2.5) გამოსახულებაში შემავალი $I_{3\theta}$ დენის შემადგენელი.

2.4. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის განსაზღვრა და მის სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ენერგიის ძირითად წყაროს წარმოადგენს გამდნარ წიდაში გამავალი დენით გამოყოფილი ჯოულის სითბო. ელექტროწიდური გადადნობის მოდელირებამ აჩვენა, რომ ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში დნობად ელექტროდში გამავალი დენი I განიცდის განშტოებას. [2 74,75,76].

მისი მთავარი ნაწილი I_{θ} , გამოყოფს წიდაში გადადნობის პროცესისათვის საჭირო სითბოს. იგი გამდნარი წიდის გავლით გადადის გამდნარი ლითონის აბაზანაში. (ნახ.2.7)

ამავე დროს, ელექტროწიდური გადადნობის, სრული I დენის მნიშვნელოვანი ნაწილი I_L ელექტროდისა და კრისტალიზატორს შორის წიდის შეზღუდული მოცულობის გავლის შემდეგ გაივლის კრისტალიზატორის კედელში, აქედან კი გამდნარი ლითონის სხმულში. კრისტალიზატორის კედელში გავლისას გადადნობის პროცესისათვის სასარგებლო სითბო არ გამოიყოფა, ამიტომ I_L დენის წილი გადადნობის პროცესისათვის სასარგებლო სითბოს გამოყოფაში უმნიშვნელოა. მაშინ, როცა I_L შეიძლება შეადგენდეს I დენის მნიშვნელოვან სიდიდეს. აღნიშნულის გამო სასურველია გადადნობის პროცესში შეზღუდული იქნას დენის I_L მდგენელი. ამ მიზნით აუცილებელია დამუშავებულ იქნას I_L დენის განსაზღვრის მეთოდი, რადგანაც I_L დენის გაზომვა ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში საშუალებას მოგვცემს გამოვლენილი იქნას ექსპერიმენტულად I_L დენის სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორები.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორის განსხვავებული კონსტრუქცია და დენის ძალის გაზომვის სქემა (ნახ.2.8).

კრისტალიზატორი შედგება ორი ნაწილისაგან. ზედა და ქვედა კრისტალიზატორები ერთმანეთისაგან იზოლირებულია (მაგალითად ბორის ნიტრიდის ფენით).

თითოეულ კრისტალიზატორს გააჩნია გაგრილების დამოუკიდებელი სისტემა.

I_L დენის განსაზღვრის შემოთავაზებული პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ შემოთავაზებული სქემით აწყობილ კრისტალიზატორში გამდნარი წიდის აბაზანის არსებობის შემთხვევაში, დნობადი ელექტროდისა და კრისტალიზატორის ძირის დენის წყაროსთან მიერთებისას, სრული დენის I_L მდგენელმა, ე. წ. დაშუნტვის დენმა უნდა გაიაროს კრისტალიზატორის კედელთან მიერთებული დენის ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში. მაშინ მეორად გრაგნილში ჩართული ამპერმეტრი გაზომავს I_L დენის სიდიდეს.

თანაფარდობა სრული I დენის I_F და I_L მდგენელებს შორის დამოკიდებულია მათი გავლის გზის წინაღობათა თანაფარდობაზე. წიდის წინაღობა დამოკიდებულია მის შემადგენლობაზე და წიდის ფენის სიმაღლეზე.

შემოთავაზებული მეთოდით სრული I დენის I_L მდგენელის განსაზღვრის ეფექტურობის დადგენის მიზნით ჩვენ მიერ გამოკვლეულია წიდის შემადგენლობის და აგრეთვე, ქვედა კრისტალიზატორის ზედა ტორეცული ზედაპირიდან წიდის სარკისებურ ზედაპირამდე მანძილის გავლენა I_L დენის მნიშვნელობაზე.

ექსპერიმენტის დროს წიდის შემადგენლობას ვცვლიდით ცხრილის შესაბამისად.

ექსპერიმენტის დროს გამოყენებული იყო სპილენძისგან დამზადებული კრისტალიზატორები, რომელთა შიგა დიამეტრი შეადგენდა 70 მმ-ს. დნობად ელექტროდს წარმოადგენდა დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული 40 მმ დიამეტრის მქონე ცილინდრული ღერო. წიდის წინასწარი გამოდნობა ხდებოდა ელექტრორკალურ ღუმელში, რომლის აყირავებით გამდნარი წიდა ისხმებოდა კრისტალიზატორში [74,75,76].

ცხრილი.2.3

წიდის კომპონენტების, ქვედა კრისტალიზატორის ზედა ტორეცული სიბრტყის მიმართ გამდნარი წიდის დონის და დენების ცვლის მნიშვნელობა.

№	აბაზანაში წიდის შემადგენლობა	გამდნარი წიდის სარკის მდებარეობა ზედა კრისტალიზატორის მიმართ, H	წიდაში გამავალი ძირითადი დენი I _წ , ა	კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის მნიშვნელობანი I _ღ , ა	ელექტროდში გამავალი დენი I, ა
1	CaF ₂	0,25 H	1378	122	1500
		0,5 H	1253	247	
		2 H	990	510	
2	CaO-Al ₂ O ₃	0,25 H	1350	0	1350
		0,5 H	1350	0	
		2 H	1350	0	
3	75(CaO-Al ₂ O ₃)-25CaF ₂	0,25 H	1400	0	1400
		0,5 H	1400	0	
		2 H	1400	0	
4	50(CaO-Al ₂ O ₃)-50CaF ₂	0,25 H	1355	115	1470
		0,5 H	1230	240	
		2 H	1000	470	
5	25(CaO-Al ₂ O ₃)-75CaF ₂	0,25 H	1250	240	1490
		0,5 H	1250	240	
		2 H	1030	460	

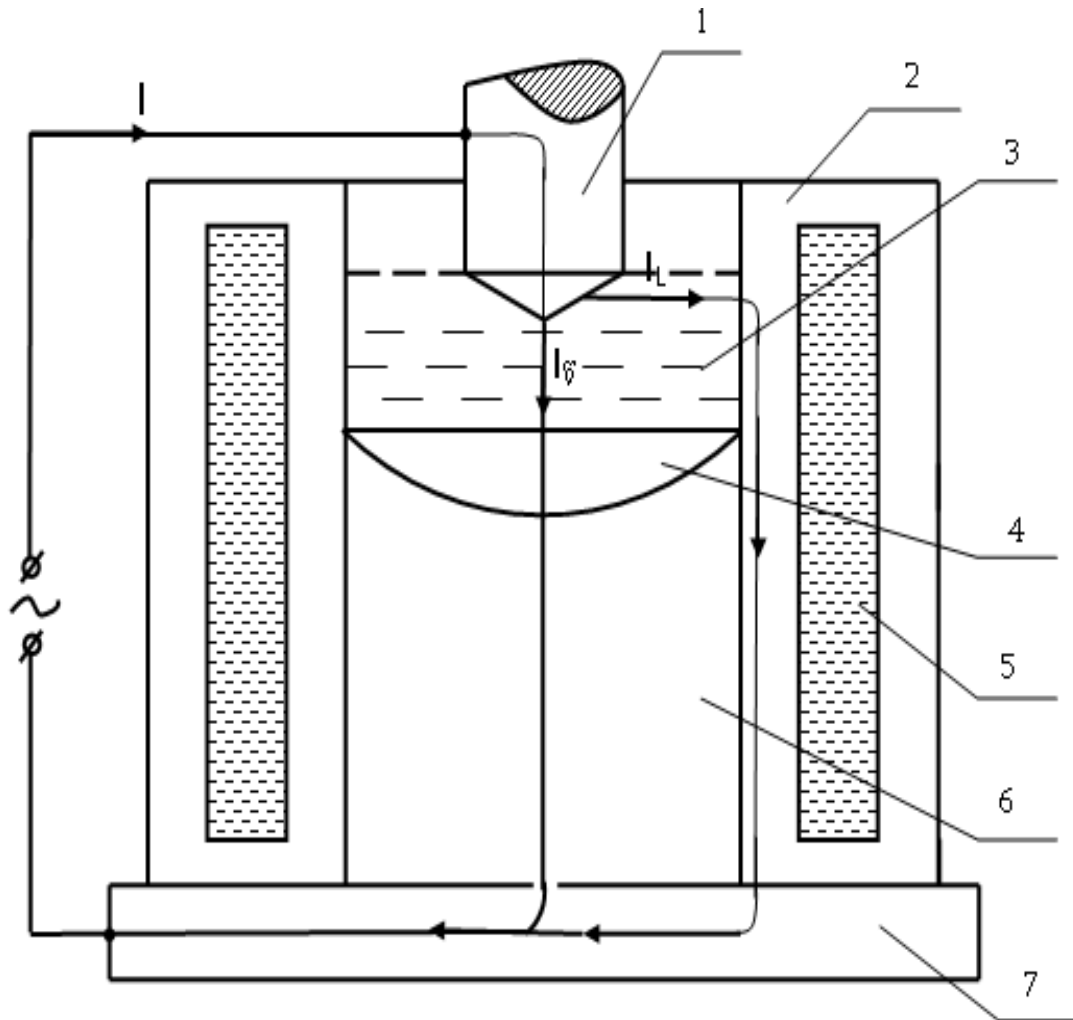
აბაზანის სიმაღლე რჩებოდა უცვლელი, ხოლო მისი სარკისებური ზედაპირის მდებარეობა იცვლებოდა ელექტროდის დნობის შესაბამისად. წიდის აბაზანის სიმაღლის უცვლელობას ვაღწევდით კვარცის მილის საშუალებით, გამდნარი წიდის დამატებით ან ამოღებით. ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმით გათვალისწინებული იყო სრული I დენის ცვლილება 1300-1500 ამპერის ფარგლებში.

თითოეული შემადგენლობის წიდისათვის დენის I , I_L სიდიდეებს ვსაზღვრავდით შემთხვევებისათვის, როცა წიდის სარკისებური ზედაპირის მდებარეობა ქვედა კრისტალიზატორის ზედა ტორეცული სიბრტყის მიმართ შეადგენდა 0,25H, 0,5, 2H. ექსპერიმენტის დროს ვზომავდით I სრულ და I_L ე. წ. დაშუნტვის დენებს, ხოლო წიდაში გამავალ დენს ვანგარიშობთ $I_{\Sigma} = I - I_L$.

წიდაში $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ და $75(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3)\text{-}25\text{CaF}_2$, წიდის სარკისებური ზედაპირის ნებისმიერი მდებარეობისათვის კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენი $I_L=0$. ე. ი. კრისტალიზატორში დენის დაშუნტვას არ აქვს ადგილი. სუფთა კალციუმის ფტორიდის CaF_2 , ასევე წიდების: $50(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3)\text{-}50\text{CaF}_2$; $25(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3)\text{-}75\text{CaF}_2$; ელექტროწიდური გადადნობისათვის გამოყენების შემთხვევაში $I_L \neq 0$, თანაც I_L დენის სიდიდე იზრდება ქვედა კრისტალიზატორის ტორეცული ზედაპირის მიმართ წიდის სარკისებური ზედაპირის მდებარეობის (სიმაღლის 0,25H, 0,5, 2H) ზრდასთან ერთად. ე. ი. დაშუნტვის დენის სიდიდე დამოკიდებულია წიდის შემადგენლობასა და ქვედა კრისტალიზატორის ტორეცის მიმართ წიდის სიმაღლეზე (H).

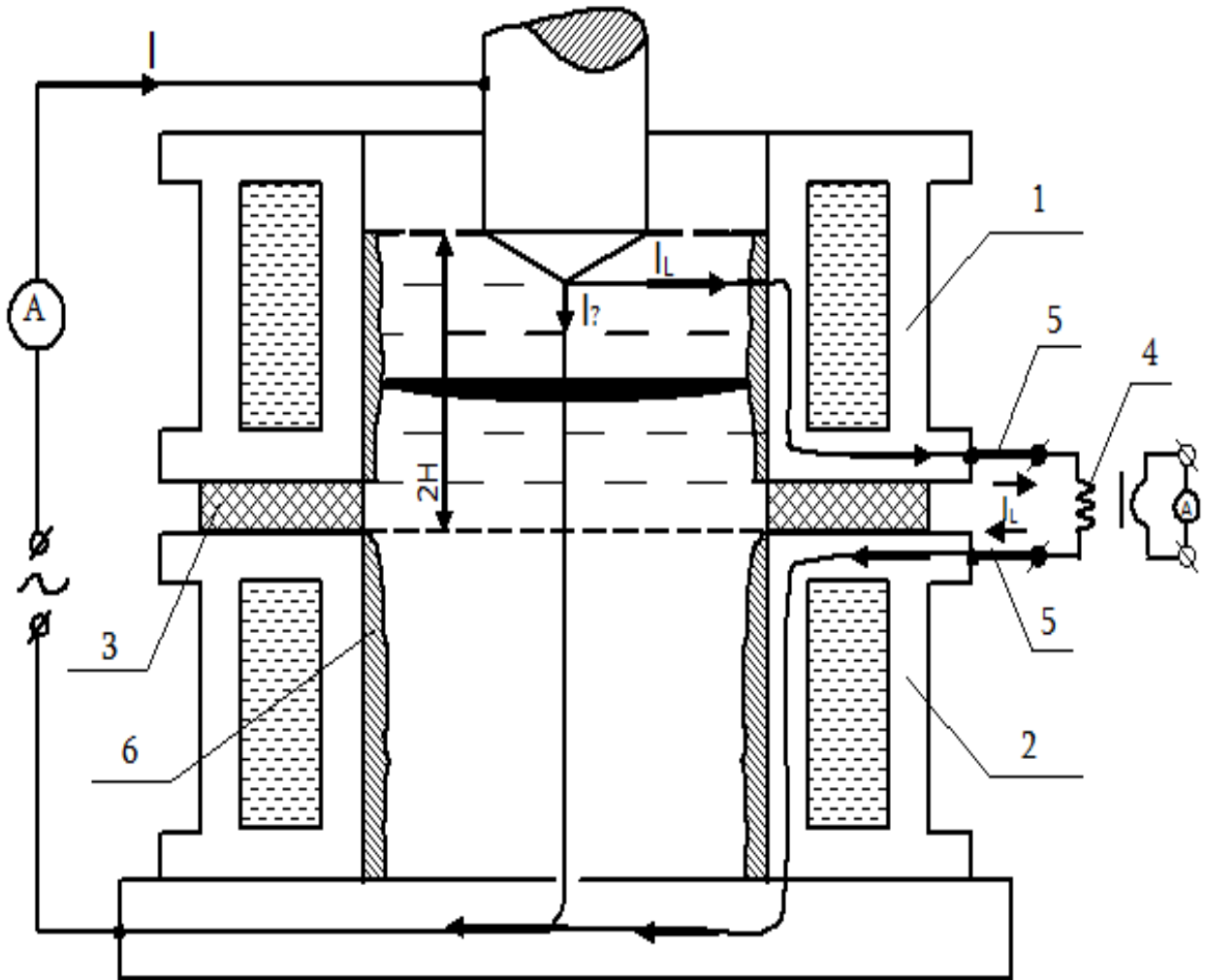
$50\text{CaO-}50\text{Al}_2\text{O}_3$ წიდის ასევე $75(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3)\text{-}25\text{CaF}_2$ შემადგენლობის წიდების გამოყენებით ელექტროწიდური პროცესი მიმდინარეობდა დენის დაშუნტვის გარეშე, ეს აიხსნება იმით, რომ ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის წინაღობა R_{Σ} მეტია, ვიდრე წინაღობა ელექტროდსა და გამდნარი ლითონის აბაზანას შორის ($R_{\Sigma a}$).

სუფთა CaF_2 წიდის ან მისი შემცველობის 75%-მდე (ცხ. 2.3) გაზრდის შემთხვევაში $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ წიდის შემადგენლობაში, ელექტროდსა და კრისტალიზატორს შორის არის წინაღობა შედარებით მცირდება და დენის გადანაწილება ხდება კრისტალიზატორის კედლის გავლით. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები თავსებადია [76,78,52].



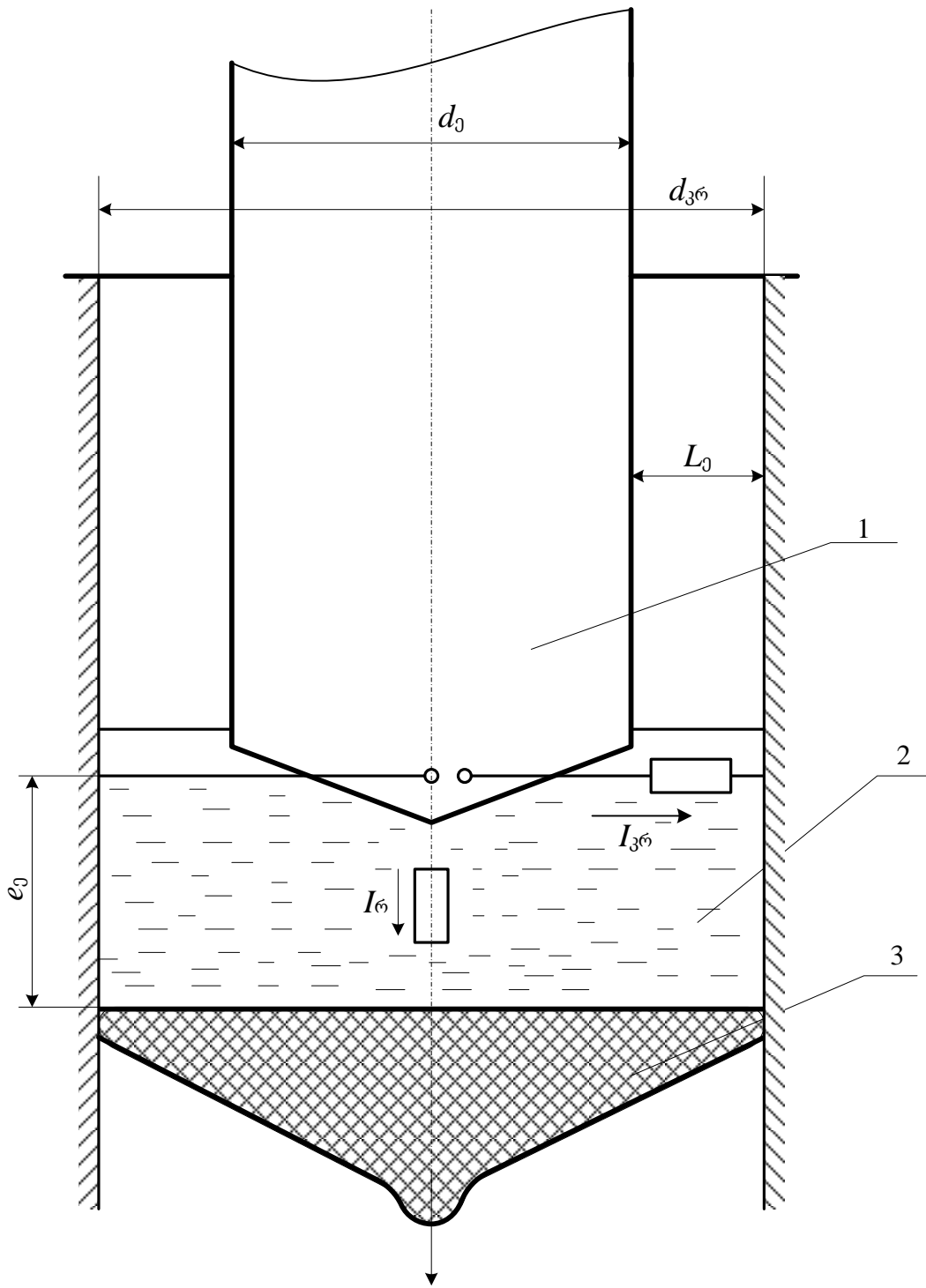
სურ.2.7 ლითონების ელექტროქიმიური გადადნობის და დენის გავლის სქემა.

1-გადასადნობი ელექტროდი; 2-კრისტალიზატორის შიგა კედელი; 3-გამდნარი წიდა; 4-გამდნარი ლითონის აბაზანა; 5- წყალი; 6- ლითონის სხმული; 7-კრისტალიზატორის ძირი. I -გადადნობის სრული დენი; I_{ϕ} -წიდაში გამავალი ძირითადი დენი; I_L -კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დაშუნტვის დენი.

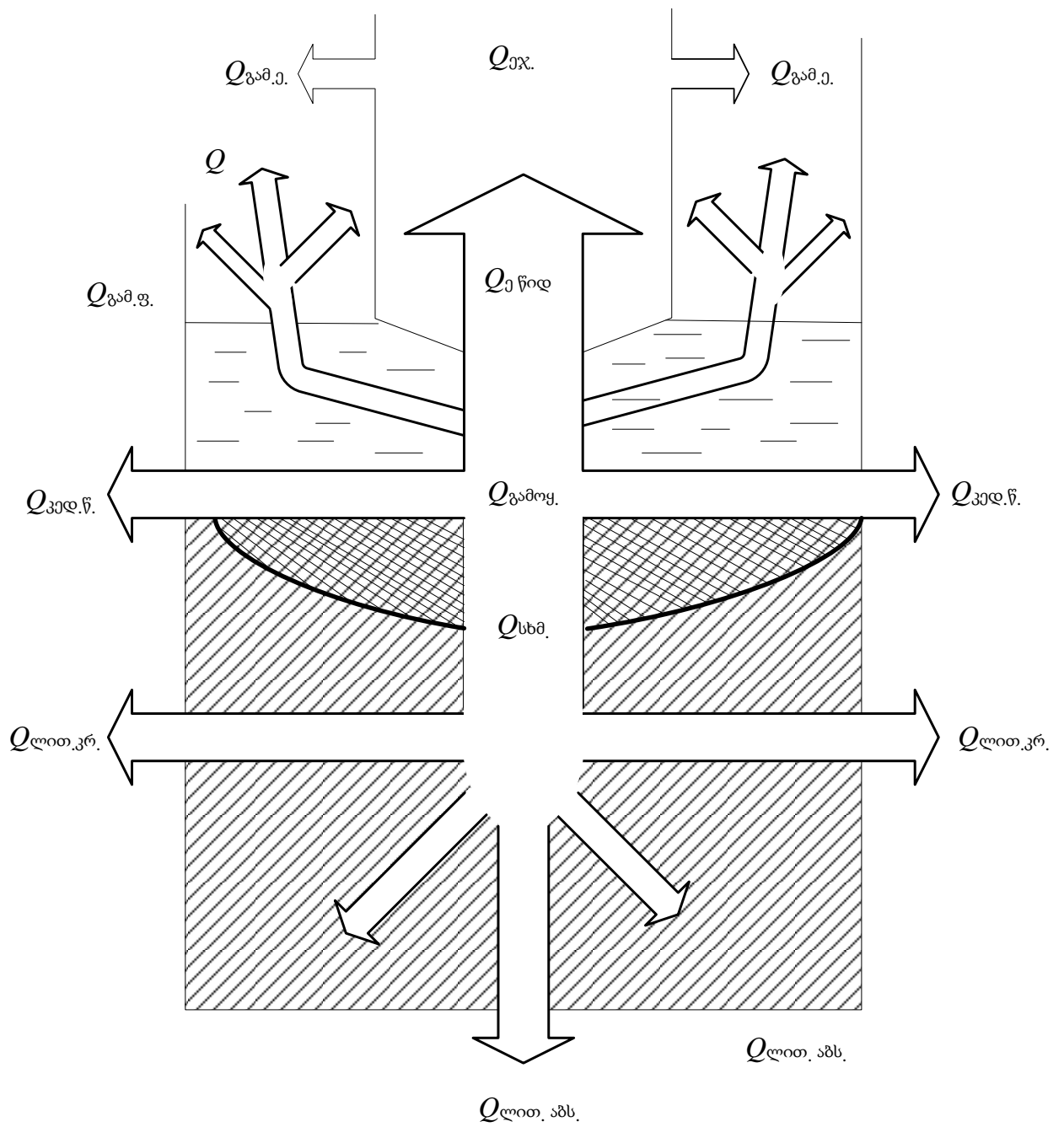


სურ. 2.8 დაშუნტვის დენის გაზომვის სქემა.

1-2-ზედა და ქვედა კრისტალიზატორი; 3-საიზოლაციო ფენა; 4-დენის ტრანსფორმატორი; 5-დენმიმცვანი სადენები; 6-წიდის ქერქი.



სურ. 2.9. კრისტალიზატორში ელექტროქიმიური გადადნობის პროცესში გამავალი დენის სქემა 1- დნობადი ელექტროდი; 2 - წიდის აბაზანა; 3- გამდნარი ლითონის აბაზანა



სურ. 2.10. ელექტროწყიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის სქემა

2.5. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოყოფილი სითბოს გავრცელება და დანაკარგები

ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის სითბოს წყაროს წარმოადგენს წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოჯოხის სითბო

$$Q_{\text{გამ.}} = I_{\text{გ}}^2 R_{\text{წ}} t \quad (2.8)$$

სადაც $I_{\text{გ}}$ - პროცესის მუშა დენია;

$R_{\text{წ}}$ - წიდის აბაზანის წინააღობაა.

