

ზურაბ საბაშვილი

მასალების კლასიფიკაციის ზრდა
და განმარტების

„ტექნიკური უნივერსიტეტი“

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზურაბ საბაშვილი

მასალების კლასური ჯრა
და განმტკიცება



დამტკიცებულია სალექციო კურსად
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს
მიერ. 28.02.2018, ოქმი №1

თბილისი
2018

სალექციო კურსში განხილულია მასალების პლაზმური რკალის ენერგეტიკული მახასიათებლები და მათი კავშირი ჭრის ტექნოლოგიურ პარამეტრებთან, ახსნილია ამ დამოკიდებულებების ფიზიკური არსი, ჭრის ზედაპირების ხარისხი და მისი გაუმჯობესების გზები, პლაზმური ჭრის ეკოლოგია, პლაზმატრონების კონსტრუქციის ძირითადი კვანძების დანიშნულება, ლითონების პლაზმური განმტკიცების ტექნოლოგიური თავისებურებანი. მოცემულია პლაზმური რკალისა და განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრების გავლენა განმტკიცების მახასიათებლებზე.

სალექციო კურსი შედგენილია მასალათმცოდნეობის საგანმანათლებლო პროგრამის ბაკალავრებისათვის და სრულ შესაბამისობაშია სილაბუსში გათვალისწინებულ საკითხებთან.

რეცენზენტები: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის, ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტის პროფესორი ზურაბ გელიაშვილი,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის, მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონების დამუშავების დეპარტამენტის პროფესორი მალხაზ ხუციშვილი

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2018

ISBN