წიდის აბაზანაზე ძაბვის ვარდნის $U_{\text{წ}}$ ცნობილი სიდიდის შემთხვევაში

$$Q_{\text{გამ.}} = I_{\text{გ}} U_{\text{წ}} t \quad (2.9)$$

სურ. 2.10-ზე მოცემულია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში თბური ბალანსის სქემა. განტოლებიდან (2.9) ჩანს, რომ ერთი და იმავე რაოდენობის სითბო შეიძლება გამოყოფილი იქნას ელექტროწიდური გადადნობისას ძაბვისა და დენის სხვადასხვა მნიშვნელობაზე. ამ პარამეტრების ცვლა გავლენას ახდენს პროცესის ისეთ მახასიათებლებზე, როგორცაა: ელექტროდის დნობის სიჩქარე, ლითონური აბაზანის სიღრმე და ფორმა, ელექტროწიდური გადადნობის ენერგეტიკული ეფექტურობა [31, 65]. მაგალითად, სქემით ელექტროდი - ძირი, ელექტროწიდური გადადნობისას გადადნობის დენის გაზრდით (რომელიც დაკავშირებულია ელექტროდებს შორის შუალედის შემცირებასთან) იწვევს დენის სიმკვრივის გაზრდას ელექტროდის ტორეცის ქვეშ, ე.ი. იწვევს ამ ელექტროდის ქვეშ გამოყოფილი სითბოს ინტენსიობის გაზრდას. ცხადია, ეს იწვევს ელექტროდის დნობის სიჩქარის მატებას, შესაბამისად იზრდება მოცულობა და სიღრმე ლითონის აბაზანის. ძაბვის ვარდნის გაზრდა კი გამოწვეულია ელექტროდებს შორის შუალედის გადიდებით, იმატებს წიდის აბაზანის წინააღობა და შესაბამისად იზრდება წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს ინტენსიობა, რაც დაკავშირებულია თბური დანაკარგების გაზრდასთან კრისტალიზატორის კედლის გზით.

წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო გადაეცემა თბოგამტარობით, კონვექციით და გამოსხივებით: კრისტალიზატორის კედელს, დნობად ელექტროდს, გადამდნარ

სხმულს. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის ხარისხობრივი სქემა მოცემულია სურ. 2.10-ზე.

წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო $Q_{გაგ}$: გადაეცემა დნობად ელექტროდს $Q_{ეწ}$ ტორეცზე თხევადი ლითონის აფსკიდან და ელექტროდის გვერდითი ზედაპირიდან და წვეთებიდან $Q_{წვ}$; წიდის აბაზანის სარკიდან გამოსხივებით გადაეცემა ასევე ელექტროდს $Q_{ეწ}^{გამოსხ.}$, გამოსხივდება კრისტალიზატორის კედლიდან $Q_{კედ}^{გამოსხ.}$, გამოსხივებით გადაეცემა გარემომცველ გარემოს $Q_{გარ}^{გარ}$, თბოგამტარობით აერთმევა კრისტალიზატორის კედლებიდან $Q_{კედ.წ.}$, მიღებულ სხმულის გადაეცემა თბოგამტარობით გამყოფი ზედაპირიდან წიდა-ლითონი $Q_{სხ}$.

დნობადი ელექტროდი ცხელდება წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოთი, რომელიც გადაეცემა ელექტროდს. თბოგამტარობით $Q_{გარ.წ.}$, გამოსხივებით, კონვექციით $Q_{ეწ}^{გამოსხ.}$ და ჯოჯის სითბოთი $Q_{წ}^{წ}$, რომელიც ელექტროდში გამოიყოფა მასში დენის გავლით. გაცხელებული ელექტროდიდან თავის მხრივ ხდება გარემოში სითბოს გადაცემა გამოსხივების გზით $Q_{გარ}^{გამოსხ.}$. იგი წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბურ დანაკარგს.

გადამდნარ სხმულში სითბო გადადის წიდა-ლითონი გამყოფი ზედაპირიდან გამდნარი წვეთიდან $Q_{წვ}$ და თბური მიმოცვლით თხევადი წიდიდან და ლითონიდან $Q_{სხ.მყ. ე.ი.}$ სხმულის თბომემცველობა

$$Q_{სხ} = Q_{წ} + Q_{სხ.მყ.}, \quad (2.10)$$

სხმულიდან სითბოს ართმევა ხორციელდება კრისტალიზატორის კედლიდან გამაგრებელი წყლით, რომელიც გადის კრისტალიზატორში $Q_{კრ.კედ}$ და კრისტალიზატორის ძირიდან $a_{გ.სხ.}$, ხოლო სითბოს ნაწილი $Q_{სხ.აგ.}$ აკუმულირდება სხმულში. სითბოს გარკვეული ნაწილის გამოსხივება ხდება სხმულის ზედაპირიდან. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა გამოიყენება ლითონის თვისებების სამომხმარებლო თვისებების გაუმჯობესების მიზნით. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას გადამდნარი ლითონის სხმულის თვისებების გაუმჯობესება

ძირითადად ხდება წიდის საშუალებით გადასადნობი ლითონის რაფინირება; გამაგრებელ კრისტალიზატორში გადამდნარი ლითონის, სხმულის მიმართული კრისტალიზაციით.

ელექტროწიდური გადადნობისას ქიმიური რეაქციის ინტენსიობა იზრდება ლითონის და წიდის ტემპერატურის გაზრდით, ხოლო სხმულის მიმართული კრისტალიზაცია ხორციელდება სხმულის ზედაპირიდან სითბოს ართმევით, იმავდროულად ლითონის აბაზანის ზედაპირზე მისი მიწოდებისას.

აღნიშნულის გამო, ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში სასარგებლო სითბოს მიეკუთვნება: ლითონის გასადნობად თეორიულად აუცილებელი სითბო, რომელიც განკუთვნილია გამდნარი ლითონის გადახურებისათვის დნობის ტემპერატურის ზემოთ; ლითონის აბაზანის გაცხელებისათვის დახარჯული სითბო. ამ თვალსაზრისით, თბური ბალანსის განტოლების განხილვისას, ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას, სასარგებლო სითბოდ შეიძლება ჩაითვალოს სითბო მიმართული სხმულის გაცხელებაზე. თბური ბალანსის განტოლების დანარჩენი შემადგენელი ელემენტები ჩაითვლება თბურ დანაკარგებად.

2.6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე წიდის შემადგენლობის და შევსების კოეფიციენტის გავლენა

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის დამახასიათებელია ელექტროენერგიის მაღალი ხვედრითი დანახარჯები. იგი მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ელექტროწიდური გადადნობისას გამოყენებული წიდის შემადგენლობასა და კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტზე.

ელექტროწიდური გადადნობისას ენერგიის ხვედრითი დანახარჯები დამოკიდებულია გამოყენებული წიდის შემადგენლობაზე, რადგანაც იგი განსაზღვრავს

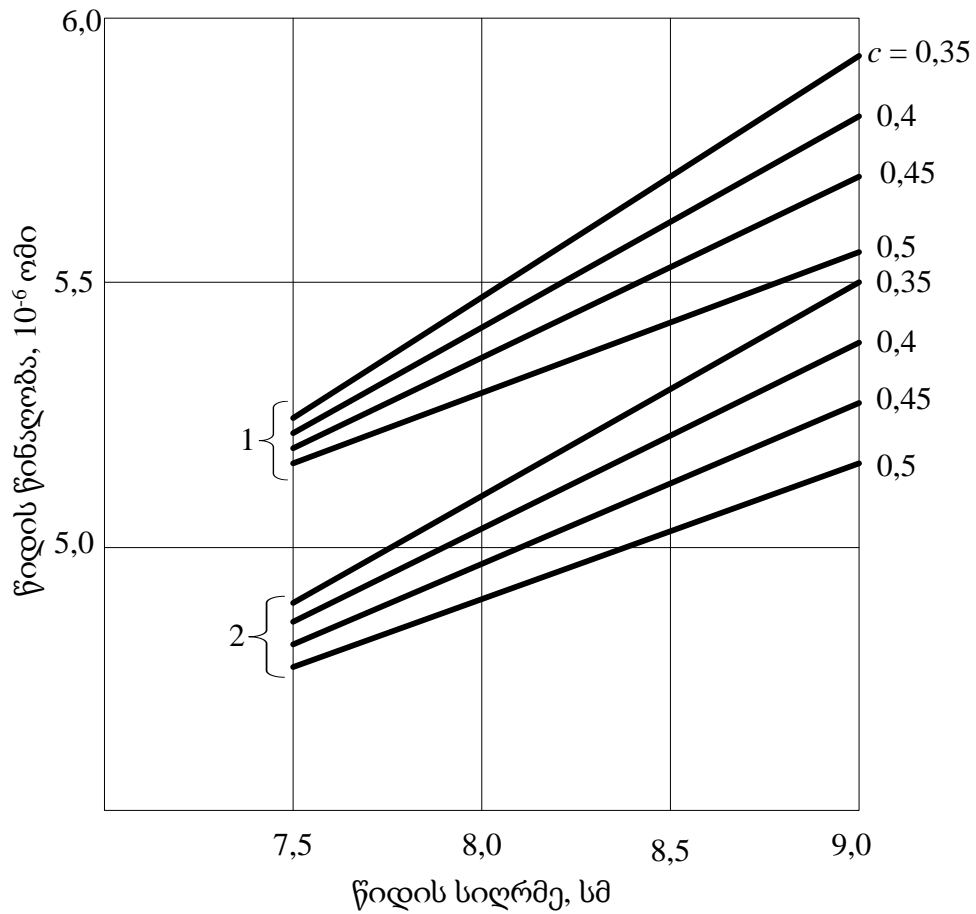
წილის აბაზანის წინალობას (ცხ. 2.4.). წილის წინალობა დამოკიდებულია აგრეთვე წილის აბაზანის სიღრმეზე (სურ. 2.11).

ცხრილი 2.4

წილების შემადგენლობის გავლენა წილის დნობის ტემპერატურაზე და წინალობაზე

წილა	ქიმიური შემადგენლობა, %					დნობის ტემპერატურა °C	ხვედრითი ელექტრო-გამტარებლობა 1150°C-ზე, ომი ⁻¹ .სმ ⁻¹
	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaF ₂		
АНФ	-	50	-	-	70	1450	4,5
∠1	30	40	15	-	15	1297	-
∠2	40	40	-	10	10	1292	-
∠3	25	40	17	-	18	1254	-
∠4	25	20	17	20	18	1390	2,76
F1	50	50	-	-	-	1333	-
F2	42	52	6	-	-	1306	-
F3	48	48	4	-	-	1400	2,97
A1	10	10	-	25	55	1129	4,12
A2	-	34	10	26	30	1162	-
A3	10	6	20	4	50	1198	-

ცხ. 2.4-დან ჩანს, რომ წილაში CaF₂-ს გაზრდით წილის წინალობა მცირდება, ხოლო Al₂O₃-ს წილის შემადგენლობაში გაზრდით, იზრდება წილის წინალობა. სურ. 2.11-დან ჩანს, რომ წილის სიღრმის გაზრდით წინალობა იზრდება, თუმცა წილის აბაზანის სიღრმის ცვლილება დაკავშირებულია მასზე სიმძლავრის ცვლილებასთან. კერძოდ, სიმძლავრის გაზრდისას წინალობა უფრო მცირედ იზრდება. ეს დაკავშირებულია სიმძლავრის მომატებისას წილის ტემპერატურის გაზრდასთან, რაც წილის გამტარებლობას ზრდის. აღსანიშნავია ისიც, რომ შევსების კოეფიციენტის (C) გაზრდით უცვლელი სიმძლავრის შემთხვევაში წინალობა მცირდება, რაც არაპირდაპირ მიუთითებს დენის დამუშავების შესაძლებლობის გაზრდაზე.



სურ. 2.11. წილის წინაღობის დამოკიდებულება წილის აბაზანის სიღრმისაგან შუქსების კოეფიციენტი; 1- სიმძლავრე 200 კვტ.; 2 - სიმძლავრე - 250 კვტ.

ელექტროენერჯის ხვედრითი ხარჯი

$$W = \frac{q}{\eta_{\Theta} \eta_T}, \quad (2.11)$$

$$\eta_{\Theta} = \frac{R_{\nabla}}{R_{\nabla} + \Sigma_C}, \quad (2.12)$$

$$\eta_T = \frac{v_{\nabla} \cdot q}{P}, \quad (2.13)$$

სადაც W - ელექტროენერჯის ხვედრითი ხარჯია;

q - ერთი ტონა ლითონის გადნობისა და გადახურებისათვის საჭირო ენერჯია;

η_a, η_T - ელექტრული და თბური მარგი ქმედების კოეფიციენტი;

$R_{\text{წ}}$ - წიდის წინაღობა;

Σ_C - მოკლე წრედის (დაშუნტვის წრედის) წინაღობა;

P - სიმძლავრე;

$\nu_{\text{დნ}}$ - დნობის სიჩქარე.

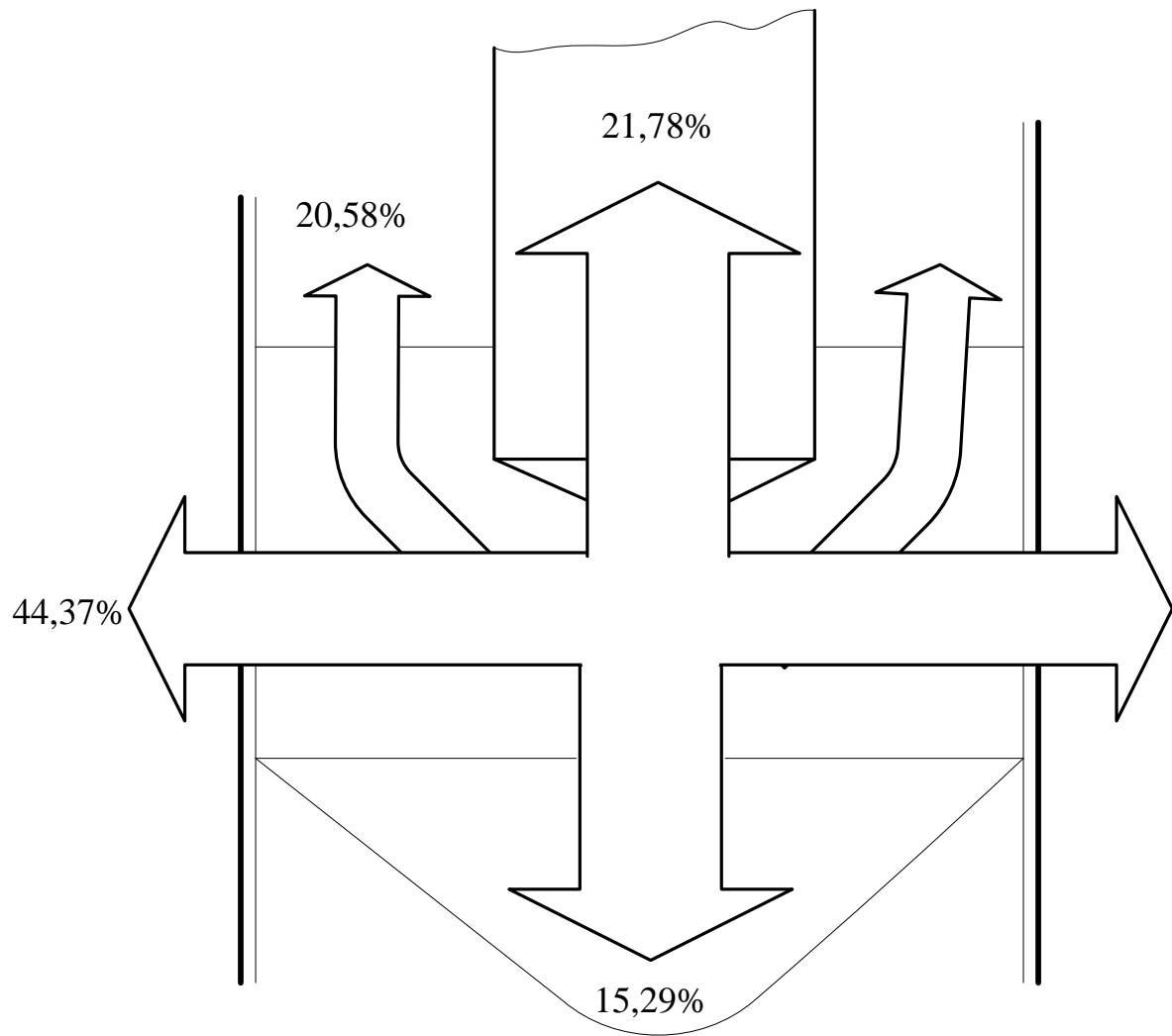
ელექტროენერგიის ხარჯის შემცირება წიდის წინაღობის გაზრდით (2.11), (2.12), (2.13) გამოსახულებების გათვალისწინებით შეიძლება აიხსნას შემდეგნაირად:

1. ელექტროწიდური გადადნობისათვის მოთხოვნილი სიმძლავრის P უცვლელობის შემთხვევაში წიდის წინაღობის $R_{\text{წ}}$ გაზრდით იზრდება η_a . ეს იმიტომ, რომ გამოსახულების მიხედვით $P = I R_{\text{წ}}$, დენის სიდიდე I მცირდება წინაღობის ზრდის შესაბამისად, ე.ი. ხდება ელექტროენერგიის ხარჯის შემცირება.
2. ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის (I) უცვლელობის შემთხვევაში წინაღობის გაზრდით იზრდება წიდის აბაზანის ტემპერატურა, რაც დადებითად მოქმედებს თბოგამტარობაზე და შედეგად იზრდება დნობის სიჩქარე და η_a .
3. წიდის აბაზანაზე მოდებულ ძაბვის უცვლელობის შემთხვევაში, დიდი წინაღობის წიდის გამოყენებისას მცირდება ელექტროდებს შორისი შუალედი, ამით მცირდება წიდის აბაზანის თბური დანაკარგები.

კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტის გაზრდით მცირდება ელექტროენერგიის დანახარჯები შემდეგი მიზეზების გამო:

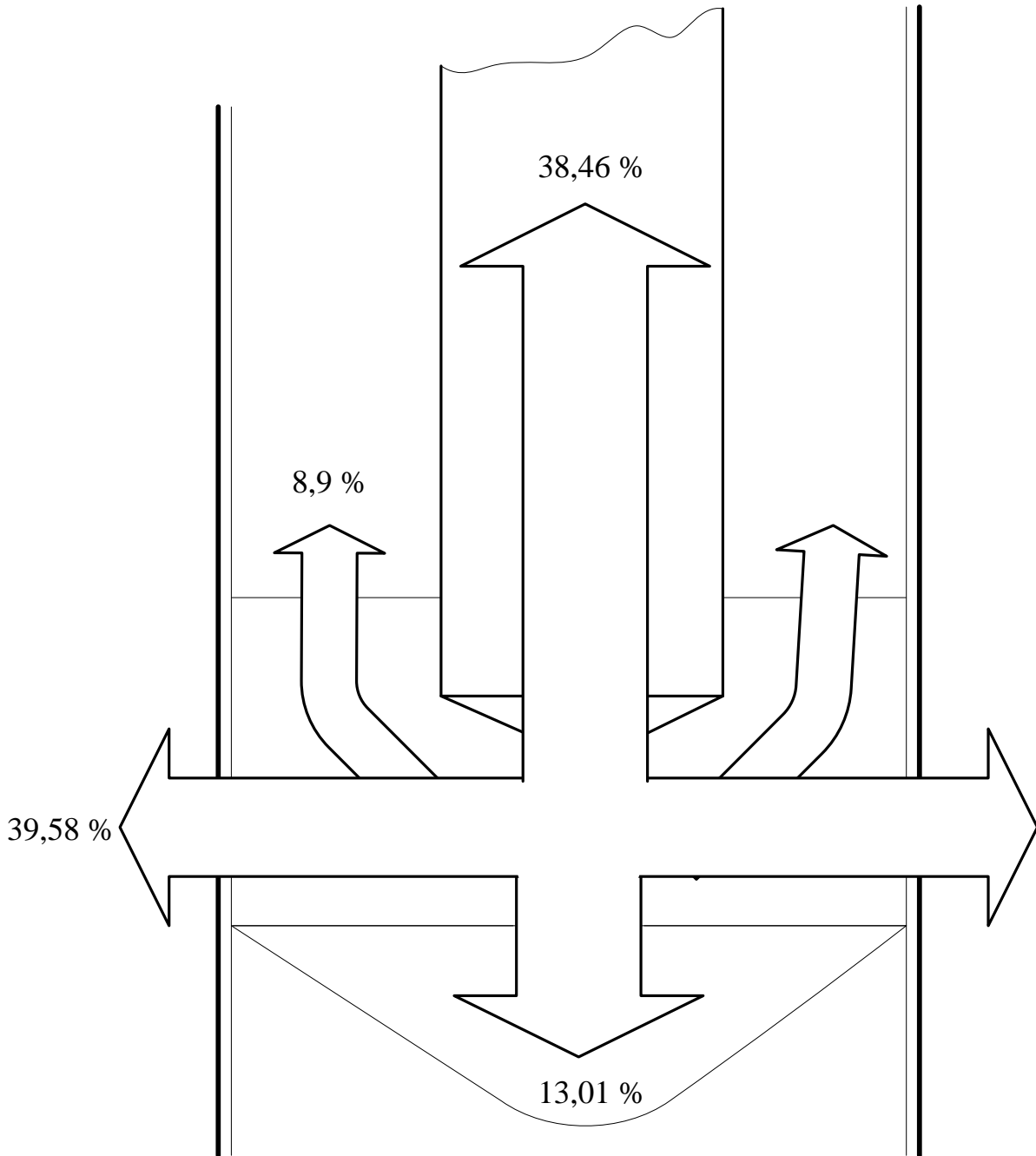
1. დნობადი ელექტროდის კონტაქტის ფართი წიდასთან იზრდება, შესაბამისად იზრდება წიდიდან ელექტროდზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა;
2. წიდის აბაზანის ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბოს რაოდენობა მცირდება.

ყველა ამ ფაქტორების მოქმედებით იზრდება ელექტროდის დნობის სიჩქარე. შევსების კოეფიციენტის გაზრდით ლითონის წვეთების ზომები მცირდება, ხოლო წიდის ქერქის სისქე მცირდება. ეს უკანასკნელი აუმჯობესებს გაგრილების პირობებს და გადამდნარი ლითონის ხარისხს. ამ ფაქტორის გავლენა თბურ ბალანსზე ნათლად ჩანს



სურ. 2.12. წიდის აბაზანის თბური ბალანსი შევსების კოეფიციენტისათვის 0,24 (წიდის შემადგენლობა AHΦ-6)

სურ. 2.12, 2.13-დან. შევსების კოეფიციენტის გაზრდით მნიშვნელოვნად მცირდება თბური დანაკარგები.



სურ. 2.13. წიდის აბაზანის თბური ბალანსი შევსების კოეფიციენტისათვის $C=0,605$
 (წიდის შემადგენლობა AHΦ-6)

დასკვნები

1. მოძრავი კრისტალიზატორით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას მნიშვნელოვანია სხმულის ხარისხიანი ზედაპირის ფორმირება. რაც შესაძლებელია წიდის თხელი ქერქის, ასევე თხევადი წიდის შრის არსებობა ქერქსა და სხმულს შორის. ამისათვის საჭირო ტემპერატურული უზრუნველყოფა უნდა შეძლოს კრისტალიზატორის სექციებიანმა კონსტრუქციამ.
2. ლითონების გადადნობისას ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კიდევ უფრო გაუმჯობესება შესაძლებელია წვეთების ზომების შემცირებით. ეს შესაძლებელია დნობადი ელექტროდის ტემპერატურის გაზრდით, ფორმის კოეფიციენტის გაზრდის გზით.
3. ელექტროწიდური გადადნობისას თბური დანაკარგების შემცირება შესაძლებელია ფორმის კოეფიციენტის გაზრდით. როგორც დანაკარგების, ასევე სხმულის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება შესაძლებელია არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობით, ფორმის კოეფიციენტის გაზრდით.

თავი 3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესების კვლევა

I და II განყოფილებაში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ანალიზმა და კვლევამ აჩვენა:

– ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის (ლუმელის) მთავარი შემადგენელი ნაწილია კრისტალიზატორი. მასში მიმდინარეობს ლითონის გადადნობის, რაფინირების და კრისტალიზაციის პროცესი გაუმჯობესებული ფიზიკურ–მექანიკური თვისებების მქონე სხმულის მისაღებად;

– კრისტალიზატორი წარმოადგენს ერთიან ცილინდრულ ღრუ სხეულს, გამდნარი ლითონის კრისტალიზაციისათვის და კრისტალიზატორის გამდნარი წიდისაგან დაცვისათვის აღჭურვილი გაგრილების სისტემით;

– კრისტალიზატორი შეიძლება იყოს უძრავი და მასში მიიღებოდეს სხმული, ან ხორციელდებოდეს მისი გადაადგილება სხმულის მიმართ. არსებობს, აგრეთვე, ელექტროწიდური გადადნობის სქემები, სადაც უძრავი კრისტალიზატორისაგან ხდება გადამდნარი ლითონის სხმულის თანდათანობითი გამოკვლევა.

– ყველა შემთხვევაში დენის წყაროს ერთი მომჭერი მიერთებულია ე.წ. გადასადნობ ელექტროდთან, ხოლო მეორე ბოლო კრისტალიზატორის ძირთან, რომელიც არაა იზოლირებული კრისტალიზატორისაგან. ამის გამო, გადასადნობი ელექტროდის მეტისმეტი მიახლოება ან შეხება კრისტალიზატორის შიგა კედელთან იწვევს მოკლედ შერთვას. ამან შეიძლება გამოიწვიოს კრისტალიზატორის კედლის გაწვა (მთლიანობის დარღვევა) და გაგრილების სისტემიდან წყლის ჩაღვრა წიდის აბაზანაში. ეს გამოიწვევს ელექტროწიდური გადადნობის ლუმელის ნგრევას და ასევე სახიფათოა გარემომცველი სივრცეში მყოფი მომსახურე პერსონალისათვის. ამით არის გამოწვეული გადასადნობი ლითონისაგან დამზადებული ელექტროდის დიამეტრის შეზღუდვა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრის მიმართ. რაც მცირე იქნება ელექტროდის დიამეტრის კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრთან შედარებით, მით უსაფრთხოა პროცესი. მაგრამ ელექტროდის შემცირებით ამავე დროს მცირდება გადადნობის

პროცესის წარმადობა, აგრეთვე იზრდება თბური დანაკარგები ელექტროდსა და კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს შორის წიდის აბაზანის სარკული ზედაპირიდან გამოსხივების გამო;

– ელექტროდის დიამეტრი შეზღუდულია, აგრეთვე ელექტროდსა და კრისტალიზატორის შიგა კედელს შორის დაშუნტვის დენის გაზრდის შესაძლებლობის თვალსაზრისით; მიღებულია, რომ თანაფარდობა ელექტროდის და კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს შორის (ე.წ. ფორმის კოეფიციენტი) არ უნდა აღემატებოდეს 0,8–ს;

– ელექტროწიდური გადადნობისას დაშუნტვის თავიდან აცილება შეიძლება, თუ კრისტალიზატორი იქნება სექციებიანი (მაგალითად, სამსექციანი) და სექციები ერთმანეთისაგან იქნება ელექტრულად იზოლირებული.

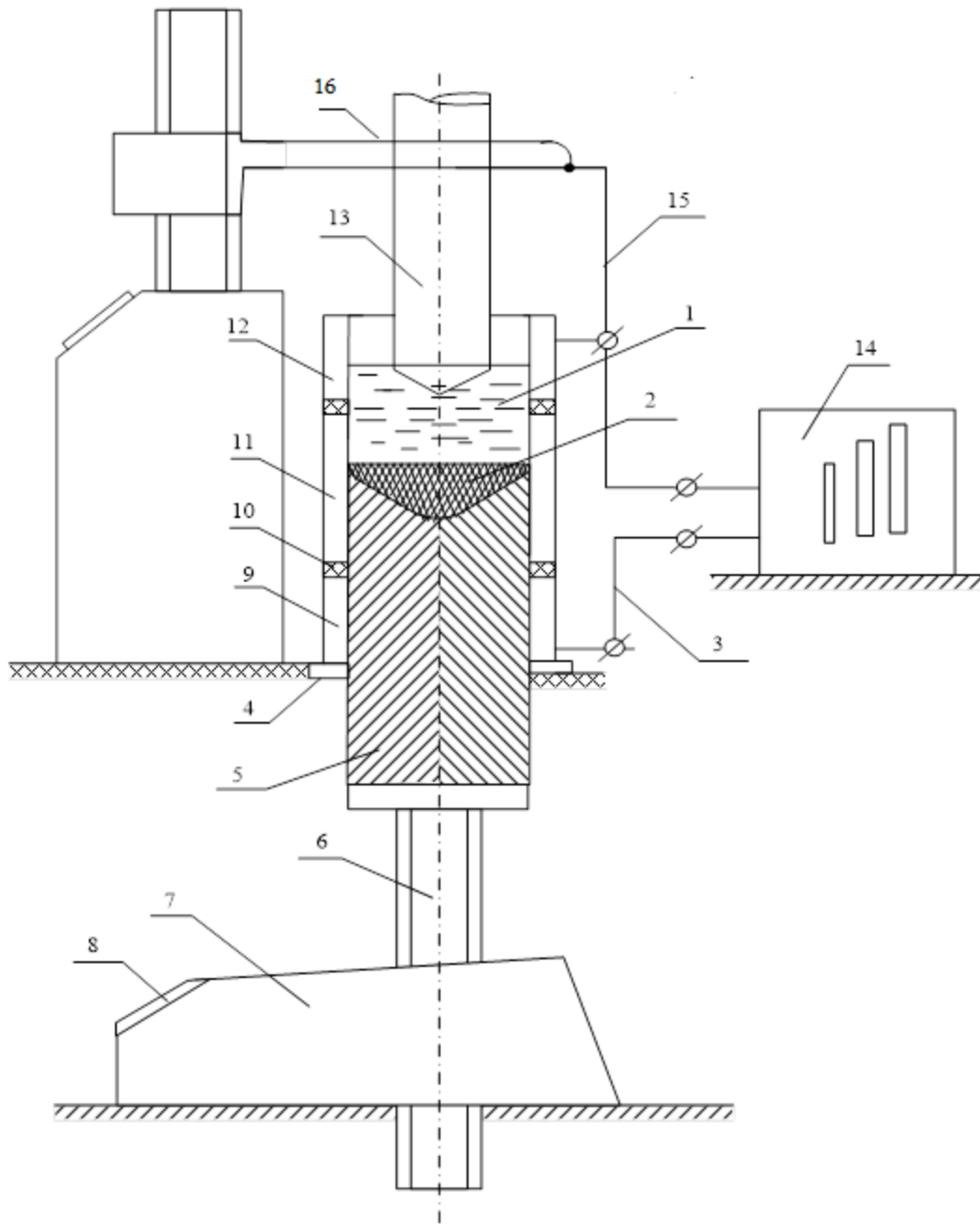
ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში წიდის აბაზანის ტემპერატურის შეუცვლელად, დნობადი ელექტროდის შეცვლისას შესაძლებელი იქნება, თუ ზედა და ქვედა ელექტრულად იზოლირებული სექციები ამავე დროს იქნებიან არადნობადი ელექტროდები და მათთან მიერთებული იქნება დენის წყარო. ამით შემცირებული იქნება თბური დანაკარგები, რომლებიც დამახასიათებელია არასექციებიანი კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესისათვის [9, 23, 39, 59] .

თუ სექციებიანი, არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ზედა ელექტროდი და დნობადი ერთდროულად მიერთებული იქნება დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერთან (სურ. 3.1.), მაშინ ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში თავიდან იქნება აცილებული მოკლემერთვა, დენის დაშუნტვა და შესაძლებელია ფორმის კოეფიციენტი მეტი იყოს 0,8–ზე. ეს კი გამოიწვევს გადადნობის პროცესში თბური დანაკარგების შემცირებას, პროცესის წარმადობის გაზრდას და ამით გაზრდის ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მ.ქ.კ–ს.

შემოთავაზებული კრისტალიზატორის სრულიად ახალი სექციებიანი კრისტალიზატორი, არადნობადი ელექტროდებით და ელექტროწიდური გადადნობის ელექტურლი სქემა, რომლის მიხედვითაც ზედა არადნობადი ელექტროდი და დნობადი ელექტროდი მიერთებულია ერთდროულად დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერთან,

ხოლო მისი მეორე მომჭერი მიერთებულია არადნობად ქვედა ელექტროდთან (იგი არაა ელექტრულად იზოლირებული კრისტალიზატორის ძირისაგან).

გამოსაკვლევა შემოთავაზებული ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები და მათზე მოქმედი ფაქტორები. კვლევები ძირითადად შესაძლებელია შესრულებული იქნას ელექტროწიდური გადადნობის მოდელირებით.



სურ. 3.1. ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის კრისტალიზატორის კონსტრუქცია და შეერთების ელექტრული სქემა

1 - წიდის აბაზანა; 2 - ლითონის აბაზანა; 3 - კვების წყაროს კრისტალიზატორის ქვედა არადნობად ელექტროდთან დენმიმცვანი; 4 - კრისტალიზატორის ძირი; 5 - სხმული; 6 - გამოწელების მექანიზმის ხრახნი; 7 - გამოწელების მექანიზმი; 8 - მართვის პულტი; 9 - ქვედა არადნობადი ელექტროდი; 10 - საიზოლაციო ფენა; 11 - შუა სექცია; 12 - ზედა არადნობადი ელექტროდი; 13 - გამოსადნობი ელექტროდი; 14 - კვების წყარო; 15 - დენმიმცვანი; 16 - მიმწოდი

3.1. ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები და მათზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორები

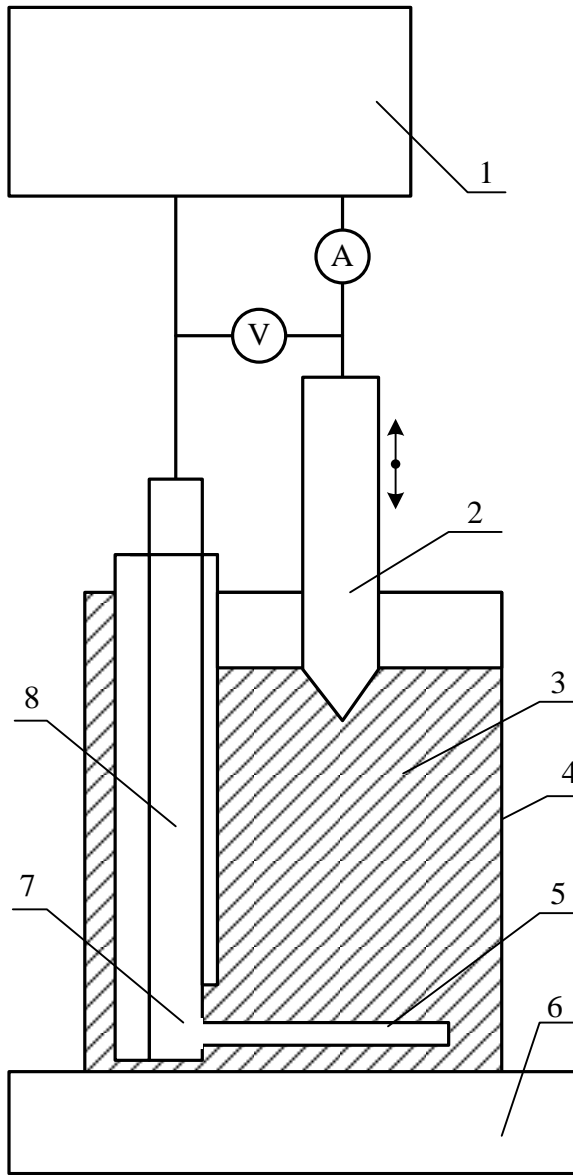
ჩვენ მიერ აღნიშნული იყო, რომ რეაქციის სიჩქარე წიდა-ლითონი- სისტემის გამყოფ ზედაპირზე დამოკიდებულია ამ ზედაპირის ფართზე. ელექტროწიდური გადადნობისას წიდა-ლითონი სისტემის გამყოფი ზედაპირის ფართი იზრდება მაშინ, როცა წვეთის ზომები მცირდება ისე, რომ დროის ერთეულში წარმოქმნილი წვეთების რიცხვი იზრდება. ამ დროს გაზრდილია ლითონის რაფინირების ხარისხი და გაუმჯობესებულია არალითონური ჩანართებისაგან განთავისუფლების პირობები. შედარებით ნაკლებადაა შესწავლილი ელექტროწიდური გადადნობისას დენის სიდიდის და სახეობის გავლენა წვეთის წარმოქმნის პროცესზე. ამ პრობლემის შესწავლა მოსახერხებელია ე.წ. გამჭვირვალე ფიზიკური მოდელის გამოყენებით (სურ. 3.2).

ელექტროწიდური გადადნობის მოდელში დნობადი ელექტროდი (2) დამზადებულია ვუდის შენადნობისაგან, რომელიც ჩაშვებულია NaCl-ის წყალხსნარში [39,53,56,61].

ელექტროდის დიამეტრია 8 მმ. წყალხსნარის კონცენტრაცია 0,01–0,1 მოლია და დენის წყაროდან (1) მოდებულია V ძაბვა უზრუნველყოფს ელექტროლიტის ტემპერატურას 82–85°C. დენის წყაროს ერთი პოლუსი მიერთებულია (2) ელექტროდთან, ხოლო მეორე ელექტროდს წარმოადგენს იზოლირებული მინის მილში ჩაშვებულია მოლიბდენის მილთან დაკავშირებულ მოლიბდენის რგოლი (5).

წვეთის წონას საზღვრავენ გადამდნარი ლითონის წონისა და წვეთების რაოდენობების მიხედვით. ვუდის შენადნობის ელექტროდის გადადნობისას საზღვრავენ დენს და ძაბვას. მიღებული დამოკიდებულებები მოც. სურ. 3.3. და სურ. 3.4–ზე.

დენის (სიმკვრივის) გაზრდით წარმადობა მნიშვნელოვნად იზრდება. ძაბვის გაზრდით კი წვეთის წონა მცირდება.



სურ. 3.2. ელექტროწიდური გადადნობის გამჭვირვალე მოდელი

1 - კვების წყარო; 2 - ვუდის შენადნობისაგან დამზადებული ელექტროდი; 3 - სუფრის მარილის ელექტროლიტი; 4 - მინის ჭურჭელი; 5 - მოლიბდენის რეოლი; 6 - დამატებითი სითბოს წყაროს ფირფიტა; 7 - მოლიბდენის ღერო (დენმიმცვანი); 8 - მინის მილი; A - ამპერმეტრი; V - ვოლტმეტრი

ცხრილი 3.1.

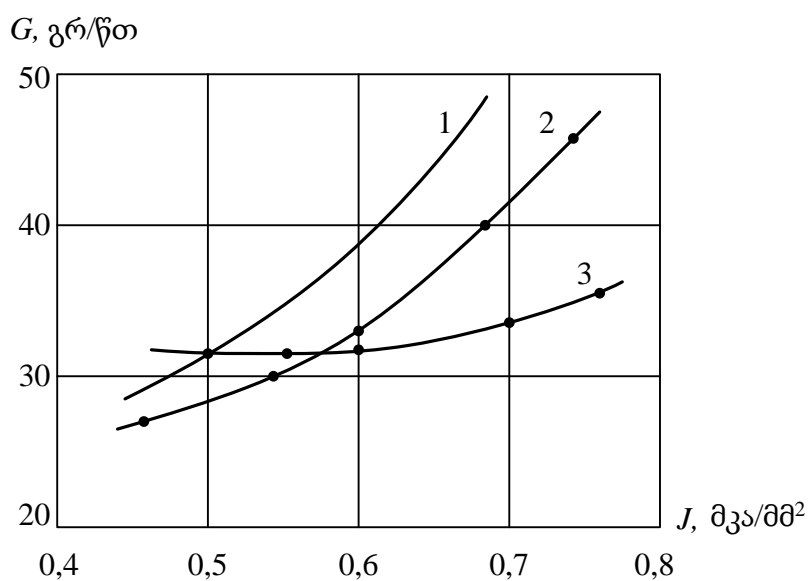
ელექტროდის დნობის წარმადობის ცვლილება დენის სიმკვრივის მიხედვით.

№	ცვლადი დენი		პირდაპირი პოლარობა		უკუ პოლარობა	
	G , გრ/წთ	j , მკა/მმ ²	G , გრ/წთ	j , მკა/მმ ²	G , გრ/წთ	j , მკა/მმ ²
1	30	0,48	26	0,45	32	0,50
2	32	0,50	30	0,55	32	0,55
3	34	0,55	34	0,60	33	0,60
4	37	0,58	40	0,68	35	0,70
5	45	0,65	45	0,75	36	0,75

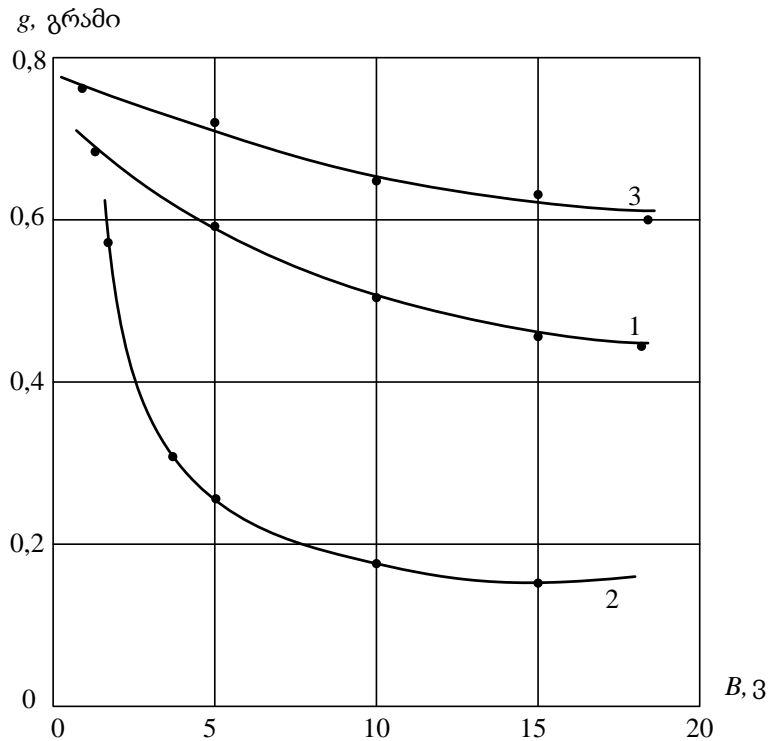
ცხრილი 3.2

დამოკიდებულება წვეთის წონასა და ძაბვას შორის

№	ცვლადი დენი		მუდმივი დენი			
	g , გრ/წთ	B , ვ	პირდაპირი პოლარობა		უკუ პოლარობა	
			g , გრ/წთ	B , ვ	g , გრ/წთ	B , ვ
1	0,58	2	0,58	2	0,75	2
2	0,22	5	0,30	3,5	0,75	5
3	0,45	10	0,25	5	0,70	10
4	0,50	15	1,8	10	0,65	15
5	0,49	18	1,8	15	0,60	17,5



სურ. 3.3. გადადნობის წარმადობის დამოკიდებულება დენის სიმკვრივისაგან
1 - ცვლადი დენი; 2 - მუდმივი დენი (პირდაპირი პოლარობა); 3 - მუდმივი დენი (უკუ პოლარობა)



სურ. 3.4. ძაბვასა და წვეთის წონას შორის დამოკიდებულება
 1-ცვლადი დენი; 2 - პირდაპირი პოლარობა (მუდმივი დენი); 3 - უკუპოლარობა
 (მუდმივი დენი) არადნობად ელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ფიზიკური
 მოდელი

აღნიშნული გამოკვლევები მიუთითებს იმაზე, რომ ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ერთ-ერთ მთავარ ფაქტორზე, როგორცაა პროცესის წარმადობა და გადადნობის პროცესში წვეთის წარმოქმნის პროცესი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული წიდაში გამავალ დენზე, მის სიმკვრივესა და წიდის აბაზანაზე მოდებულ ძაბვაზე (ეს უკანასკნელი გულისხმობს ელექტროწიდურ გადადნობის პროცესს სხვადასხვა შემადგენლობის წიდაზე).

შემოთავაზებული კრისტალიზატორისათვის, აგრეთვე შეერთების შემოთავაზებული ელექტრული სქემის შემთხვევაში არაა ცნობილი დენის განაწილების ხასიათი წიდის აბაზანაში. შესაბამისად, უცნობია ელექტროდის დნობის პროცესის თავისებურებანი და მათი გავლენა პროცესის წარმადობაზე. ამიტომ, ჩვენი შემდგომი კვლევების მიზანია არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში გამავალი დენის

განაწილების შესწავლა, კერძოდ, გამოსაკვლევი, პოტენციალის განაწილება წიდის აბაზანაში [15,70,71].

ჩვენ მიერ შემოთავაზებულია აღნიშნული კვლევების ჩატარება ფიზიკური მოდელის საშუალებით.

3.2. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი

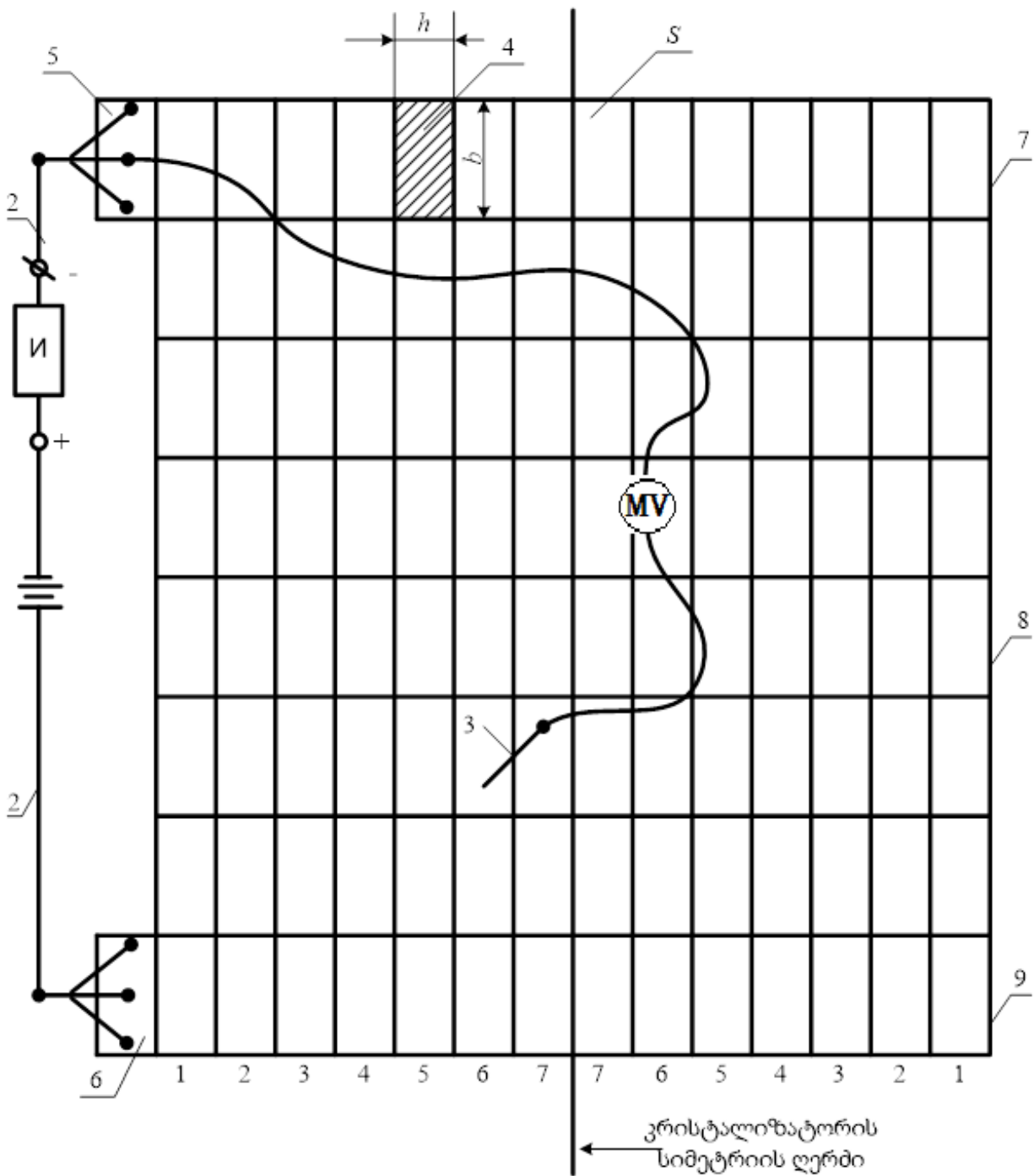
ელექტროწიდური გადადნობის სითბოს წყაროს წარმოადგენს გამდნარი წიდაში გამავალი დენის მიერ გამოყოფილი ჯოულის სითბო. ამიტომ მნიშვნელოვანია ვიცოდეთ, დენის განაწილების სურათი წიდაში, რომ სწორი წარმოდგენა გვექონდეს წიდის მოცულობაში ტემპერატურულ ველზე. ცხადია, იგულისხმება, რომ სითბოს გამოყოფა ხდება წიდის იმ ნაწილში, სადაც გადის დენი. როგორც ცნობილია, ელექტრული დენი გადის თხევადი წილის იმ ნაწილში, სადაც ელექტროველი არსებობს, ან სხვანაირად, გვაქვს პოტენციალთა სხვაობა წიდის მოცემული ნაწილის სხვადასხვა წერტილში. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ფიზიკური მოდელის საშუალებით გამოკვლეული უნდა იქნას კრისტალიზატორში არსებულ თხევად წიდაში პოტენციალის განაწილების ხასიათი. როგორც გამოკვლევები აჩვენებს, თხევად წიდას აქვს აქტიური წინაღობა. ამას ამტკიცებს წიდაში გამავალი დენის და წიდის შესაბამის უბანზე მოდებული ძაბვის ოსცილოგრამის ანალიზი. კერძოდ, დენი და ძაბვა ფაზით ემთხვევა ერთმანეთს. ცილინდრული კრისტალიზატორის შემთხვევაში, თხევად წიდაში პოტენციალი უნდა განხილული იქნას მთელ მოცულობაში. თუმცა, მოდელის საშუალებით შედარებით გაადვილებულია პოტენციალის განაწილების სურათის გამოკვლევა სივრცის ერთ რომელიმე კვეთში დროის მოცემულ ერთ რომელიმე მომენტში. ცხადია, თხევადი წიდის შემადგენლობიდან გამომდინარე მას სხვადასხვა წერტილში აქვს სხვადასხვა წინაღობა. ამიტომ, წიდაში დენის გავლისას მოცემულ წერტილში პოტენციალის სიდიდე დამოკიდებულია არა მარტო დენის სიდიდეზე, არამედ, აგრეთვე ამ წერტილში წიდის შემადგენლობაზე და შესაბამისად, წიდის

წინააღმდეგობაზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, სივრცის ერთ რომელიმე სიბრტყეში წიდაში პოტენციალის განაწილების გამოკვლევისათვის მოდელი შეიძლება იყოს კრისტალიზატორის ზომის შესაბამისი თხელი ფურცელი, რომლის წინააღმდეგობა მიახლოებულია ან ჯერადაა თხევად მდგომარეობაში წიდის წინააღმდეგობის. მოდელის დამზადებისას ასეთი თხელ ფურცელს (0,1 მმ სისქის) შეიძლება წარმოადგენდეს დაბალლეგირებული ფოლადის X18H9T ფურცელი. მალეგირებული ელემენტების ფურცელში არათანაბარი განაწილება მის სხვადასხვა წერტილში იძლევა იმის საშუალებას, რომ იმიტირებული იქნას მოცემულ სიბრტყეში წიდის ელემენტების არათანაბარი განაწილებით გამოწვეული წინააღმდეგობის არათანაბრობა. მოდელში გამდნარი წიდის მოცულობის სიბრტყე, რომელიც გადის სიმეტრიის ღერძზე, იმიტირებულია 0,1 მმ სისქის ფურცლის სათხი. მის ზედა ნაწილი მოიცავს ზედა არადნობად ელექტროდს (5), ხოლო ქვედა ნაწილი ქვედა არადნობად (6) ელექტროდს. ფურცლის ზომები ემთხვევა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს (60მმ) და სიმაღლეს $l=80$ მმ.

სურ. 3.5-ზე ფურცლის ზომები გადიდებულია ორჯერ. სინამდვილეში ზედა 7 და ქვედა 9 არადნობადი ელექტროდები ელექტრულად იზოლირებულია შუა 8 სექციით. წარმოდგენილ მოდელში ისინი არაა ერთმანეთისაგან იზოლირებული, რადგანაც იგულისხმება, რომ არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორი შევსებულია დენგამტარი თხევადი წიდით.

კრისტალიზატორის ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმში მოქმედებისას ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის შემადგენლობაში შემავალი დენის წყაროს მომჭერები მიერთებულია კრისტალიზატორის ზედა არადნობად და ქვედა არადნობადი ელექტროდების (5), (6) დენმიმყვანებთან. რის შედეგადაც, თხევად წიდაში გადის ე.წ. გადადნობის დენი. ამ დენის გადანაწილების სურათის კვლევისათვის მოდელის (5) და (6) მომჭერებთან მიერთებულია მუდმივი დენის წყარო (1). თანაც „მინუს“ პოტენციალი მოდებულია ზედა არადნობადი ელექტროდის (5) დენმიმყვანთან, ხოლო „პლუსი“ ქვედა ელექტროდის (6) დენმიმყვანთან. ექსპერიმენტის პირობებში (1) დენის წყარო მოდელში უზრუნველყოფს არადნობადელექტროდებს შორის ისეთი სიდიდის, დენის გავლას, რომელიც არ გამოიწვევს მოდელის ფურცლის გახურებას. ამის

აუცილებლობა გამოწვეულია იმით, რომ მოდელის ფურცლის გახურებით მისი წინაღობის შეცვლამ არ იმოქმედოს ელექტრული ველის სურათზე (პოტენციალის განაწილებაზე მოდელის თხელ ფურცელზე). ექსპერიმენტის დროს მოდელში გამავალი დენის სიდიდე უნდა იყოს რეალურ პირობებში გადადნობის დროს წიდაში გამავალი დენის პროპორციული (მაგალითად, შემცირებული 100-ჯერ). თხელი ფირფიტა დაყოფილია უჯრედებად: $h = 10$ მმ, $b = 5$ მმ. ექსპერიმენტში გათვალისწინებულია თითოეული უჯრის ცენტრში პოტენციალის მნიშვნელობის განსაზღვრა შუპის (2) საშუალებით. პოტენციალის მნიშვნელობის განსაზღვრა ხდება წრედში ჩართული მილივოლტმეტრის საშუალებით.



სურ. 3.5. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი

1-კვების წყარო; 2 - სადენი; 3 - შუპი; 4 - ელემენტარული უჯრა ($h = 5\text{მმ}$, $b = 25\text{მმ}$, $S = 1:2$);
 MV - მილივოლტმეტრი; 5 - კრისტალიზატორის ზედა არადნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი; 6 - კრისტალიზატორის ქვედა არადნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი;
 7, 8, 9 - ზედა, ქვედა და შუა სექციები

3.3. ელექტროწიდური გადადნობის წიდაში პოტენციალის განაწილების კვლევა მოდელის მიხედვით და მისი გავლენის ანალიზი არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესზე

პოტენციალის კვლევის საწყის ეტაპზე განსაზღვრული იქნა მოდელზე მომჭერებიდან დაშორებული იმ მახლობელი წერტილების პოვნა, რომელთა პოტენციალი ნულის ტოლია. მონაცემები წარმოდგენილია სურ. 3.6-ზე.

პოტენციალების მნიშვნელობების ასეთი ზღვრული მნიშვნელობები დამოკიდებულია მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვის სიდიდეზე. რაც მეტია მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვის სიდიდე, მით უფრო დაშორებულია (მაგ. მრუდი 4) ის წერტილები კრისტალიზატორის კედლიდან, რომელზეც გაზომილი პოტენციალის მნიშვნელობები შეესაბამება ნულს. მოდელის იმ წერტილში, რომელშიც პოტენციალის სიდიდე ნულის ტოლია, იმას ნიშნავს, რომ ამ წერტილში დენი არ გადის. აქედან გამომდინარე, 1, 2, 3, 4 მრუდეებით შემოსაზღვრულია სივრცე, რომელთა გარეთ დენი არ გადის. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ელექტროწიდური გადადნობის რეალურ პირობებში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენი გადის მხოლოდ ამ მრუდის ბრუნვით მიღებული გამდნარი წიდის მოცულობაში. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო სითბო მიიღება გამდნარი წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოულ-ლენცის სითბოს ხარჯზე. აქედან გამომდინარე, მიღებული მრუდის ბრუნვით მიღებული სხეულის გარეთ მყოფ გამდნარ წიდაში სითბო არ გამოიყოფა და აქ ტემპერატურული ველის უზრუნველყოფა ხდება გამდნარი წიდის თბოგამტარობის შედეგად [25,26,27,55,60].

მიღებული მრუდების სარკისებურ ასახვას წარმოადგენს მიღებული გამოსახულება (სურ. 3.7), რომელიც შეესაბამება ექსპერიმენტს რეალიზებულს მოდელის საშუალებით, როცა მუდმივი ძაბვა მოდებულია დენის ზედა და ქვედა მარჯვენა დენმიმყვანებთან. გამომდინარე წიდის მოცულობაში არადენგამტარი სივრცე მიიღება კრისტალიზატორის ღერძის გარშემო ერთდროულად, შესაბამისი მარჯვენა და მარცხენა დენმიმყვანების შემთხვევაში მიღებული მრუდების ბრუნვით. სურ. 3.8-ზე მოცემულია

ექსპერიმენტული მრუდეები, რომლებიც მიღებულია ერთდროულად მარჯვენა და მარცხენა დენმიმყვანებთან დენის წყაროს მომჭერების მიერთებით. აქ გამოკვეთილია არადენგამტარი სივრცეები კრისტალიზატორში არსებული წიდის არადენგამტარ სივრცეში. არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში, მისი მოდელის კვლევის საფუძველზე გამოვლენილი გამდნარი წიდის სივრცე, სადაც დენი არ გადის და სითბო არ გამოიყოფა. მისი ტემპერატურა განპირობებული იქნება მხოლოდ თბოგამტარობით. როცა დენმიმყვანებზე მოდებულია ექსპერიმენტში კვების წყაროდან მაქსიმალური ძაბვა ($U=4ვ.$), მაშინ აღნიშნული სივრცე მიიღება $a b c$ და $d e f$ კონტურების ბრუნვით. გამდნარი წიდის მოცულობა, სადაც დენი არ გაივლის არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონის ელექტროწიდური გადადნობისას კიდევ უფრო იზრდება, რაც მცირეა კრისტალიზატორის არადნობად ელექტროდებზე მოდებული ძაბვის სიდიდე.

ცხრილი 3.3

პოტენციალის განაწილება კრისტალიზატორში, როცა დენი მიყვანილია მოდელის მარცხენა ზედა და ქვედა არადნობად ელექტროდებთან

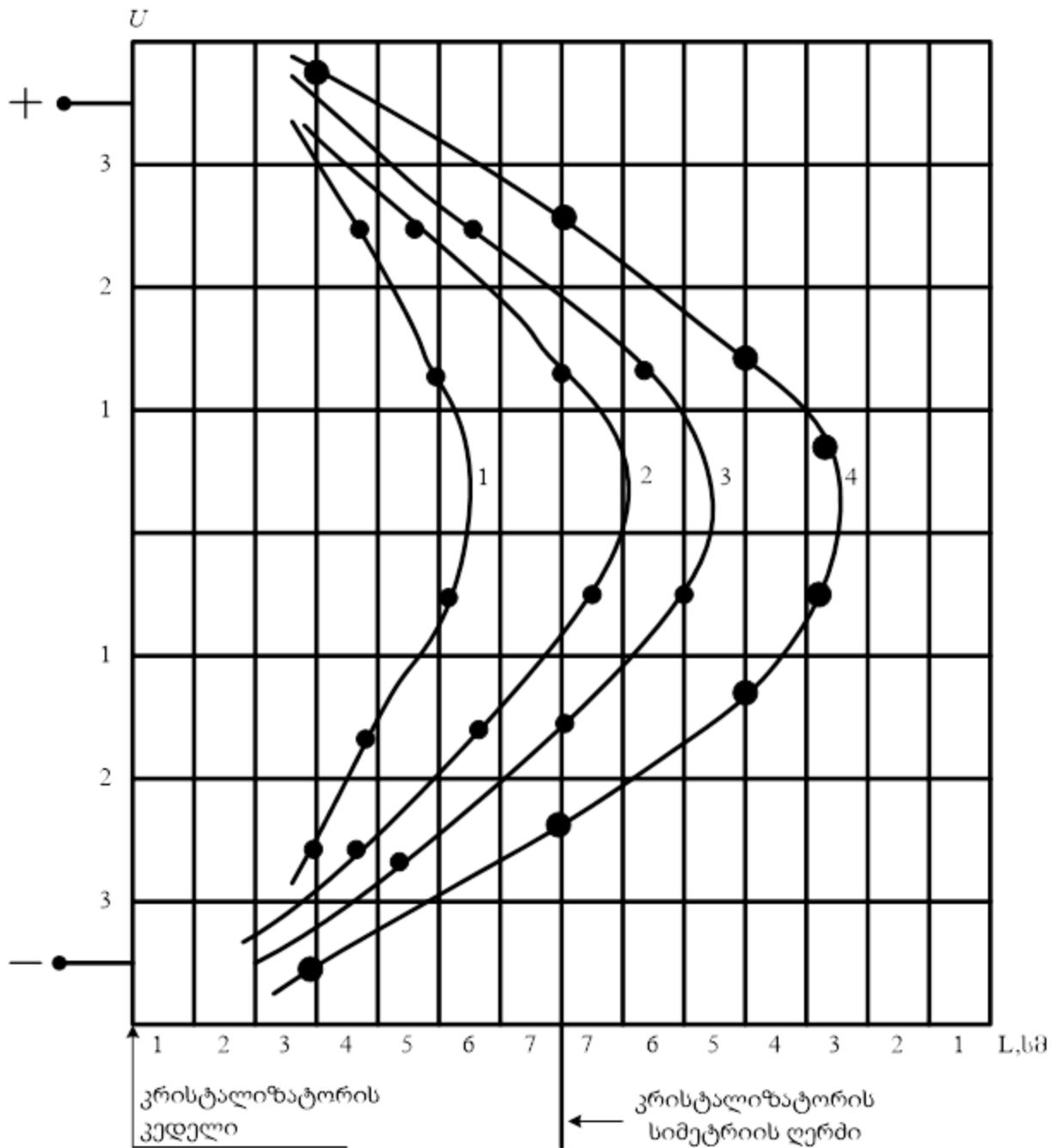
№	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორის სიმაღლეზე შუახაზიდან, მმ	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორის ძირის გასწვრივ და მათში პოტენციალის მნიშვნელობები (ვოლტი)											შენიშვნა	
		3	4	5	6	7	7	6	5	4	3	2		1
1	4	3,5	2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	კრისტალიზატორის შუახაზიდან და ლერძიდან პოტენციალის განაწილება სიმეტრიული
2	3	3,4	3	2,4	2	1,14	1,14	0,7	0,7	0	0	0	0	
3	2	2,5	2	2	1,8	1,2	1,2	0,8	0,6	0,5	0,2	0	0	
4	1	2,4	2	2	1,4	1	1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0	
5	1	2,4	2	2	1,4	1	1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0	
6	2	2,5	2,1	2	1,8	1,2	1,2	0,8	0,6	0,5	0,1	0	0	
7	3	3,4	2,6	2,6	2	1,7	1,2	0,7	0,6	0	0	0	0	
8	4	3,5	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

ცხრილი 3.4

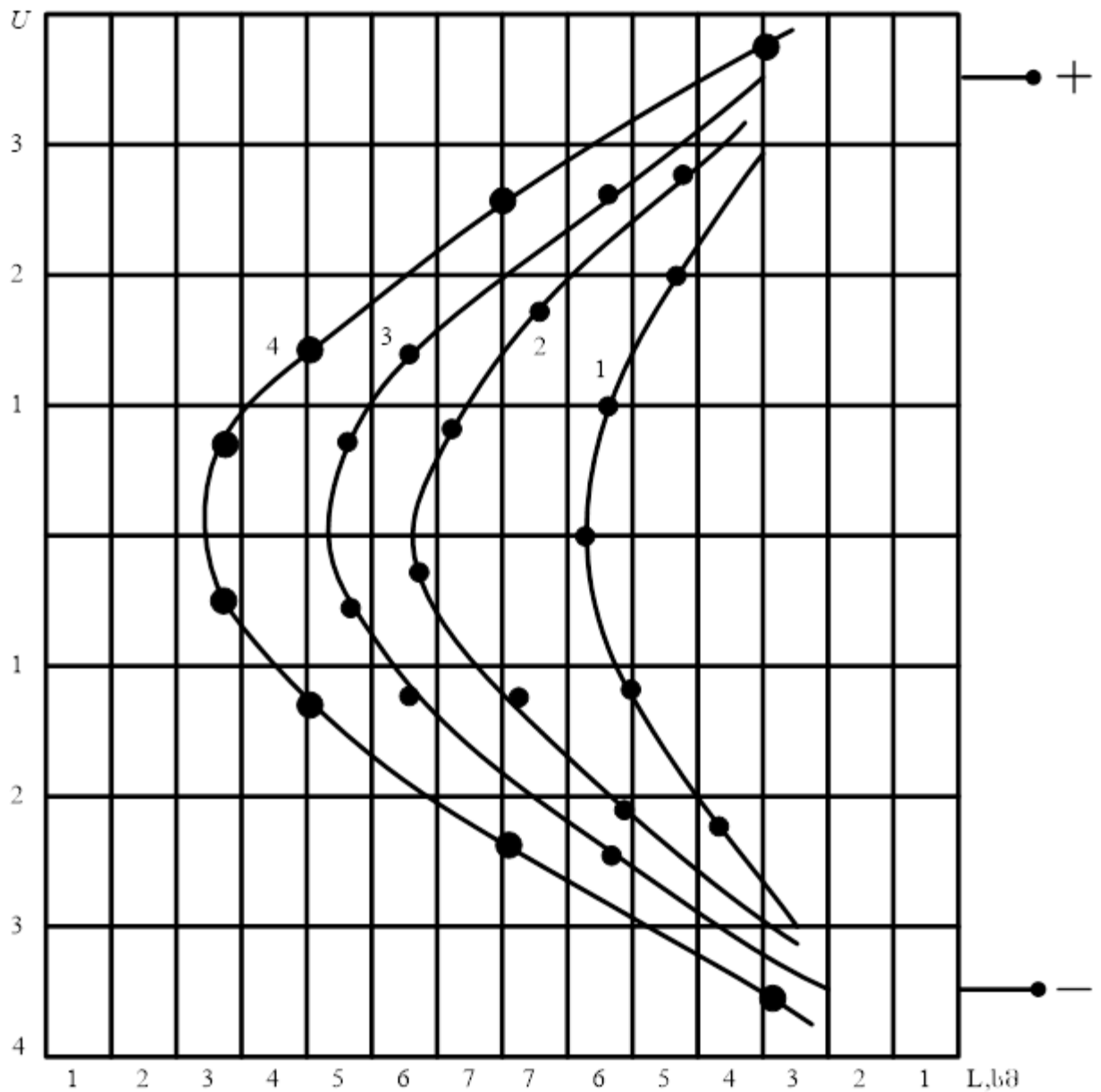
პოტენციალის განაწილება მოდელზე, როცა დენი მიყვანილია მარჯვენა დენმიმყვანთან

№	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორ -ის სიმაღლეზე შუა ხაზიდან, მმ	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორის ძირის გასწვრივ და მათში პოტენციალის მნიშვნელობები (ვოლტი)											შენიშვნა	
		3	4	5	6	7	7	6	5	4	3	2		1
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2	3,5	კრისტალიზატორის შუახაზიდან და ღერძიდან პოტენციალის განაწილება სიმეტრიული
2	3	0	0	0	0	0,7	0,7	1,14	1,1	2	2,4	3	3,4	
3	2	0	0	0,2	0,5	0,6	0,8	1,2	1,2	1,8	2	2	2,5	
4	1	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1	1	1,4	2	2	2,4	
5	1	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1	1	1,4	2	2	2,4	
6	2	0	0	0,1	0,5	0,6	0,8	1,2	1,2	1,8	2	2,1	2,5	
7	3	0	0	0	0	0,6	0,7	1,2	1,7	2	2,6	2,6	3,4	
8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	3,5	

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ამ ზონაში მიეწოდება გადასადნობი ლითონის ელექტროდი. იგი გადადნობისათვის საჭირო სითბოს დეზულობს აღნიშნული თხევადი წიდის არადენგამტარი სივრციდან (მაგ. *abc* - ზონიდან, როცა კრისტალიზატორზე მოდებული ძაბვა 4 ვ-ია). აღნიშნულის გამო, ელექტროწიდური გადადნობისას არადენგამტარი სივრცის ტემპერატურა უფრო დაბალი ხდება, ვიდრე წიდის ტემპერატურა კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში. ეს კი უარყოფითად მოქმედებს მიღებული სხმულის სისუფთავესა და საჭირო სტრუქტურის ფორმირებაზე. აღნიშნული დეფექტებისაგან სხმულის ხარისხის გაუმჯობესება შესაძლებელი იქნება იმ შემთხვევაში, თუ კრისტალიზატორის ცენტრში წიდის ტემპერატურა იქნება არანაკლები, ვიდრე კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში.



სურ. 3.6. ექსპერიმენტული მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია. მოდელზე დენი მიყვანილია არადნობადი ელექტროდების მარცხენა ზედა და ქვედა დენმიმყვანებთან. შემთხვევა, როცა მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვა
 1 - $U=4\text{ვ}$; 2 - $U=3\text{ვ}$; 3 - $U=2\text{ვ}$; 4 - $U=1\text{ვ}$.

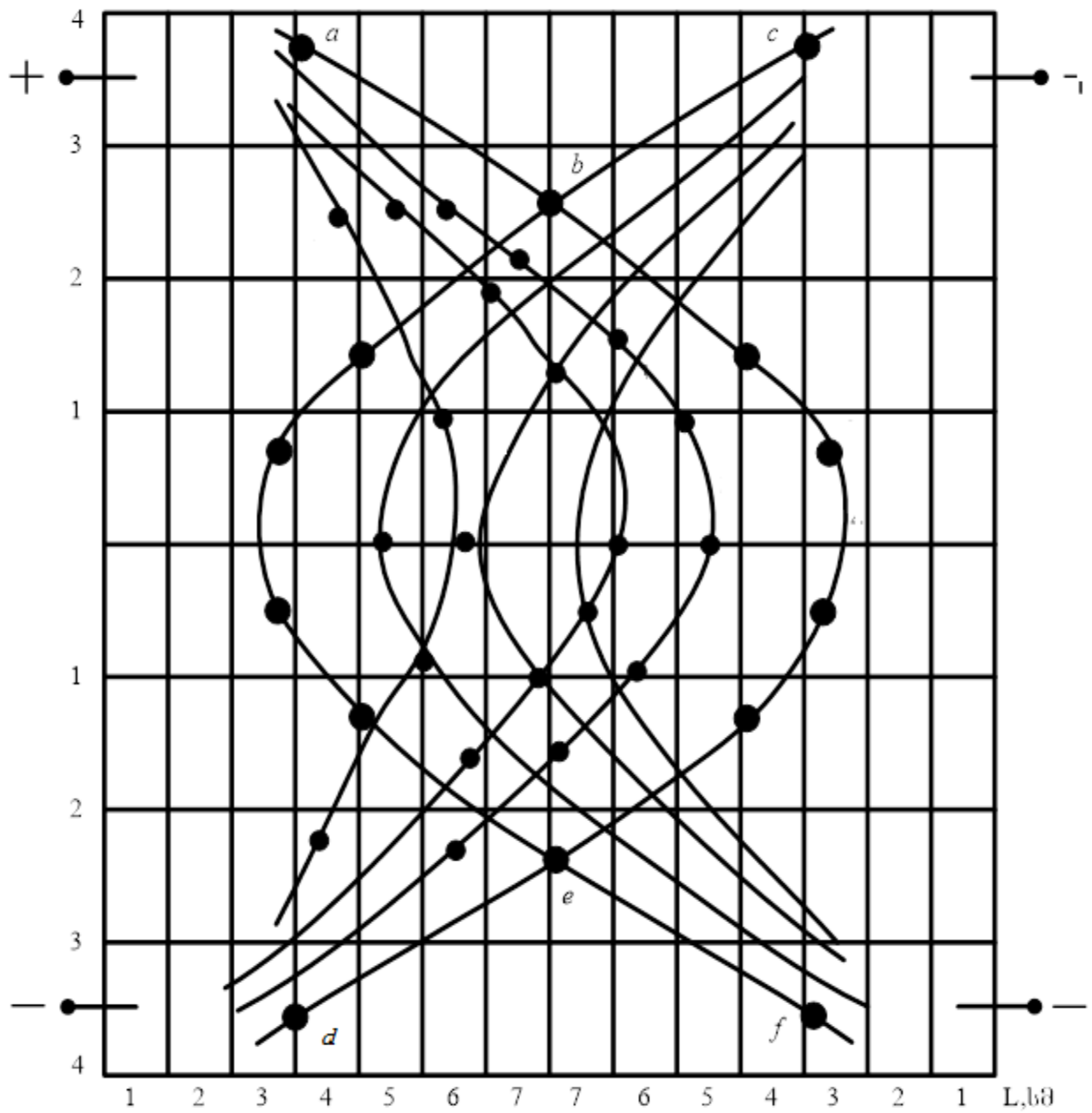


სურ. 3.7. ექსპერიმენტული მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია.

მოდელზე დენი მიყვანილია მარჯვენა ზედა და ქვედა დენმიმცვანებთან.

შემთხვევა, როცა მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვა

1 - $U=4$ ვ; 2 - $U=3$ ვ; 3 - $U=2$ ვ; 4 - $U=1$ ვ.



სურ. 3.8. ექსპერიმენტული დამოკიდებულებების მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია, როცა მოდელზე დენი მიყვანილია ერთდროულად მარჯვენა და მარცხენა მომჭერებთან.

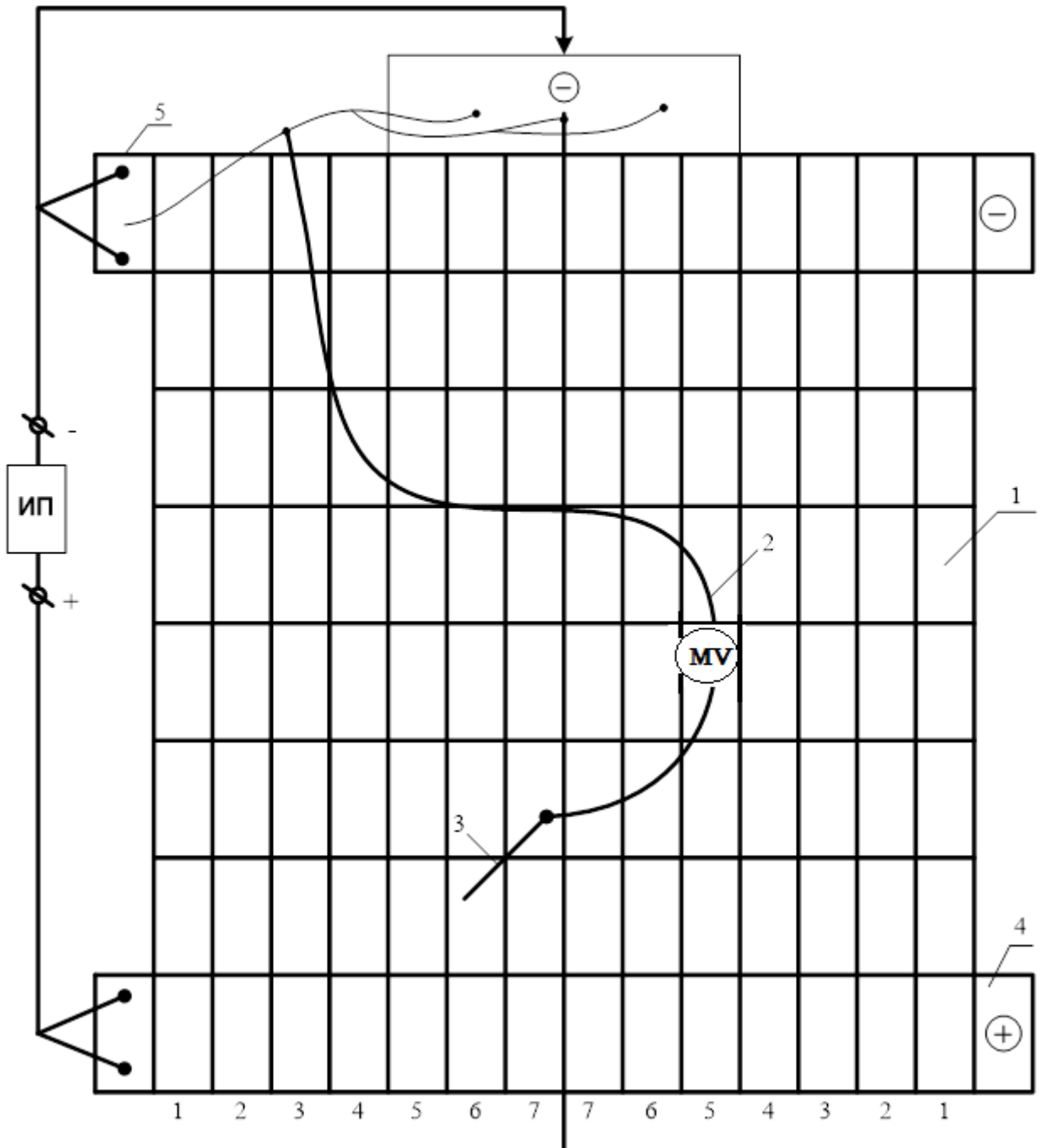
გამოკვლევები აჩვენებს, რომ დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობისას პოტენციალის განაწილება წიდაში გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალური ტემპერატურა მიიღწევა კრისტალიზატორის ღერძის მახლობლობაში, იგი მცირდება კრისტალიზატორის ცენტრიდან კედლისაკენ [52,65,77,78].

არადნობადი ელექტროდებით ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში ტემპერატურული ველის გათანაბრება შესაძლებელია, როცა დნობადი ელექტროდი ამავე დროს არის ელექტრული დენის გამტარი. მოდელის მიხედვით, პოტენციალის კვლევის შედეგები, როცა მოდელზე დენი ერთდროულად მიყვანილია ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდზე (იხილ. სურ. 3.10 და სურ. 3.11).

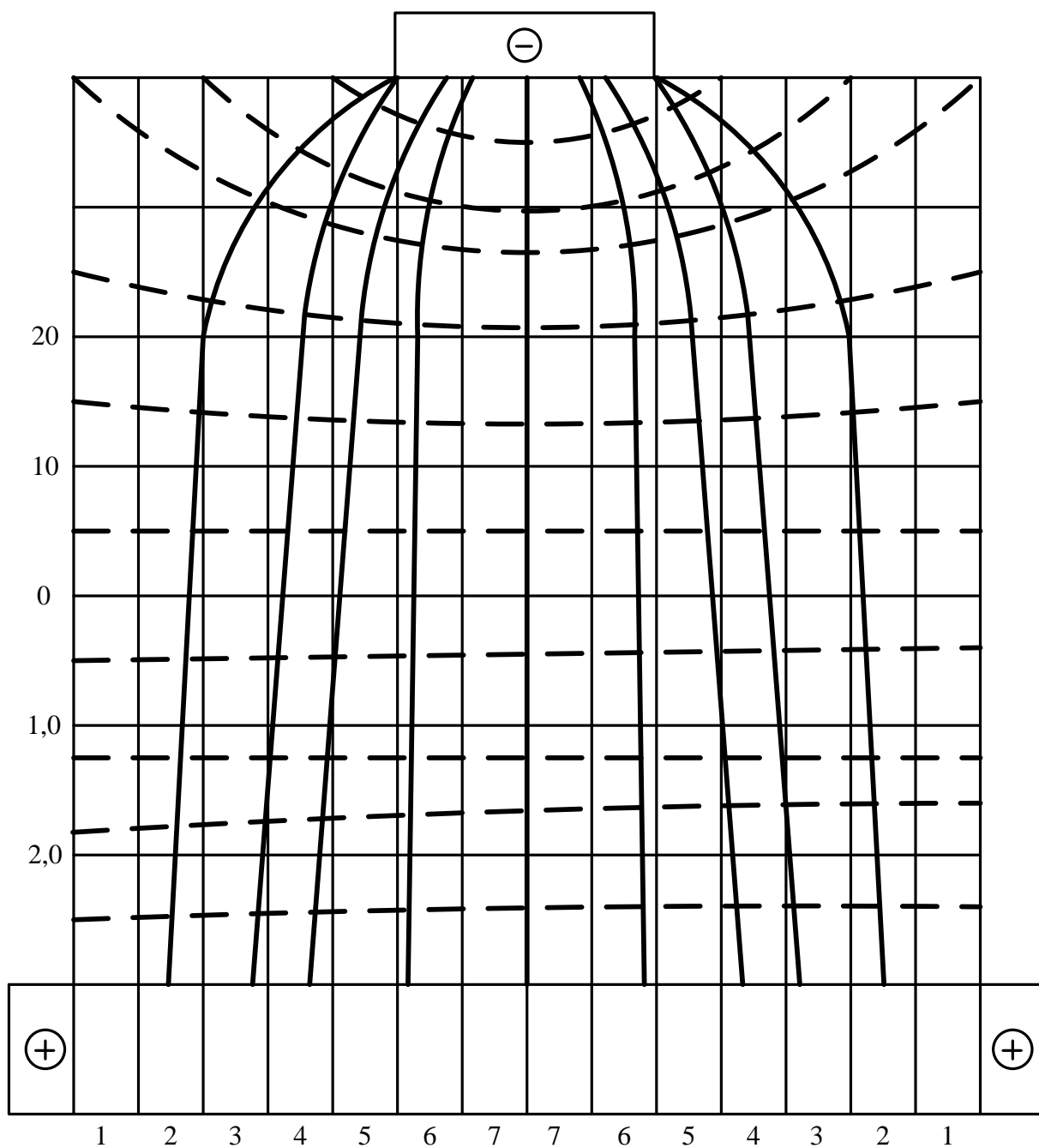
სურ. 3.9-ზე წარმოდგენილია ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის ორგანზომილებიანი მოდელი, იმ შემთხვევისათვის, როცა დნობადი ელექტროდი წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო სითბოს წყაროს დენგამტარს; მოდელში აღნიშნულის გამო, დნობად ელექტროდზე დენის წყაროს ერთ-ერთი მომჭერია მიერთებული, ხოლო მეორე მომჭერი მიერთებულია ქვედა არადნობად ელექტროდის მარჯვენა და მარცხენა მომჭერებთან. მოდელის მიხედვით, განსაზღვრული ექვიპოტენციალური ხაზები და დენის ხაზები (სურ. 3.10) მიუთითებს იმაზე, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქციის მიხედვით, დენის ხაზები ძირითადად გადის კრისტალიზატორის ცენტრში. რაც იმის მანიშნებელია, რომ გადადნობისათვის საჭირო დენით სითბოს ინტენსიობით გამოყოფა ხდება კრისტალიზატორის ცენტრალურ ნაწილში. ხოლო კრისტალიზატორის კედლებთან სითბო გადაეცემა წიდის თბოგამტარობით. თუ გავითვალისწინებთ გამოკვლევების შედეგებს, რომლის ანალიზიც შესაძლებელი გახდა სურ. 3.8-ზე წარმოდგენილი დენის ხაზების მიხედვით, მაშინ, აშკარაა, რომ არადნობადი ელექტროდიანი კრისტალიზატორის ახალ კონსტრუქციაში, მიზანშეწონილია ელექტრული ველის წიდის მოცულობაში გათანაბრება, და ამის შესაბამისად ტემპერატურული ველის წიდის მოცულობაში გათანაბრება შესაძლებელი იქნება, თუ ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდებზე კვების წყაროდან ერთდროულად მიერთებული იქნება ერთი და იგივე მომჭერი. ხოლო მეორე მომჭერი მიერთებული

იქნება ქვედა არადნობად ელექტროდთან. სურ. 3.9-ზე წარმოდგენილია კრისტალიზატორის შესაბამისი ორგანზომილებიან ფიზიკური მოდელი, ხოლო მისი კვლევის შედეგები წარმოდგენილია სურ. 3.11-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ დენი ელექტროწიდური გადადნობის ახალი არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში თანაბრადაა გადანაწილებული, როგორც კრისტალიზატორის ცენტრში, ასევე კრისტალიზატორის კედლებთან, რაც შესაძლებელს ხდის კრისტალიზატორის აღნიშნულ სივრცეში მოხდეს Ip დენის გავლით სითბოს გამოყოფა და შესაბამისად ტემპერატურული ველის გათანაბრება. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სფეროში გამოკვლევები [73,74,75,76] აჩვენებს, რომ გადამდნარი სხმულის თვისებები და სისუფთავე დამოკიდებულია გამდნარი წიდის ტემპერატურაზე. ამიტომ შემოთავაზებული კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და მისი დანადგარში შეერთების ელექტრული სქემა საშუალებას იძლევა მიღებული იქნას სხმული არანაკლები მაღალი თვისებების და სისუფთავის, ვიდრე დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობის სხმულია.

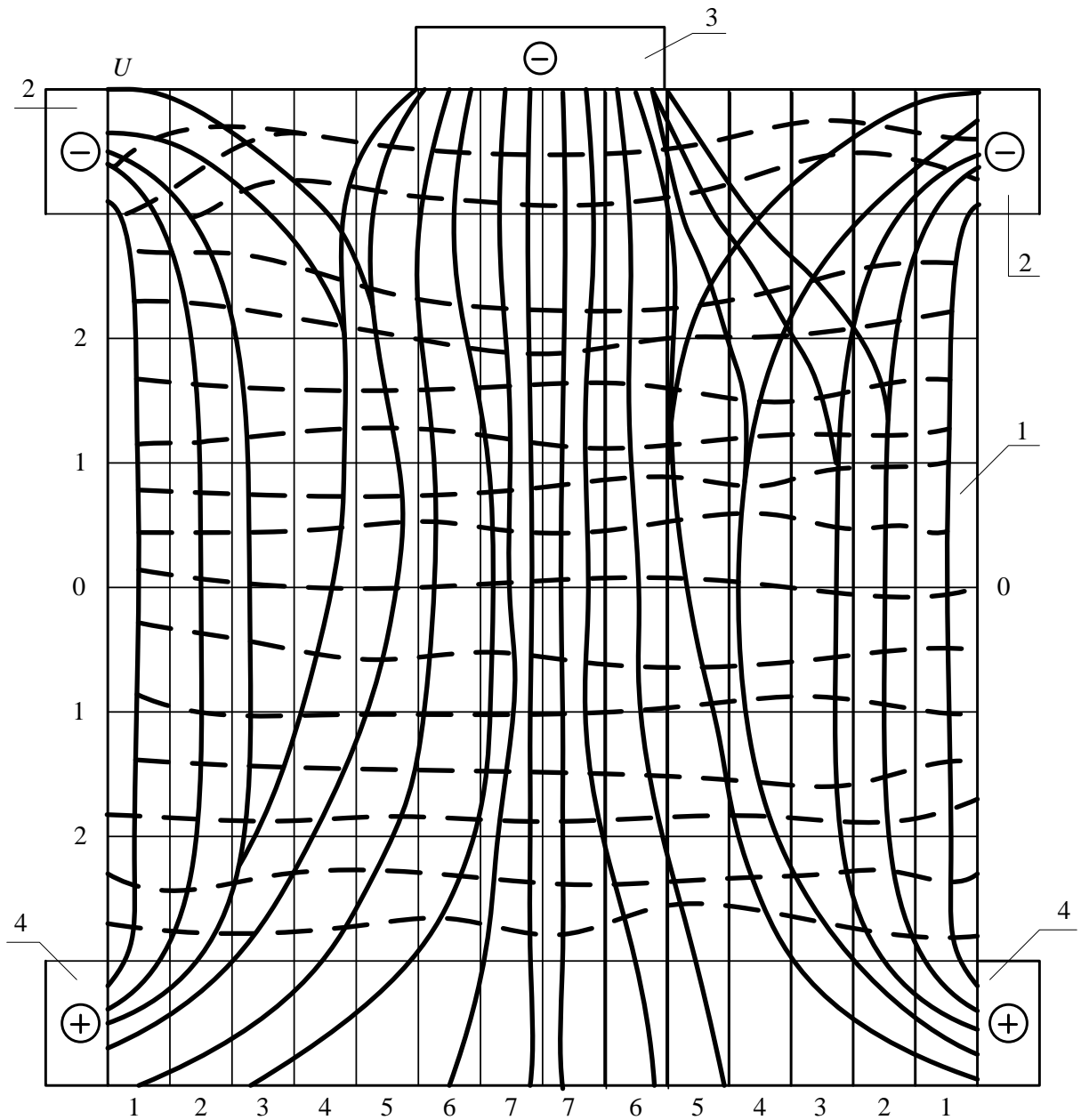
ამრიგად, ორგანზომილებიანი მოდელით ლითონების, ელექტროწიდური გადადნობის ელექტრული კვლევის შედეგად შემუშავებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და დანადგართან მისი შეერთების ორიგინალური სქემა.



სურ. 3.9. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი, ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდზე დენის ერთდროულად მიყვანის სქემა



სურ. 3.10. ელექტროწიდური გადადნობისას პოტენციალის განაწილება წიდაში, როცა პოტენციალი დენის წყაროდან მოდებულა დნობად ელექტროდზე (წყვეტილი ხაზი - ექვი-პოტენციალური ხაზი; მთლიანი ხაზი - დენის ხაზები)



სურ. 3.11. ფიზიკური მოდელის კვლევის მიხედვით წიდაში პოტენციალის განაწილება, როცა პოტენციალი დენის წყაროდან ($U=1$ ვ) მოდებულია არადნობად და დნობად ელექტროდებზე. 2, 4 - ზედა და ქვედა არადნობადი ელექტროდების მარჯვენა და მარცხენა დენმიმცვანები, 1,3 - მოდელის ფურცელი და დნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი.

3.4 ელექტრული ველის კვლევა მათემატიკური მოდელით

განხილული იყო ელექტრული ველის ფიზიკური მოდელით კვლევა, არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორისათვის, როგორც აქტიური წინაღობის მქონე ელექტროტექნოლოგიური პროცესისათვის. როგორც ავტორები მიუთითებენ მათემატიკური მოდელით აქტიური წინაღობის მქონე პროცესების ელექტრული ველის კვლევისას შესაძლებელია მიღებული იქნას უფრო მაღალი სიზუსტის შედეგი. იგულისხმება, მათემატიკური მოდელით კვლევისას, გამორიცხულია ფიზიკური მოდელით კვლევისათვის დამახასიათებელი პოტენციალის გაზომვის ცდომილება, როგორც ობიექტური ასევე სუბიექტური ხასიათის.

ქვემოთ განხილულია ელექტრო კონტაქტური შედუღებისას ელექტრული ველის კვლევა ელექტროგამომთვლელი ტექნიკის გამოყენებით.

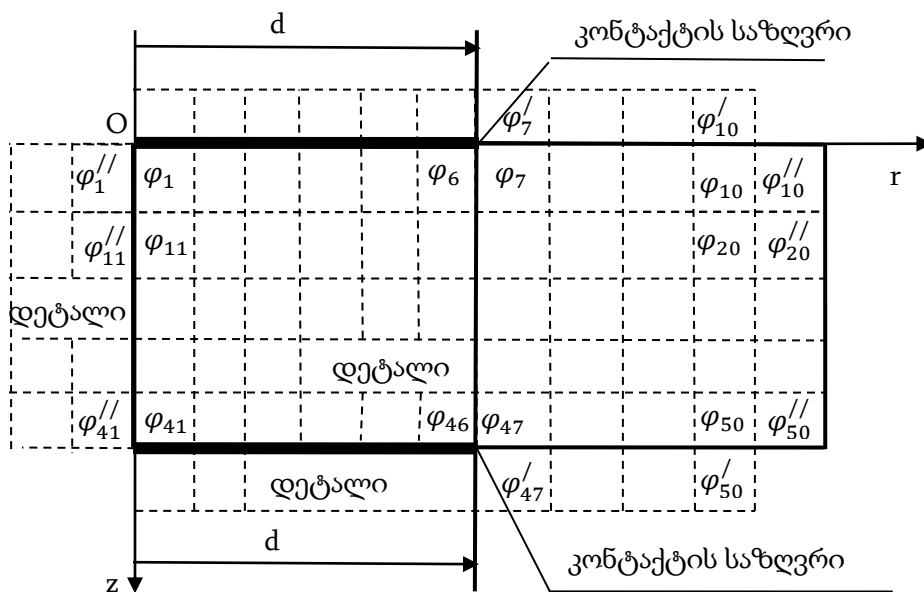
ელექტრული ველი შესადუღებელ დეტალში და აგრეთვე მოსალოდნელია წიდის აბაზანაში ელექტროწიდური გადადნობისას აღიწერება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებით.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{p} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{p} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{p r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (3.1)$$

ელექტრული ველი არის პოტენციალის φ -ს ერთობლიობა შესადუღი დეტალების სხვადასხვა წერტილში და დროის სხვადასხვა მომენტში. აქედან გამომდინარე მისი მათემატიკური აღწერილობა გაცილებით რთული იქნება ვიდრე (3.1) წარმოდგენილი გამოსახულებაა. ამ შემთხვევაში წარმოდგენილია ელექტრული პოტენციალის ცვლილება r, z ღერძების გასწვრივ, დროის მოცემულ კონკრეტულ მომენტში. დროის აღნიშნული მომენტი შეიძლება შეესაბამებოდეს ელექტროკონტაქტური შედუღების დასაწყისს, დასასრულს, ბირთვში ლითონის სრული გადადნობის მომენტს, შესაბამისად შესაძლებელი ხდება ამ ეტაპზე მიმდინარე პროცესების ანალიზი. განტოლებაში (3.1) გათვალისწინებულია ხვედრით წინაღობა (ρ) შესადუღებელი დეტალის ცალკეულ წერტილებში. თუმცა ამის გათვალისწინება მნიშვნელოვნად ართულებს (3.1) ამოხსნას, ამიტომ დაშვებულია, რომ შესადუღებელი დეტალის ცალკეულ წერტილებში წინაღობა უცვლელია $\rho = const$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (3.2)$$

განტოლება (3.2) ამოხსნას ართულებს იმის გათვალისწინება, რომ განუწყვეტლივ იცვლება შედუღების რეჟიმის პარამეტრები, შესაძლებელი მასალის თვისებები და შედუღების პროცესის სასაზღვრო პირობები. გაანგარიშებები შედარებით მარტივდება თუ ვისარგებლებთ (3.2) განტოლების ამოხსნის მიახლოებით რიცხვით მეთოდს ე.წ. სასრული სხვაობების მეთოდს. მიღებული კერძო წარმოებულნი დიფერენციალური განტოლების $\varphi(r, z)$ საძიებელი ფუნქციის პოტენციალის მიმართ, რიცხვითი ამოხსნისათვის ვისარგებლოთ სასრულ-სხვაობიანი მეთოდით [52, 65, 77, 78]. სიმეტრიის გამო ამოცანა შეგვიძლია ამოვხსნათ ფირფიტის მეოთხედი ნაწილისათვის. დავწეროთ სხვაობიანი სქემა, რომელიც მიახლოებით აღწერს (3.2) კერძოწარმოებულნი დიფერენციალურ განტოლებას. ამისათვის აუცილებელია არგუმენტების უწყვეტი ცვლილების არე შევცვალოთ მისი დისკრეტული ცვლილების არედ. მოცემულ შემთხვევაში ეს განვახორციელოთ შემდეგნაირად. საანგარიშო არე დავყოთ კვადრატებად: r კოორდინატით $h = 0.1$ სიგრძის ტოლი ინტერვალებით და z კოორდინატით, ასევე, $h = 0.1$ სიგრძის ტოლი ინტერვალებით (სურ. 3.12): $r_i = ih$, ($i=0, 1, 2, \dots, m$), $z_j = jh$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n$).



სურ: 3.12 სასრული ელემენტებში გაანგარიშების სქემა

$\varphi(z, r)$ საძიებელი ფუნქციის რიცხვითი მნიშვნელობები (i, j) კვანძში აღნიშნება $\varphi_{i,j}$ -ით. (3.1) განტოლებაში შემავალი საძიებელი ფუნქციის კერძო წარმოებულები წარმოვადგინოთ სასრულ-სხვაობიანი სახით:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{h^2}, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h^2}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2h}$$

ამ აღნიშვნებში (3.1) კერძო წარმოებულებიანი დიფერენციალური განტოლება ასეთ სახესღებულობს:

$$4\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j+1} + \left(1 + \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i+1,j} + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j-1} \quad (3.3)$$

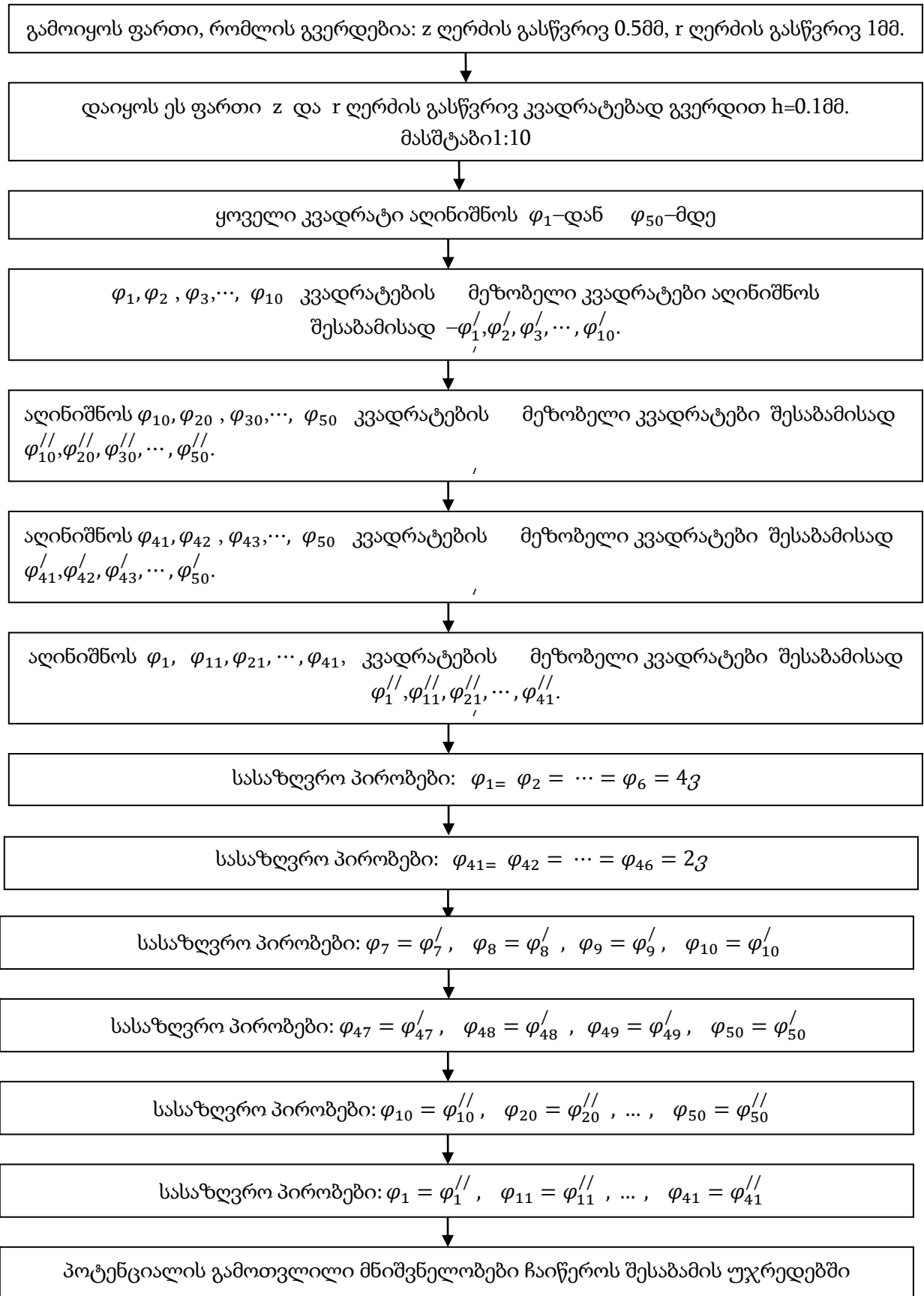
გაშლილი სახით:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\varphi_{1,1} = \varphi_{1,2} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,1} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,1} + \varphi_{1,0} \\ 4\varphi_{1,2} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,2} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,2} + \varphi_{1,1} \\ 4\varphi_{1,3} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,3} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,3} + \varphi_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ 4\varphi_{m,n} = \varphi_{m,n+1} + \left(1 + \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m+1,n} + \left(1 - \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m-1,n} + \varphi_{m,n-1} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

დასმული ამოცანისათვის ჩავწეროთ სასაზღვრო პირობები:

$i = 0 \dots 6$, $\varphi_{i,0} = 4z$, $j = 0 \dots 6$, $\varphi_{4,j} = 2z$. საზღვრის დანარჩენ ნაწილზე გვაქვს: $i = 7 \dots 10$, $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$, $j = 7 \dots 10$, $\varphi_{4,j} = \varphi'_{4,j}$. z ღერძის მიმართ სიმეტრიის გამო, გვაქვს: $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$, $\varphi_{i,10} = \varphi''_{i,10}$, $i = 1 \dots 4$.

შევადგინოთ ბლოკ-სქემა:

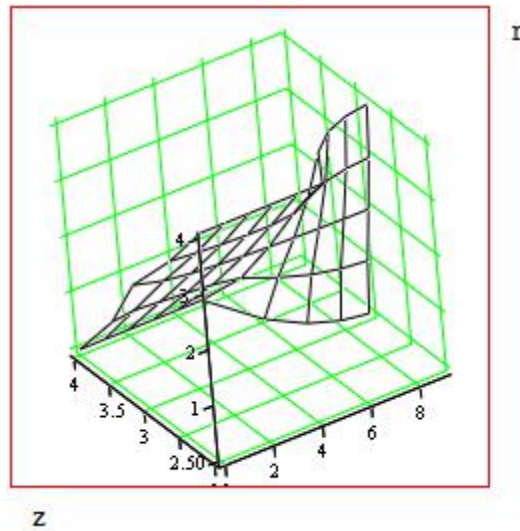


სურ. 3.13 სასრული ელემენტებში გაანგარიშების ბლოკ-სქემა.

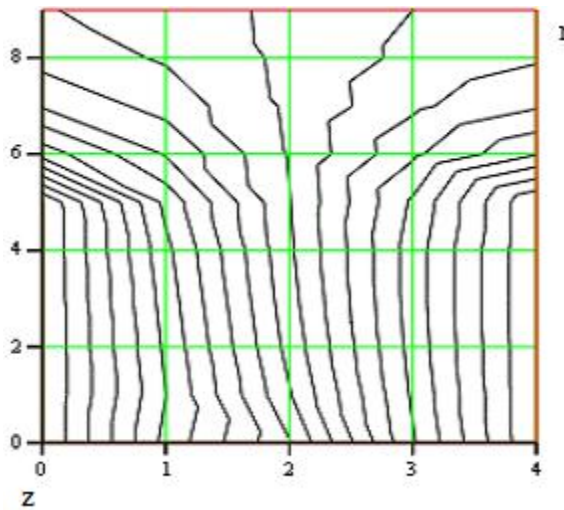
მოცემული სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემის რიცხვითი ამოხსნა მოვახდინოთ MathCAD მათემატიკურ სისტემაში.

ცხრილი 3.5 მათემატიკური მოდელით გაანგარიშების შედეგები

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi =$	4	4	4	4	4	4	3.457	3.191	3.061	3.007
1	3.469	3.503	3.48	3.455	3.428	3.371	3.192	3.062	2.989	2.956
2	3.108	3.01	2.965	2.938	2.918	2.905	2.893	2.884	2.878	2.875
3	2.512	2.484	2.463	2.451	2.452	2.483	2.619	2.719	2.775	2.8
4	2	2	2	2	2	2	2.406	2.611	2.713	2.755



სურ: 3.14 პოტენციალის განაწილების გრაფიკს (ზედაპირს) აქვს სახე:



სურ: 3.15 პოტენციალის კონტურული გრაფიკი

(3.2) დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის შედეგები ცხ 3.5, სურ.3.15 გვიჩვენებს:

1. ექვიპოტენციალური ხაზების ზიგზაგისებური ფორმა გაწრფივდება და შესაბამისად ამონახსნის სიზუსტე გაიზრდება თუ საანგარიშო არეში დაყოფის კვადრატების გვერდებს z და r ღერძის გასწვრივ უფრო შევამცირებთ.
2. ელექტროდების დიამეტრის შიგ მოქცეულ ფართში პოტენციალის განაწილება თანაბარია და აქ ხდება სითბოს ძირითადი ნაწილის გამოყოფა.
3. დიამეტრის გარე სივრცეში პოტენციალის მნიშვნელობები r -ს ზრდასთან ერთად მცირდება, შემდეგ კი ნულს უახლოვდება.

პოტენციალის განაწილების ექვიპოტენციალური ხაზების მიხედვით შედუღების არეში დენის გავლის შესაძლო სქემა ფიზიკურად ახსნადია. დენის მაქსიმალური სიმკვრივე შეინიშნება ელექტროდსა და დეტალის კონტაქტის პერიფერიულ ნაწილში [1]. ამრიგად, სასრული სხვაობის მეთოდით ელექტრული ველის გაანგარიშება ელექტროკონტაქტური შედუღებისას იძლევა საკმარის სიზუსტეს ამ დროს მიმდინარე პროცესების სწორი ანალიზისათვის, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ ეს მეთოდი შეიძლება გამოყენებული იქნას აქტიური წინაღობის მქონე სხვა ელექტროტექნოლოგიების დამუშავებისას, მაგ. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დამუშავებისათვის.

დასკვნა

1. მსოფლიოს მრავალი ქვეყნის მეცნიერთა გამოკვლევების და ჩვენი წინასწარი კვლევების ანალიზის საფუძველზე დადგენილი იქნა, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში: წვეთის წარმოქმნაზე, წარმადობაზე, მ.ქ.კ-ზე, გადადნობილი ლითონის სხმულის თვისებებზე მოქმედი ფაქტორებიდან არსებითია თხევად წიდაში მოქმედი ელექტრული ველი (დენის განაწილების სურათი) და მისი კვლევა მიზანშეწონილია ორგანზომილებიანი ფიზიკური მოდელის საშუალებით.
2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას, თხევად წიდაში, ელექტრული ველის კვლევისათვის დამუშავებული იქნა არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ორგანზომილებიანი ფიზიკური მოდელი. იგი წარმოადგენს: უჟანგავი ფოლადისაგან X18H9T დამზადებულ თხელ ფურცელს (1 მმ-მდე სისქის), რომელსაც გააჩნია დენმიმყვანები არადნობად ელექტროდებთან და დნობადი ელექტროდთან. ფურცლის ზომები ტოლია არადნობად ელექტროდებიანი კრისტალიზატორის შიგა სივრცის ღერძის გასწვრივ კვეთის ზომების და მასში დენის წყაროდან გადადნობის დენის თანაზომადი დენის გატარებისას. მისი ცალკეული წერტილის პოტენციალს საზღვრავენ შუპისა და მილვოლტმეტრის საშუალებით.
3. მოდელის არადნობადი ელექტროდების მარჯვენა, ასევე მარცხენა დენმიმყვანებთან, აგრეთვე ერთდროულად მარჯვენა და მარცხენა დენმიმყვანებთან, დენის წყაროს მიერთებისას განსაზღვრული იქნა კრისტალიზატორის კედლიდან უახლოესი წერტილების მდებარეობა, რომელშიც პოტენციალი ნულის ტოლია. დნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში კრისტალიზატორის ღერძის მახლობელ სივრცეში წიდაში კონცენტრაცია დაბალია. ამ სივრცის მოცულობა დამოკიდებულია არადნობად ელექტროდებზე გადადნობის პროცესში

მოდებული ძაბვის სიდიდეზე. აღნიშნულ მოცულობაში ტემპერატურული ველი განპირობებულია წიდის თბოგამტარობით.

4. მოდელის მიხედვით, ელექტრული ველის კვლევამ აჩვენა, რომ არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ღერძის მახლობლობაში წიდაში დენის დაბალი კონცენტრაცია შესაძლებელია აღმოფხვრილი იქნას როცა გადადნობის პროცესში ზედა არადნობადი და დნობად ელექტროდი მიერთებულია ერთდროულად დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერთან. რაც უზრუნველყოფს გადადნობის დენის ერთდროულად გავლას როგორც ზედა არადნობად, ასევე დნობად ელექტროდში.
5. მოდელით არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქციის და სქემის კვლევით დადგენილი იქნა ფორმის კოეფიციენტის გაზრდა დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდურ გადადნობის შემთხვევასთან შედარებით.
6. წიდის აბაზანაში პოტენციალის განაწილების ანალოგიური სურათი იქნა მიღებული პროცესის მათემატიკური მოდელირებით, ამიტომ მომავალში ელექტრული ველის კვლევები შეიძლება შესრულდეს ელექტროწიდური გადადნობისას პროცესის მათემატიკური მოდელის გამოყენებით.

თავი 4.

ელექტროწიდური გადადნობის მასალების (საელექტროდო მავთული) გამოყენება სხვადასხვა კონსტრუქციების შედულება-დადულებისას

შენადული შეერთებისას ხარისხი მნიშვნელოვნად განაპირობებს კონსტრუქციების საიმედოობას და ეკონომიურობას. შენადული შეერთების ხარისხი კი შედულების პროცესთან დაკავშირებული რიგი ფაქტორების ერთობლიობით განისაზღვრება; მათ შორის ძირითადი და დამხმარე მასალების ქიმიური შედგენილობით და მექანიკური თვისებებით, მასალების სისუფთავით (მავნე მინარევები), შედულების რეჟიმებით, მათი შედულების შემდგომი თერმიული დამუშავებით და ა.შ.

ხშირად ზემოთხსენებული ფაქტორების ოპტიმალური ვარიანტის შერჩევის და გამოყენების მიუხედავად შენადული შეერთებაში გვხვდება სხვადასხვა სახის დეფექტები (ცივი და ცხელი ბზარები, ფორები, არალითონური ჩანართები, კოროზიული დასკდომა და სხვა).

ზემოთ ჩამოთვლილი დეფექტებიდან განსაკუთრებული გავლენა შენადული შეერთების ხარისხზე აქვს ცივი და ცხელი ბზარების ტიპის დეფექტებს.

აღნიშნული სახის დეფექტების წარმოქმნის ალბათობა მნიშვნელოვნად იზრდება მაღალი სიმტკიცის ფოლადების შედულებისას და განსაკუთრებით აქტუალურია ნახშირბადის რაოდენობის, მავნე მინარევების კარბიდწარმომქმნელი ელემენტების რაოდენობის ზრდისას შენადულ შეერთებაში. ამის მაგალითები ხშირად გვაქვს მომეტებული და მაღალი სიმტკიცის ფოლადებისაგან დამზადებული კონსტრუქციების შედულება-დადულებისას (ნავთობგაზსადენები, ცისტერნები, რეზერვუარები, რკინიგზის ტრანსპორტის მოძრავი შემადგენლობის ცვეთაზე მომუშავე დეტალები).

4.1. ცხელი (კრისტალიზაციური) ბზარები შენადულ კონსტრუქციებში

კრისტალიზაციური ბზარების დამახასიათებელ თვისებად მათი კრისტალთშორისი რღვევა ითვლება. ისინი მჭიდროდ არიან დაკავშირებული შენადული შეერთების პირველად სტრუქტურასთან და განლაგებული არიან სვეტოვანი კრისტალიტების გასწვრივ.

მიმართულების მიხედვით კრისტალიზაციური ბზარები გვხვდება როგორც გრძივი, ასევე განივი. გრძივი ბზარები შეიძლება განლაგებული იყოს ნაკერის ღერძის მიმართულებით სვეტისმაგვარი კრისტალიტების პირისპირს ან მეზობელ კრისტალებს შორის. ხშირად გვხვდება ისეთი დეფექტები, რომლებიც გრძივი და განივი ბზარების კომბინაციას წარმოადგენს.

რკალური შედუღების დროს კრისტალიზაციური ბზარები შეიძლება ამოდიოდნენ ან არ ამოდიოდნენ ნაკერის ზედაპირზე. ზედაპირზე ამომავალი ბზარები ადვილი აღმოსაჩენია ვიზუალური დაკვირვებით და მათ მოლურჯო ფერი აქვთ, რადგან მათი ზედაპირი დაფარულია ჟანგეულობის თხელი ფენით.

ბზარები უმრავლეს შემთხვევაში დაუშვებელ დეფექტებად ითვლება, რადგან შეიძლება გახდნენ მყიფე, დაღლილობითი და კოროზიული რღვევის მიზეზი კონსტრუქციების დამზადების ან მათი ექსპლუატაციის პროცესში.

კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის პროცესში ნაკერის ლითონი გამყარების პროცესში გადის ე. წ. კრისტალიზაციის ეფექტურ ინტერვალს, რომელშიც ლითონი იმყოფება თხევად-მყარ მდგომარეობაში. ეს ინტერვალი იწყება დენტრიტების გადახლართვით და შეზრდით ხისტ კარკასში და მთავრდება ლითონის გამყარებით. იმის გამო, რომ ნაკერის ლითონი თხევად-მყარ მდგომარეობაში ხასიათდება მომეტებული სიმყიფით ამ ინტერვალის სიხისტის ტემპერატურულ ინტერვალს უწოდებენ [62] სიმყიფის ინტერვალის ქვედა ზღვრის გადალახვისას ნაკერის ლითონის პლასტიკური თვისებები მომენტალურად უმჯობესდება. ამ ტემპერატურული ინტერვალის სიდიდე განისაზღვრება ნაკერის ლითონის ქიმიური შედგენილობით.

ნაკერის ლითონის გამყარების პროცესი მიმდინარეობს გამჭიმავი ძაბვების არსებობის პირობებში, რომელიც წარმოიქმნება შესადულებელი ლითონის არათანაბარი გახურება-გაციების, დეტალების ხისტი ჩამაგრების და ნაკეთის ლითონის გამწვანებული ჩაჯდომის გამო.

გამჭიმავი ძაბვების არსებობა იწვევს ნაკერის ლითონის პლასტიკურ დეფორმაციას და მისი ზრდის ინტენსივობა მით მეტია, რაც უფრო ნაკლებია ტემპერატურა. თუ შემცირებული პლასტიკურობის პერიოდში (სიმყიფის ტემპერატურული ინტერვალი) დეფორმაციის სიდიდე მეტი აღმოჩნდება ვიდრე ლითონის პლასტიკურობა წარმოიქმნება კრისტალიზაციური ბზარები და თუ დეფორმაციის სიდიდე ნაკლები იქნება ვიდრე ლითონის პლასტიკურობა ბზარები არ წარმოიქმნება.

ნაკერის ლითონის წინააღმდეგობა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ სხვადასხვა ერთმანეთთან დაკავშირებული ფაქტორებით განისაზღვრება.

შედულება-დადულების ტექნოლოგიების დამუშავებისას მიღებულია, რომ ნაკერის ლითონის წინააღმდეგობა ცხელი (კრისტალიზაციური) ბზარების წარმოქმნის მიმართ დამოკიდებულია შემდეგ ფაქტორებზე. ნაკერის ლითონის კრისტალიზაციის პროცესში წარმოქმნილი გამჭიმავი ძაბვების სიდიდეზე და განვითარების სიჩქარეზე; ნაკერის ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე; ნაკერის ლითონის ფორმაზე; პირველადი კრისტალების სიდიდეზე და სხვა.

გამჭიმავი ძაბვების გავლენა. რკალური შედულების პირობებში თითქმის შეუძლებელია მთლიანად გავანეიტრალეთ გამჭიმავი ძაბვების გავლენა შენადული ნაკერის კრისტალიზაციის პროცესში მყოფ ლითონზე. ამიტომ ეფექტური პროცესი დაკავშირებული ამ ძაბვების მხოლოდ შემცირებასთან, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს პლასტიკური დეფორმაცია და შენადული ნაკერის რღვევამდე მიყვანა.

ძირითად ტექნოლოგიურ საშუალებას გამჭიმავი ძაბვების წარმოქმნის და გავრცელების წინააღმდეგ შესადულებელი დეტალების წინასწარი გახურება წარმოადგენს. წინასწარი გახურების ტემპერატურა, რომლის დროსაც არ შეიმჩნევა ბზარების წარმოქმნა დამოკიდებულია, ნაკერის ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე, შესადულებელი დეტალების კონსტრუქციაზე და იცვლება 150–500°C-ის ფარგლებში.

ნაკერის ლითონის ქიმიური შედგენილობის გავლენა. ნაკერის ლითონის ქიმიური შედგენილობა ყველაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობაზე. ყველა ელემენტი, რომელიც შედიან ნაკერის ლითონის შემადგენლობაში, შეიძლება დაყოფილი იქნეს სამ პირობით ჯგუფად.

პირველი და ჩვენთვის ყველაზე მნიშვნელოვანი ჯგუფებია – ელემენტები, რომელთა არსებობაც მნიშვნელოვნად ამცირებს ნაკერს ლითონის წინააღმდეგობის კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ. მიღებულია, რომ ასეთ ელემენტებს უწოდებენ მავნეს და მათ პირველ რიგში მიეკუთვნება გოგირდი და ფოსფორი.

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება ელემენტები, რომელთა არსებობა ნაკერის ლითონში კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით იწვევს დადებით ან უარყოფით გავლენას, ცხელი ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობაზე.

მესამე ჯგუფი – ელემენტები, რომელთა არსებობა არ ახდენს გავლენას ნაკერის ლითონის წინააღმდეგობაზე კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ.

ჩვენ კვლევებში განსაკუთრებული ყურადღება დავუთმეთ გოგირდისა და ფოსფორის უარყოფით გავლენას.

გოგირდი – მავნე მინარევია, მისი ზრდა ნაკერის ლითონის შემცველობაში მკვეთრად ამცირებს ნაკერის ლითონის წინააღმდეგობას კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ. გოგირდი მყარ რკინაში ფაქტიურად არ იხსნება და ნაკერში იმყოფება არალითონური სულფიდური ჩანართის სახით. კრისტალიზაციური ბზარების გოგირდისაგან წარმოქმნის უშუალო მიზეზი ადვილდნობადი სულფიდური ჩანართებია, რომელიც განლაგებული არიან ნაკერის ლითონის კრისტალიტების საზღვრებზე. გოგირდის კრიტიკული შემცველობა ნაკერის ლითონში, რომლის ზემოთაც შეინიშნება (წარმოიქმნება) კრისტალიზაციური ბზარები დამოკიდებულია გამჭიმავი ძაბვების სიდიდეზე, ნაკერის ფორმაზე და მის ქიმიურ შემადგენლობაზე, პირველ რიგში ნახშირბადის შემცველობაზე. სურ. 4.1.–ზე ნაჩვენებია გოგირდის კრიტიკული შემცველობის დამოკიდებულება ნახშირბადის და მანგანუმის შემცველობაზე ნაკერის ლითონში [55]. გოგირდი ნაკერის ლითონში გადადის

ძირითადი და საელექტროდო ლითონიდან, მასალებიდან, რომლებიც ელექტროდის დაფარვაშია და ფლიუსიდან.

მოქმედი სტანდარტების თანახმად, გოგირდის შემცველობა საკონსტრუქციო ფოლადებში არ უნდა აღემატებოდეს 0,05% რეალურად კი 0,03–0,04%-ს. გოგირდის რაოდენობის შემცირება ფოლადებში და საშემდუღებლო მასალებში აღნიშნულ დონესთან შედარებით შესაძლებელია, მაგრამ დაკავშირებულია ფოლადის გამოდნობის ღირებულების გაზრდასთან.

ეკონომიკური მოსაზრებიდან გამომდინარე უკეთესია გოგირდის რაოდენობის შემცირება საშემდუღებლო მასალებში, მათ შორის საშემდუღებლო მავთულში. სტანდარტი ГОСТ 2246 ზღუდავს გოგირდის შემცველობის დაბალანახშირბადიან და ლეგირებულ საშემდუღებლო მავთულებში 0,04-0,02 ზღვრებში. ზოგიერთ მაღალლეგარებულ საშემდუღებლო მავთულში გოგირდის შემცველობა შეზღუდულია 0,015%-მდე. შეზღუდულია გოგირდის შემცველობა ელექტროდის დაფარვაში და ფლიუსში.

ფოსფორი ხშირად ახდენს უარყოფით გავლენას ნაკერის ლითონში კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობაზე და იწვევს დარტყმითი სიბლანტის მკვეთრ შემცირებას, განსაკუთრებით დაბალი ტემპერატურის პირობებში. ფოსფორის გავლენა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნაზე პირდაპირ პროპორციულ დამოკიდებულებაშია ნაკერის ლითონში ადვილდნობადი ფოსფორშემცველი ჩანართების შემცველობისა. ასეთი ჩანართების შემცველობა მით მეტია, რაც მეტია ფოსფორის კონცენტრაცია და მისი ხსნადობა მყარ ლითონში.

იმის გამო, რომ ფოსფორის ხსნადობა აუსტენიტში ნაკლებია, ვიდრე ფერიტში, კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის საშიშროება აუსტენიტურ ნაკერის ლითონში გაცილებით მეტია. თუ კრისტალიზაციის სხვადასხვა სტადიაზე აუსტენიტთან ერთად წარმოიქმნება ფერიტი ბზარების წარმოქმნის საშიშროება მცირდება. ფოსფორი ითვლება კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიზეზად ზოგიერთ საშუალოდლეგირებულ ფოლადში.

ფოსფორისა და გოგირდის უარყოფითი გავლენა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის პროცესზე, მათი ერთობლივი მოქმედების გამო მკვეთრად უარყოფითია იმის გამო, რომ ამ ელემენტებს ლიკვაცია ნაკერის ლითონში ერთმანეთს ემთხვევა.

ფოსფორი ნაკერის ლითონში ხვდება ძირითადი და საელექტროდო ლითონებიდან, მასალებიდან, რომლებიც შედიან ნახშირბადოვან ფოლადებში ფოსფორის შემცველობა დასაშვებია 0,55%-მდე, ხოლო ლეგირებულ ფოლადებში 0,03%-მდე. რეალურად ГОСТ 2246-70-ის თანახმად, ფოსფორის შემცველობა საშემდუღებლო მავთულში არ უნდა აღემატებოდეს 0,04%-ს.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, გოგირდისა და ფოსფორის კრიტიკული შემცველობა, რომელიც მკვეთრად ამცირებს კრისტალიზაციური ბზარებს წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობას, მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ძირითად და საელექტროდო ლითონში ნახშირბადის შემცველობაზე (სურ. 4.1). იმისათვის, რომ შემცირდეს ნახშირბადის შემცველობა ნაკერის ლითონში იყენებენ საელექტროდო მავთულის ნახშირბადის დაბალი შემცველობით. ამცირებენ ძირითადი ლითონის წილს ნაკერის ლითონში.

რადგან ნახშირბადი არის საკმაოდ იაფი და არადეფიციტური ელემენტი, რომელიც მნიშვნელოვნად ზრდის ნაკერის ლითონის სიმტკიცეს, შედუღების რაციონალური ტექნოლოგიის დამუშავება უნდა უზრუნველყოფდეს ნახშირბადის იმ მაქსიმალური რაოდენობის შემცველობას ნაკერის ლითონში, რომელიც არ გამოიწვევს კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობის შემცირებას.

4.2. კვლევის მეთოდика

ფოლადის სისუფთავის (გოგირდის და ფოსფორის შემცველობა) გავლენის შესასწავლად კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობაზე ექსპერიმენტალური კვლევა ჩატარდა მაღალნახშირბადიან 65Г ტიპის ფოლადზე, საშემდუღებლო მავთულებად გამოყენებული იყო CB.08×Г2CMΦ, CB.08×M სერიული

მავთულები და მეტალურგიის ინსტიტუტში ელექტროწიდური გადადნობის შედეგად მიღებული სხვადასხვა ქიმიური შედგენილობის (გოგირდისა და ფოსფორის შემცველობის მიხედვით) ლითონი, რომელთაგან ამავე ინსტიტუტში, შედულების განყოფილებაში დამზადდა საშემდულებლო მავთული დიამეტრით – 3მმ. სამწუხაროდ, CB.08M საშემდულებლო მავთულის ქიმიურმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ორივე ექსპერიმენტალურ ვარიანტში გოგირდის შემცველობა თითქმის ერთნაირი იყო, ამიტომ შემდგომში კვლევა ჩატარდა მხოლოდ Cb.08×Γ2CMΦ მარკის მავთულზე. ექსპერიმენტების დროს შედულებისას ვიყენებდით AH-348A ტიპის საშემდულებლო ფლიუსს.

ადრე ჩატარებულ კვლევებში [25,26,49] მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ საშემდულებლო მასალების ქიმიური შედგენილობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის და განვითარების პროცესზე. ხშირ შემთხვევაში ეს პროცესი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული შედულების ოპტიმალური რეჟიმის შერჩევასთან, მავნე მინარევების და ქიმიური შედგენილობის სხვა ელემენტების რაოდენობაზე. კვლევისათვის აღნიშნული ფოლადის არჩევა განაპირობა იმან, რომ ეს ფოლადი გამოიყენება რკინიგზის ტრანსპორტის მოძრავი შემადგენლობის გოგორათვლების დასამზადებლად და ამ გოგორათვლების დადულებით აღდგენის შემთხვევაში მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობის ამაღლებას, რაც გარდა მავნე მინარევებისა გართულებულია ნახშირბადის მაღალი შემცველობის გამო.

ნაშრომებში [25] ნაჩვენებია, რომ დეფორმაციის კრიტიკული მნიშვნელობა $V_{კრ}$. (რომლის დროსაც წარმოიქმნება ცხელი ბზარები) იზრდება შედულების დენის მნიშვნელობისას 300-300A და შედულების სიჩქარისას $V_{შედ} - 20$ მ/სთ. შედულების რეჟიმს ამ ოპტიმალური მნიშვნელობისათვის მნიშვნელოვნად იზრდება კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობა.

შედულების რეჟიმის ამ ოპტიმალური მნიშვნელობისათვის ექსპერიმენტალური კვლევა გავაგრძელებთ საშემდულებლო მასალების სხვადასხვა ქიმიური შედგენილობით (სერიული და გოგირდისა და ფოსფორის მცირე შემცველობით).

გოგორათვლის ფოლადის საშემდუღებლო მავთულების და საშემდუღებლო ფლიუსის ქიმიური შედგენილობა მოცემულია ცხ. 4.1, 4.2, 4.3–ში.

ცხრილი 4.1

გოგორათვლის ფოლადის ქიმიური შემადგენლობა

მასალა	ელემენტების შემცველობა, %				
	C	Si	Mn	S	P
გოგორათვლის ფოლადი	0,62	0,35	0,76	0,020	0,018

ცხრილი 4.2

საშემდუღებლო მავთულის ქიმიური შემადგენლობა

საშემდუღებლო მავთული	ელემენტების შემცველობა								
	C	Si	Mn	Gr	Mo	V	Ca	S	p
CB-08xΓ2CMΦ	0,08	0,68	1,80	1,16	0,64	0,22	0,05	0,025	0,018
CB-08xΓ2CMΦ (1)	0,08	0,58	1,72	1,14	0,60	0,22	0,05	0,016	0,014
CB-08xΓ2CMΦ (2)	0,06	0,57	1,76	1,20	0,61	0,21	0,05	0,010	0,09

ცხრილი 4.3

საშემდუღებლო ფლიუსის ქიმიური შემადგენლობა

მასალა ფლიუსი	შემცველობა, %								
	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	S	P
AH-348A	42,5	35,0	6,0	6,0	4,0	4,50	2,0	0,03	0,28

საშემდუღებლო მავთული CB-08xΓ2CMΦ და დნობადი ფლიუსი AH-348A წარმატებით გამოიყენება გოგორათვლების დადუღებით აღდგენისას, თუმცა კრასტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის ალბათობის შემცირება ჯერჯერობით ისევ აქტუალურია.

ექსპერიმენტებისათვის სამტრედიის სავაგონო დეპოში გოგორათვლებიდან ამოჭრილი იქნა 300 მმ სიგრძის ფრაგმენტები. შემდგომი მექანიკური დამუშავებით

გორვას ზედაპირზე ამოჭრილი იქნა V-ს მაგვარი ღარები შედუღებისას გამჭიმავი ძაბვების მნიშვნელობის გასაძლიერებლად (სურ. 4.2).

ნიმუშებზე ამოჭრილ ღარებში შედუღებას ვაწარმოებდით შემდეგ რეჟიმზე: $I_{შედ} - 300-320$, $ИГ34-36$ ვ., $V_{შედ} - 20$ მ/სთ, საელექტროდო მავთულის დიამეტრი $d_{ელ} - 3$ მმ.

შედუღების ეს რეჟიმები ოპტიმალურია გოგორათვლების დადებით ალდგენისას საწარმოო პირობებში. შედუღების რეჟიმის პარამეტრების შემცირებით იზრდება ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობა, მაგრამ მეორე მხრივ, შედუღების დენის სიდიდის გაზრდისას იზრდება მწარმოებლურობა, მაგრამ მნიშვნელოვნად მცირდება ბზარების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობა.

4.3. ნიმუშების შედუღების ტექნოლოგია

ექსპერიმენტები ჩატარებული იქნა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მშენებლობის მიმართულების ლაბორატორიაში.

წინასწარ გამზადებული ნიმუშები მეტი სიხისტისაა და გამჭიმავი ძაბვებს წარმოსაქმნელად ჩამაგრებული იქნა სპეციალური დამჭერებით (სურ. 4.3). როგორც ნიმუშებიდან ჩანს, ღარები ამოჭრილია მათი სისქის მხოლოდ მესამედ ნაწილზე, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს გამჭიმავი ძაბვების წარმოქმნის ალბათობას. ექსპერიმენტებისას ვგეგმავდით, რომ ნახშირბადის შემცველობა შენადული ნაკერში არ იქნებოდა 0,18% მეტი, რაც ახლოსაა რეალურ პირობებში გოგორათვლის ქიმზე დადუღებული ლითონის ქიმიურ შედგენილობაში ნახშირბადის შემცველობასთან.

თითოეულ ამოჭრილ ნიმუშზე ამოღებული იყო ორი ღარი. იმისათვის, რომ ექსპერიმენტების პირობები ყველა ნიმუშისათვის ყოფილიყო მაქსიმალურად ერთნაირი, შედუღების დაწყების წინ და დამთავრებისას ტემპერატურას ვამოწმებდით კონტაქტური თერმომეტრით TK-5.03 იმის გამო, რომ ნიმუშებს რკალის ფორმა ჰქონდათ, შედუღების პროცესში ელექტროდის შვერის სიგრძეს (მანძილს მუნდმტუკიდან შესადუღებელ დეტალეზამდე) ვარეგულირებდით ხელით. გარდა

ამისა, საშემდუღებლო ფლიუსს შედუღების დაწყების წინაც ვაყრიდით დეტალებზე და შედუღების პროცესში ვუმატებდით რკალის ზონის კარგად დასაცავად.

ამოჭრილ ღარებში შედუღებას ვაწარმოებდით, როგორც ერთი გავლით, ისე ღრეჩოს სრულ ამოვსებამდე (სურ. 4.4). ღრეჩოს ბოლომდე ამოვსებისას გამჭიმავი ძაბვების გასაძლიერებლად დადუღება ვაწარმოეთ გოგორათვლის ქიმზე. სამწუხაროდ, ვერ მოვახერხეთ გვერდითა ზედაპირის შლიფის მომზადება ნიმუშის დიდი ზომის გამო.

შედუღების ყველა შემთხვევაში ვაწარმოებდით საშემდუღებლო ავტომატით АДФ - 1202, რომელიც დაკომპლექტებული იყო კვების წყაროთი ВДУ-601. შედუღება ხდებოდა შებრუნებული პოლარობის დენით, რაც მნიშვნელოვნად ზრდიდა ჩადუღების სიღრმეს და ძირითადი ლითონის წილს შენადულ ნაკერში, რითაც კიდევ უფრო იზრდებოდა გოგირდისა და ფოსფორის გავლენა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნაზე ნახშირბადის მომეტებული შემცველობის გამო.

4.4. ნიმუშების მომზადება მეტალოგრაფიული კვლევისათვის და ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები

ნაკერის ლითონის სტრუქტურის და კრისტალიზაციური ბზარების დასადგენად იქნა გაკეთებული შლიფები შედუღებული ლითონიდან. ნიმუშები ამოჭრილი იქნა როგორც სერიული საშემდუღებლო მავთულით შედუღებული ლითონიდან ისე გოგირდისა და ფოსფორის შემცირებული შემცველობის (მავთული 1 და 2) მქონე შედუღებული ლითონიდან.

შედუღებული ლითონიდან ნიმუშებს ამოჭრა მოვახდინეთ t მექანიკური ხერხით და დავამუშავეთ საფრეზ და სახეხ ჩარხებზე. ნიმუშები კვლევისათვის მოწამლული იქნა 4%-ნი აზოტმჟავათი.

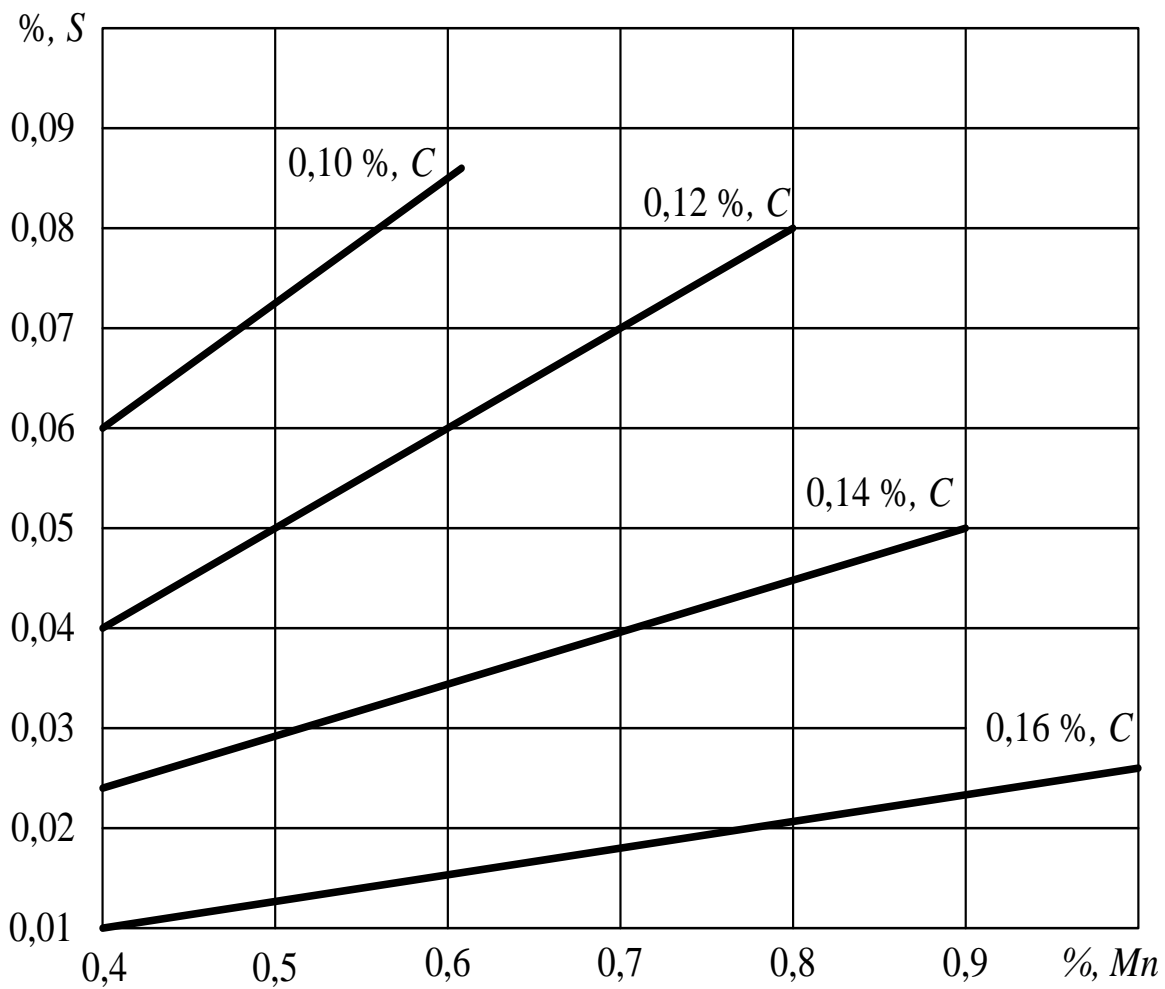
დამზადებული ნიმუშებიდან კვლევისათვის შერჩეული შლიფები ბზარებით და მის გარეშე.

შედულებული ლითონიდან ამოჭრილი ნიმუშების მაკრო და მიკროშლიფები საწყის ეტაპზე ბზარების არსებობის და რაოდენობის დასადგენად შემოწმებული იქნა გამადიდებელი შუშით. როგორც ვვარაუდობდით სერიული მავთულით ერთგავლიან შედულებულ ნიმუშებში აღმოჩნდა სხვადასხვა ზომის და რაოდენობის ბზარები. იმ ნიმუშებში, რომლებიც შედულებული იქნა დამატებითი ხისტი ჩამაგრების გარეშე ერთეული ბზარები აღმოჩნდა (სურ. 4.5 ბ), ხოლო იმ ნიმუშებში, რომლებიც შედულებული იქნა დამატებითი ხისტი ჩამაგრებით ბზარების რაოდენობა გაცილებით მეტი იყო (სურ. 4.5 ა). ჩვენი ვარაუდით ეს გამოწვეული იყო დამატებითი გამჭიმავი ძაბვების წარმოქმნასთან ხისტი ჩამაგრების გამო.

ნიმუშები ამოჭრილი და მომზადებული იქნა მრავალგავლიანი (დრეჩოს მთლიან შევსებამდე) სერიული მავთულით შედულებული ლითონიდან. როგორც ყველა სხვა შემთხვევაში პირველი გავლის შემდეგ ბზარები შედულებული ნაკერში სხვადასხვა ზომის და რაოდენობის აღმოჩნდა, ყოველი მომდევნო გავლისას წინა ფენაში არსებული ბზარების გადადნობა ხდებოდა, თან თვითმომუშავის გამო გამჭიმავი ძაბვების რაოდენობა კლებულობდა, მაგრამ ბოლო ფენაში მაინც გვხვდებოდა მავნე მინარევებისა და წიდური ჩანართების თავმოყრის ადგილები და ბზარები (სურ. 4.6, 4.7, 4.8).

გოგირდის შემცირებული შემცველობის მავთულით (მავთული 1) შედულებული ზოგიერთ ერთგავლიან ნიმუშზე ბზარები აღმოჩნდა არა მთელ სიგრძეზე, არამედ მის ცალკეულ მონაკვეთებზე (სურ. 4.9).

ნიმუშები, რომლებიც შედულებული იყო გოგირდის და ფოსფორის უფრო ნაკლები შემცველობის (მავთული 2) მქონე მავთულით ბზარები არც ერთ ნიმუშზე არ აღმოჩნდა (სურ. 4.10). ამ მავთულით შედულებული მრავალგავლიან ნიმუშებზე არ იქნა აღმოჩენილი წიდური ჩანართების და ბზარების კვალი, როგორც ეს სერიული მავთულით შედულებულსა იყო.



სურ. 4.1 ნაკერის ლითონში კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის პროცესზე გოგირდის დამოკიდებულება ნახშირბადისა და მანგანუმის შემცველობაზე



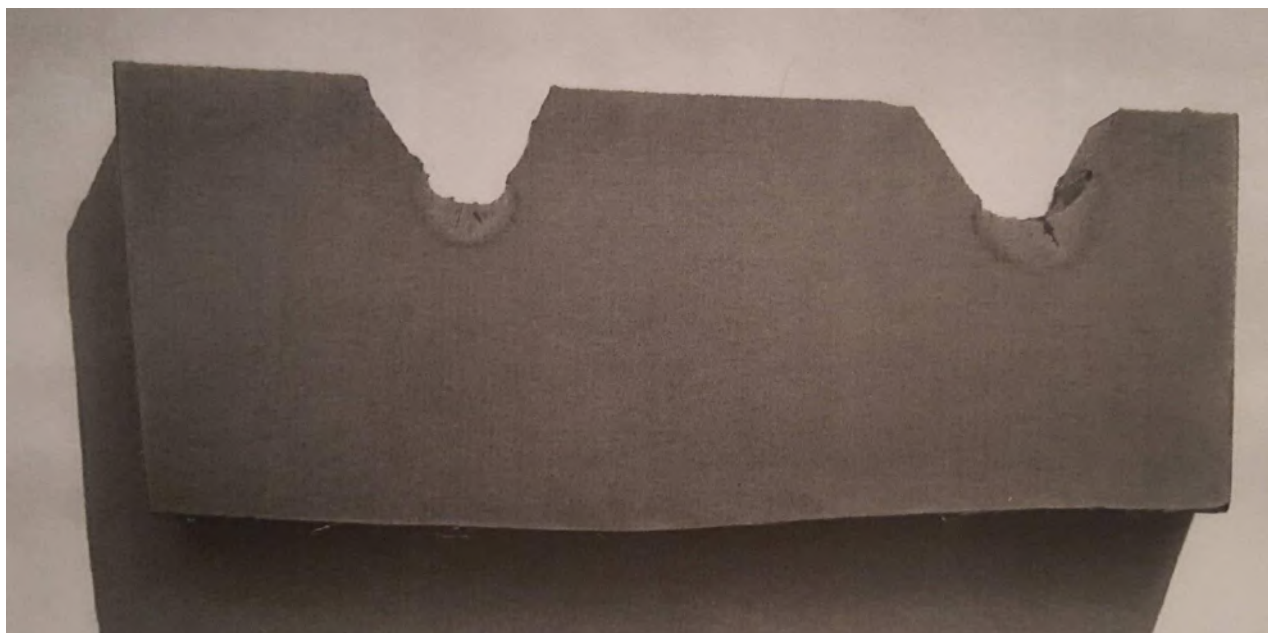
სურ. 4.2 გოგორათვალისანი ამოჭრილი ნიმუშის ფრაგმენტი შემდგომი მექანიკური დამუშავებისა და შედუღებისათვის



სურ. 4.3 მრავალგავლიანი შენადული ნაკერის ნიმუში და ამონაჭერი ჩამაგრებული სპეციალური დამჭერებით



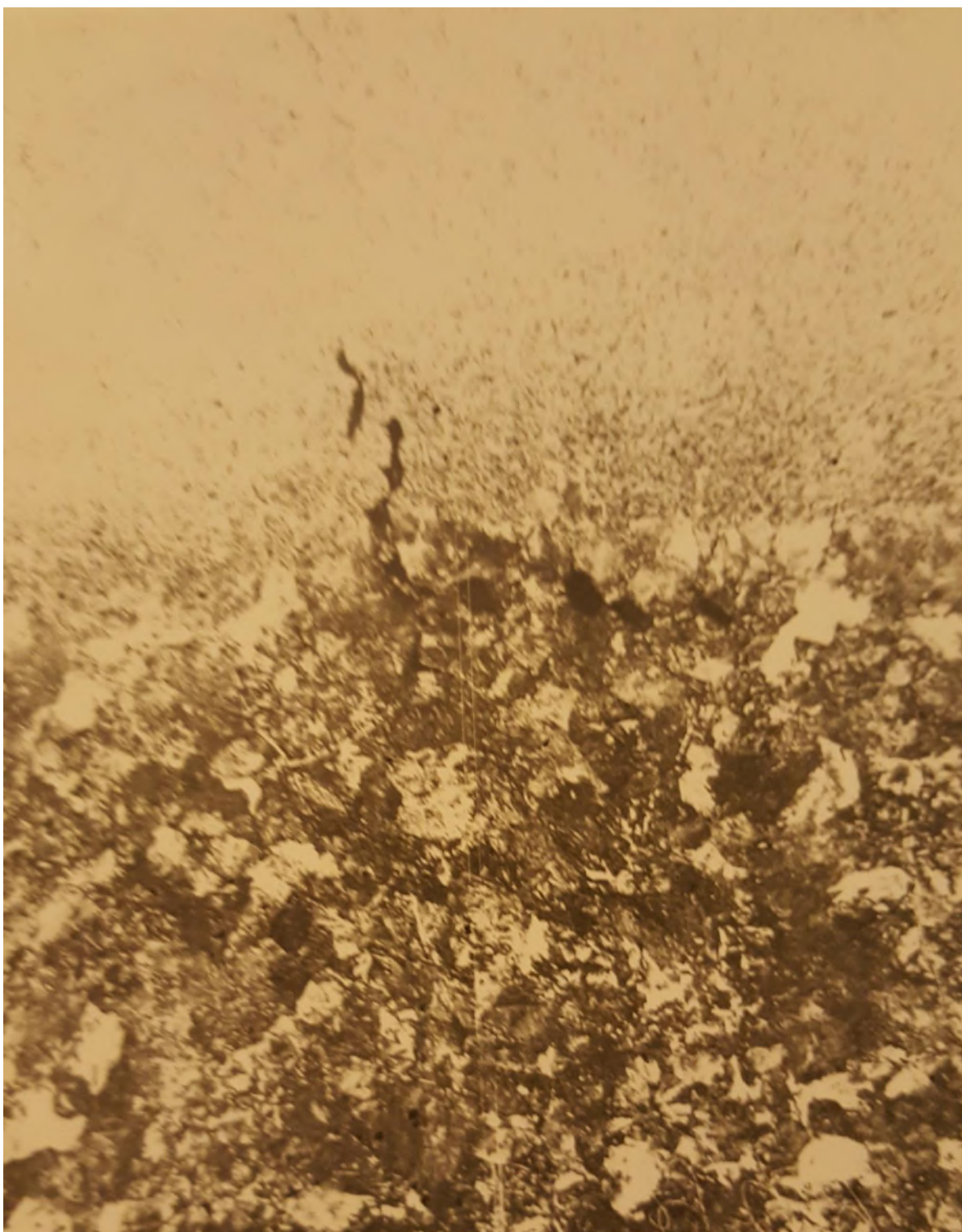
სურ. 4.4 სტენდი ნიმუშების შესადულებლად



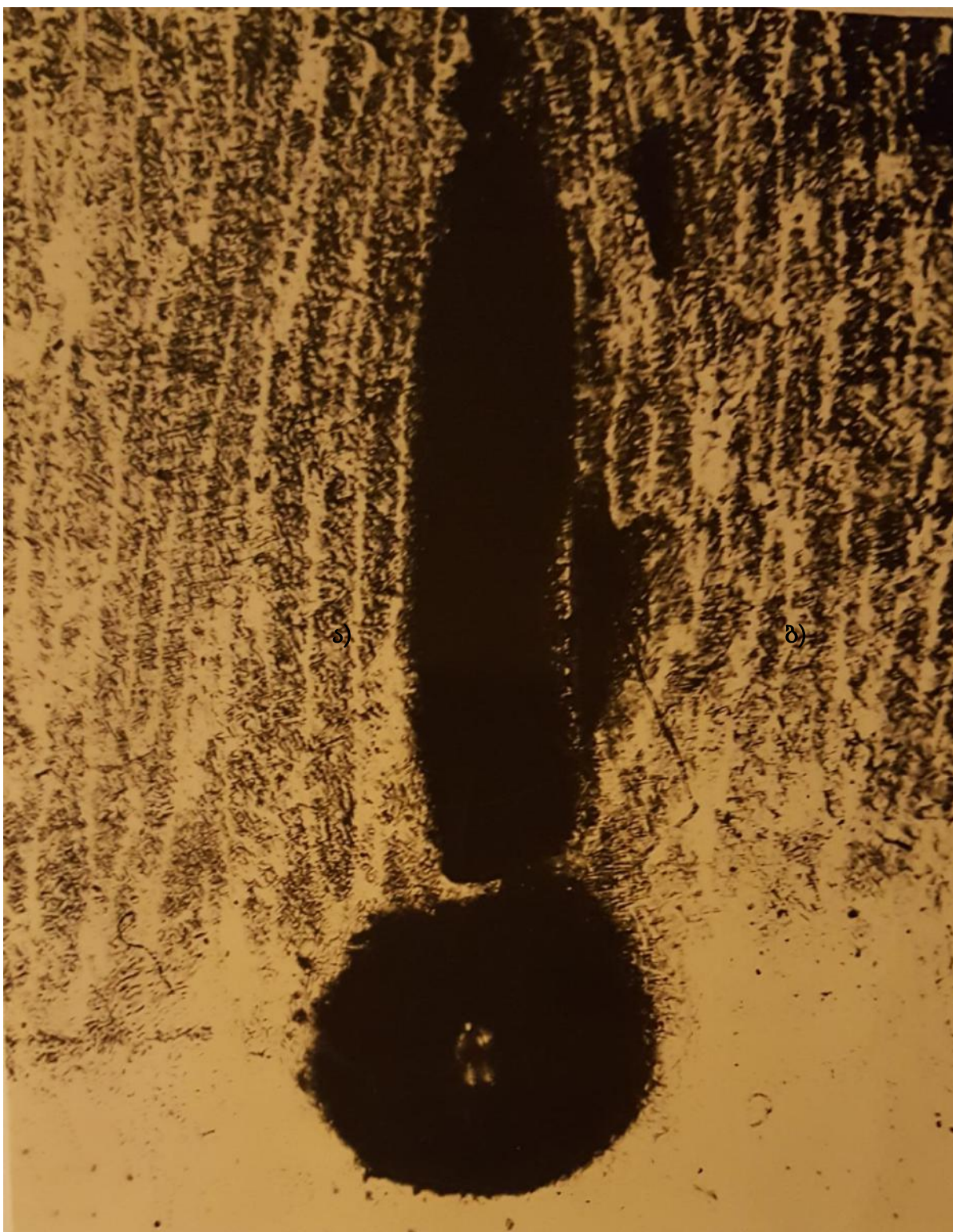
სურ. 4.5 კრისტალიზაციური ზნარები სერიული CB-08xΓ2CMΦ მავთული შედულებულ ნაკერის ლითონში: ა - ხისტი ჩამაგრებით; ბ - ხისტი ჩამაგრების გარეშე



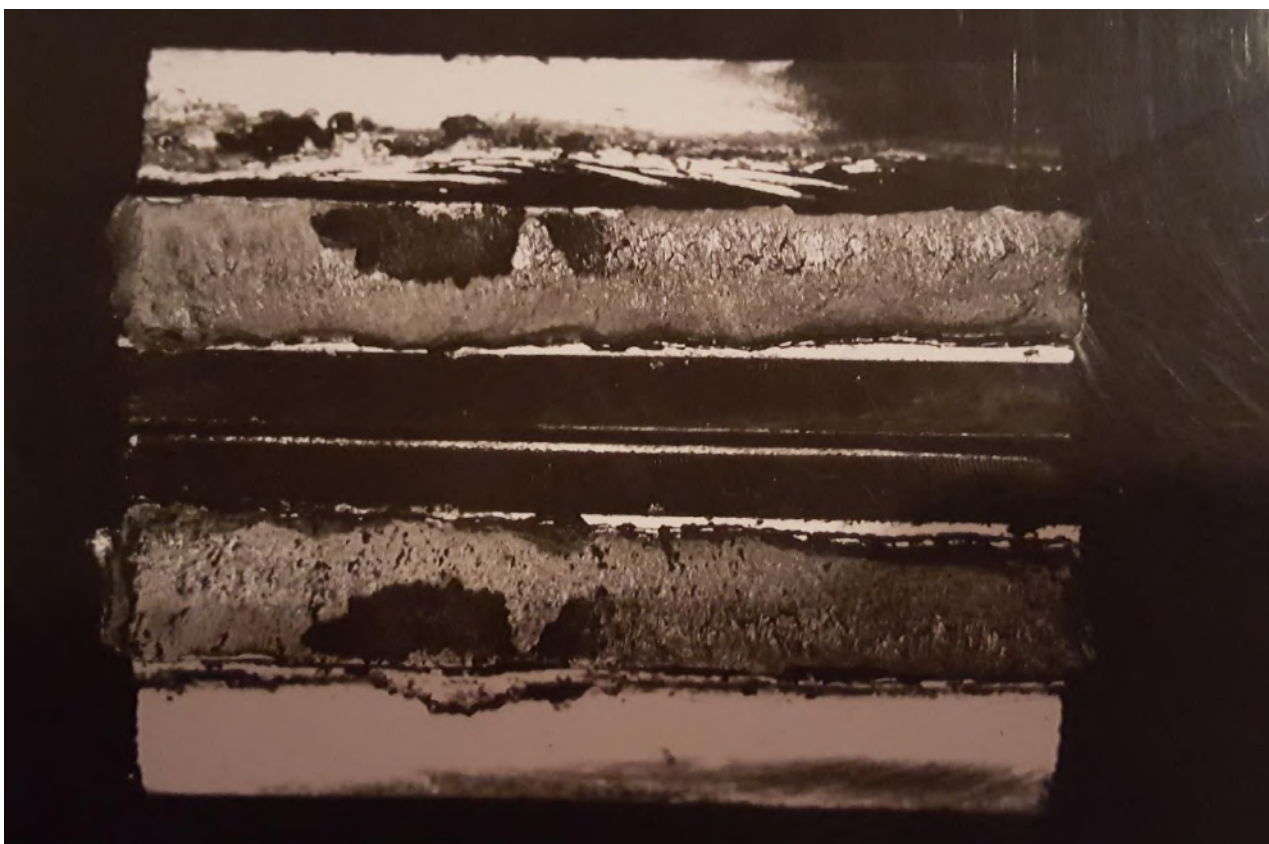
სურ. 4.6 კრისტალიზაციური ბზარები სერიული მავთულით CB-08xΓ2CMΦ
შედულებული მრავალგავლიანი შედულების პირველ ფენაში



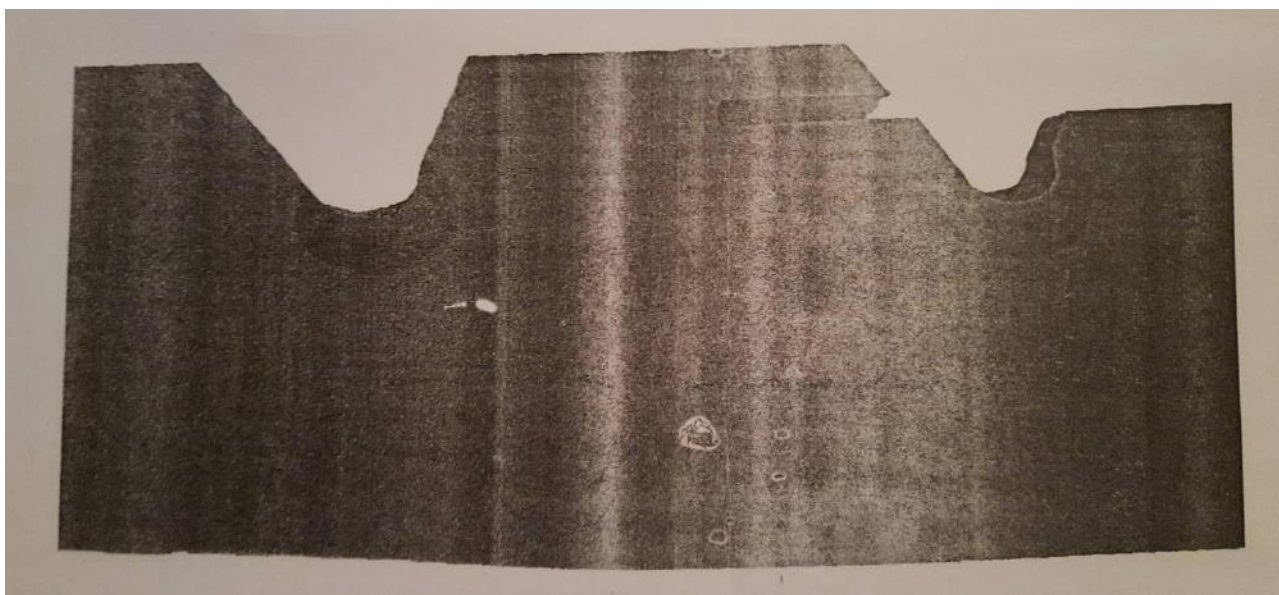
სურ. 4.7 კრისტალიზაციური ბზარები მრავალგვლიანი შედუღების ბოლო ფენაში



სურ. 4.8 წიდური ჩანართები და კრისტალიზაციური ბზარი მრავალგავლიანი შედუღების ბოლო ფენაში



სურ. 4.9 კრისტალიზაციური ბზარები ერთგავლიანი შედუღებისას ცალკეული უბნებზე საშემდუღებლო მავთულში გოგირდისა და ფოსფორის 0,19 და 0,14% შემცველობისას (მავთული № 1)



სურ. 4.10 ექსპერიმენტალური СВ-08xГ2СМФ (დნობა 2) მავთულიანი შედუღებული ნიმუშის შლიფი კრისტალიზაციური ბზარების გარეშე

მე-4 თავის დასკვნები

1. მნიშვნელოვანია საშემდუღებლო მასალების (მავთულის) სისუფთავის გავლენა შენადული შეერთების ხარისხზე;
2. მნიშვნელოვანია გოგირდისა და ფოსფორის შემცველობის გავლენა შენადულ ნაკერში კრისტალიზაციურ ბზარების წარმოქმნის პროცესზე, განსაკუთრებით მაღალნახშირბადოვანი ფოლადების შედუღებისას;
3. საშემდუღებლო მავთულში გოგირდისა და ფოსფორის რაოდენობის შემცირებასთან ერთად იზრდება წინააღმდეგობა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ, როგორც ერთგავლიანი, ისე მრავალგავლიანი შედუღებისას;
4. გოგირდისა და ფოსფორის რაოდენობის შემცირება საშემდუღებლო მავთულში 0,01%-ით უზრუნველყოფს უდეფექტო (კრისტალიზაციური ბზარების) შენადული შეერთების მიღებას.

ძირითადი დასკვნა

1. ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის არსებული სქემების ანალიზი აჩვენებს, რომ ყველა შემთხვევაში კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები განსაზღვრავენ ლითონის გადადნობით მიღებული სხმულის საჭირო სტრუქტურას, შემაღვენლობას და ხარისხს. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის საჭირო შემაღვენლობას, სტრუქტურას, ხარისხთან ერთად წარმადობის დაბალი თვითღირებულების უზრუნველყოფა შესაძლებელია თუ გადადნობის პროცესში დაცული იქნება საჭირო თანაფარდობა წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და პროცესის დროს ართმეული სითბოს შორის.
2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და პროცესის დროს ართმეულ სითბოს შორის თანაფარდობის რეგულირება შესაძლებელია შემოთავაზებული არადნობად ელექტროდებიანი კრისტალიზატორით და არადნობადი ელექტროდების, კვების წყაროსთან მიერთება იძლევა საშუალებას გამდნარი წიდის არსებობა არ იყოს დამოკიდებული დნობად ელექტროდზე. ეს შესაძლებელს ხდის დნობადი ელექტროდის შეცვლისას შენარჩუნებული იქნას წიდა თხევად მდგომარეობაში. აღნიშნული კრისტალიზატორით შესაძლებელია არალითონური მასალების და ფხვნილოვანი მასალების გადამუშავება.
დნობადი ელექტროდის და ზედა არადნობადი ელექტროდის ერთდროულად მიერთება დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერთან (პოტენციალზე) იძლევა საშუალებას მაქსიმალურად მიახლოებული იქნას ფორმის კოეფიციენტი 1-თან, ამით მნიშვნელოვნად შეიძლება გავლენის მოხდენა წიდის აბაზანის თბურ მდგომარეობაზე.
3. ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში თბური პროცესების მართვის პირობების გაუმჯობესება საშუალებას იძლევა ხელი შეუწყოს წიდის ქერქისა და კრისტალიზატორს შორის თხევადი წიდის არსებობას. ამით გაუმჯობესდება ლითონის სხმულის ხარისხი.

4. დამუშავებული ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში შესაძლებელია თბური პროცესების მართვის გაზრდილი შესაძლებლობა და ამით დნობადი ლითონის დნობის პროცესის მართვა სხმულის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კიდევ უფრო გაუმჯობესებით, არსებული კრისტალიზატორით მიღებული სხმულის თვისებებთან შედარებით.
5. ახალი სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ფორმის კოეფიციენტის გაზრდის გამო კრისტალიზატორში თბური დანაკარგები მცირდება და იზრდება ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.
6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მიმდინარეობას განსაზღვრავს თხევადი წიდის ელექტრული ველი, რომლის კვლევა არადნობადი ელექტროდებიანი ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორისათვის შესაძლებელია ფიზიკური მოდელის მიხედვით.
7. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის კვლევის ორგანიზომილებიანი ფიზიკური მოდელი წარმოადგენს: უქანგავი ფოლადისაგან X18H9T დამზადებული თხელი ფურცელის (1 მმ-მდე სისქის), რომელსაც გააჩნია დენმიმყვანები არადნობად ელექტროდებთან და დნობად ელექტროდთან. ფოლადის ფურცლის ზომები ტოლია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის შიგა სივრცის ღერძის გასწვრივ კვეთის ზომების. მასში გადის გადადნობის დენის თანაზომადი დენი. პოტენციალს მის ცალკეულ წერტილებში საზღვრავენ შუპისა და მილივოლტმეტრის საშუალებით.
8. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ელექტრული ველის ფიზიკური მოდელით კვლევამ აჩვენა, რომ კრისტალიზატორის ღერძის მახლობელ სივრცეში პოტენციალი დაბალია. აქ ტემპერატურა განპირობებულია წიდის თბოგამტარობით. ამ სივრცის მოცულობა დამოკიდებულია არადნობადელექტროდებზე მოდებულ ძაბვაზე.
9. მოდელის მიხედვით ელექტრული ველის კვლევამ აჩვენა, აგრეთვე, რომ ახალი სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას, როცა კვების წყაროს ერთიდაიგივე

მომჭერი მიერთებულია ერთდროულად ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდზე, წიდის ელექტრული ველის განაწილება კრისტალიზატორის კედელთან და ცენტრში პრაქტიკულად ერთნაირია.

10. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მათემატიკური მოდელირების შედეგების შედარება, ფიზიკური მოდელის მიხედვით ელექტრული ველის კვლევის შედეგებთან გვიჩვენებს, რომ მათემატიკური მოდელირება შეიძლება წარმატებით გამოყენებული იქნას ელექტროწიდური პროცესის ელექტრული ველის კვლევისათვის.
11. ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ფოლადის ნავთობგაზსადენებში მიღების ელექტრორკალური შედეგებისას საელექტროდე მასალად გამოყენების შემთხვევაში, ნაკერის ზონაში მნიშვნელოვნადაა შემცირებული ბზარების წარმოქმნის ალბათობა.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. აკაკაურიძე, ნ. მარდალეიშვილი ნ, ზივზივადე ლ, შალამბერიძე მ. ელექტრული ველის კვლევა მათემატიკური მოდელით. Georgian Engineering News №2 (vol. 82) 2017.
2. ა. კაკაურიძე, ლ. ზივზივადე, თ. ცქიფურიშვილი, მ. შალამბერიძე. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორში გამავალი დენების განსაზღვრა და მათ სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მოამბე“. №3 ქუთაისი. 2014. გვ 82-86.
3. Абдулах В.М., Демченко В.Ф., Стеренберг О.А., Некоторые закономерности квазиравновесной теории кристаллизации. – В кн.: Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. К., 1976, с. 155-160
4. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Под. ред. Б.Д. Кошарского. Л., Машиностроение, 1968, с. 880
5. Американская техника и промышленность, (сб., реклам, материалов внешторграеклама, вып. 1), М., 1976, с. 14
6. Бат Г.К., Производство фасонных отливок методов электрошлакового переплава. Электрошлаковой переплав, вып. 3, 1975, с. 204-212
7. Борисов В.Т., Виноградов В.В., Духин А.И. и др. О применимости теории квазиравновесной двухфазной зоны к описанию кристаллизации слитка. Изв. АН СССР, металлы, №5, 1970, с. 122
8. Вальстер М., Процесс ЭШП – каково его место сегодня, Электрошлаковый переплав, вып. 4, 1978, с. 41-55
9. Варгафтик Н.Б., Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостат. М., Наука, 1972, с. 720
10. Волошкевич Г.З., Сварка вертикальных швов методом принудительного формирования, в кн.Ж Юбилейный сборник, посвященный 80-летию Е.О. Патона. Киев, Изд-во АНУССР, 1951, с. 371-395
11. Гельман А.С., Технология контактной сварки, Машгиз, 1940
12. Гельман А.С., Контактная Электросварки, Машгиз, 1949
13. Гельман А.С., Технология и оборудование контактной сварки, М.: Машиностроение, 1960, с. 368

14. Гото К.С., Современное состояние оборудования для электрошлакового переплава в Японии. Электрошлаковый переплав, вып. 3. К., 1975, с. 20-24
15. Датчики для измерения температуры в промышленности. К., «Наука думка», 1972. с. 22
16. Дудко Д.А., Рублевский И.Н., Влияние вибрации электрода на капельный перенос электродного металла при электрошлаковом процессе. Автомат. сварка, № 1, 1959, с. 25-29
17. Дудко Д.А., Рублевский И.Н., К вопросу о природе вентильного эффекта при электрошлаковом процессе. Авт. Сварка, № 3, 1962, с. 10-13
18. Дудко Д.А., Рублевский И.Н., Тягун-Булоус Г.С. О влиянии режима электрошлакового процесса на размеры металлической ванны при плавке электродов большого сечения. Автомат. сварка, № 1, 1960, с. 7-11
19. Дудко Д.А., Походня Ш.К., Контактно-шлаковая сварка деталей больших сечений. Автомат, сварка, № 4, 1956, с. 70-75
20. Дуткин Н.А., Кузнецов П.И., Справочник по операционному исчислению. Гостехтеоретиздат. М.-Л., 1951
21. Жмойдин Г.И., Кинетика рафинирования электродного металла шлаком – в кн.: Восстановление и рафинирование железа. М., 1968, с. 105-118
22. Иванова Г.Ф., Расчет температурных палат и электрических полей слитков большого диаметра при переменном режиме электрошлаковой плавке. Инж. физ. дур., 22, №4, 1972, с. 706-710
23. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Теплопередача. М., Энергия, 1969, с. 439
24. Йоши С., Митчел А., Тепловые процессы при ЭШП, в кн.: Электрошлаковый переплав. к., 1973, с. 168-180
25. Кипиани П.Н., Павлов Н.В., Якушин Б.Ф., Повышение стойкости металла против образования и развития горячих трещин при наплавке гребней колес железнодорожного подвижного состава. Журн. «Сварочное производство», №10, 2000, с. 8-11
26. Кипиани П.Н., Зивзивадзе Л.А., Шаламберидзе М.И., Влияние вредных примесей на сопротивляемость образованию горячих трещин при наплавке гребней колес подвижного состава, ჯსტყ-ს „მრცმებო“, # 2(11), 2002, с. 128-131
27. Контроль качества сварки./ Под ред. В.Н. Волченко, М.: Машиностроение, 1978, с. 244

28. Кожима Ю., Като М., Тойда Т., Иноце М., Исследование модели плавления расходуемого электрода при ЭШП. В кн.: электрошлаковый переплав, вып. 3, 1975, с. 46-62
29. Конищев Б.П., Полыннин Г.У., Якушин Б.Ф., Оценка стойкости металла против образования и развития горячих трещин при сварке. «Сварочное производство», № 7, 1977, с. 12-13
30. Кочергин К.А., Вопросы теории контактной сварки. Судопромгиз, М., 1952
31. Лучок Дж. Электрошлаковая печь для производства крупных слитков. Электрошлаковый переплав. К., «Наукова думка», выт., 3, 1975, с. 308-323
32. Максимович Б.И., Условия возникновения постоянной составляющей тока при электрошлаковом переплаве в вод охлаждаемых изложницах. Автомат. сварка, №4, 1961, с. 13-15
33. Медовар Б.И., Шевцов В.Л., Саган В.И. и др. Оценка при ЭШП по бифилярной схеме. – в кн.: математические методы и исследовании процессов специальной электрометаллургии. К., 1976, с. 49-54
34. Медовар Б.И., Теория и практика электрошлакового переплава. – Физ. хим. механика матери, №2, К., 1979, с. 93-95
35. Миронов Ю.М., Ключев М.М., Тополин В.Д. Влияние электрошлакового режима ЭШП на скорость плавления электрошлакового металла и характеристики металлической ванны. Изв. вузов. чер. металлургия, № 5, 1965, с. 47-51
36. Митчел А., Шекелли Дж., Эллиот Дж. Ф. Математическое моделирование процесса ЭШП. Электрошлаковый переплав, вып. 2., 1974, с. 19-47
37. Митчел А., Механизм выделения и распространения тепла в процессе ЭШП. в кн.: Электрошлаковый переплав. к., 1971, с. 148-161
38. Орлов Б.Д. и др., Технология и оборудование контактной сварки, М.: Машиностроение, 1986, с. 347
39. Орнамский А.П., Чернобой В.А., Савина В.Н., Исследование критических – тепловых нагрузок при поверхностном кипении антифриза и этиленгликоля в кольцевых каналах. – Вопр. радиоэлектроники. Сер. тепловые режимы, термостатированные и охлаждение, № 2, 1970, с. 27-31
40. Патон В.Е., Медовар Б.И., Богаченко А.Г. и др., Электрошлаковая печь для выплавки листовых слитков. – Пробл. спец. электрометаллургии. вып. 3, 1975, с. 28-31

41. Патон В.Е., Медовар Б.И., Бойко Г.А., Андреев В.П. и др., Получение сверхкрупных заготовок из слитков или почовой на основе электрошлаковой технологии. Электрошлаковый переплав. К., «Наукова думка», 1975, с. 357-364
42. Патон В.Е., Медовар Б.И., Бойко Г.А., и др. Изготовление отливок сложной формы методом электрошлакового литья. Пробл. стального слитка, вып. 5, 1974, с. 714-716
43. Патон В.Е., Медовар Б.И., Бойко Г.А., Перспективы применения электрошлакового литья. Электрошлаковый переплав, вып. 4, 1974, с. 159-164
44. Патон В.Е., Медовар Б.И., Латаш Ю.В., Электрическая выплавка высоколегированной стали и сплавов в водохлаждаемом кристаллизаторе. Тр. НТО чер. металлургии, 18, ч. 1, 1957, с. 623-628
45. Патон В.Е., Медовар Б.И., Латаш Ю.В., Электрошлаковый переплав сталей и сплавов в медном водохлаждаемом кристаллизаторе. Автомат. сварка, №11, 1958, с. 5-15
46. Патон В.Е., Медовар Б.И., Латаш Ю.В., Электрошлаковая отливка и перспективы ее применения в литейном производстве. В кн.: Механические свойства литового металла. М.: из-во АН СССР, 1963, с. 141-146
47. Патон В.Е., Медовар Б.И., Латаш Ю.В., Чекотило Л.В., Новые направления развития электрошлакового переплава. В кн.: Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1971, с. 14-27
48. Патон В.Е., Медовар Б.И., Сафонников А.Н. и др. Укрупнение слитков ЭШП при помощи ЭШС по бифилярной схеме. Пробл. Стального слитка, 1974, вып. 5, с. 718-722
49. Прохоров Н.Н., Ширшов Ю.В. Влияние режима сварки и химического состава на первичную структуру металла шва «Автоматическая сварка», № 3, 1974, с. 7-9
50. Рикалин Н.Н., Тепловые основы сварки. Т.1, изд-во АН СССР, вып. 3, м., 1954
51. Робертс Р., Технология ЭШП, обеспечивающая максимальную скорость плавки при минимальном расходе электроэнергии. – В кн.: электрошлаковый переплав. М., Металлургия, 1971, с. 106-114
52. Роусон Дж.Д., Доусон Д.И., Кирхен Н., Движение шлака и металла в процессе ЭШП. Электрошлаковый переплав. К., «Наукова думка», вып. 3, 1975, с. 62-70
53. Симонов В.П., Евтеев Д.П., Бровман М.Я. и др., Анализ тепловых режимов кристаллизаторов установок непрерывной разливки металлов. – Изв. вузов. чер. металлургия, №1, 1974, с. 175-178
54. Стеренбоген Ю.А., Зайцев Ю.Н., Электрошлаковая сварка пластинчатым электродом. Автомат. сварка, № 4, 1956, с. 130-132

55. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением /Под. ред. Б.Е. Патона – М., Машиностроение, 1974, с. 768
56. Тиктин С.А., Вапатронная техника. К., Техника, 1975, с. 151
57. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И., Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. К., Изд-во АН УССР, 1961, с. 123
58. Хольцгрубер В., Возможности и ограничения воздействия на структуру и свойства слитков ЭШП – электрошлаковый переплав, вып. 4, 1977, с. 60-76
59. Чернобой В.А., Мюлер Р., Бурнаев А.Л., Шикинов Н.А., О начале пузырькового кипения. Пробл. спец. электрометаллургии, вып. 7, 1977, с. 29-32
60. Чулошников П.Л., Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1974, с. 232
61. Шапкин И.Ф., Водоподготовка на тепловых электростанциях. М., Госэнергоиздат, 1954, с. 279
62. Шоршоров М.Х., Урохин А.А., Чернышова Т.А. и др. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов. М., Машиностроение, 1973, с. 223
63. Штраубе Г., Плекингер Е. Роль процессов переплава в создании металлических материалов. Электрошлаковом переплав, вып. 4, 1977, с. 21-37
64. Эль Гаммаль Т., Хаген И., Мдлленберг Р. Влияние электрического тока на каплеобразование при ЭШП. Электрического тока на каплеобразование при ЭШП, Электрошлаковый переплав, 1975, вып. 3., с. 62-70
65. Эллиот Дж. Ф., Мольо М., Моделирование ЭШП Электрошлаковый переплав, К., «Наукова думка», вып. 3, 1975, с. 70-89
66. Якушин Б.Ф., Технологическая прочность в процессе кристаллизации (горячие трещины), Справочник по сварке. т. 3, М., Машиностроение, 1970
67. Якншин Б.Ф. и др. Влияние режима сварки на склонность сталей к образованию горячих трещин. «Сварочное производство», № 11, 1975
68. Якушин Б.Ф., Гаджиев Н.Г., Расчетно-экспериментальный метод определения сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин. «Сварочное производство», № 4, 1991
69. Mitchell A., Joshi S., Cameron J., Electrode temperature gradients in the electro slag process. Metallurgical trans., 19781, 2, p. 561-567
70. Lippman G. Ann, Phisik, 1973, p. 149, 546, 77
71. Kozakevitch R., Revue Met, 46, 1949, p. 505-575 and 572-582

72. W.vor dem Esche and O. Peter, Archiv Elsenhüttenwesen, 27, 1959, p. 355-366
73. J. Campbell and D.Dawson. Bisra Report MG/58/71, 1971, p. 360
74. J. Campbell. – J. Metals. 22, 1970, p. 23-35
75. W. Holzgruber, K. Petersen and P.E. Schnelder. Vacuum met. cont. Beverley Hills, California, 1968, p. 499-523
76. L.P. Edwards and J.A. Spittle. J. Inst, Metals 100, 1972, p. 244-248
77. W.Holzgruver and E. Plockinger, Stahl u Elsen 88, 1968, p. 638-648
78. Yu. V. Latash and B.I. Medpvar. Electroslag Milting Izd-vo-Merallurgiya, M., 1970, p. 370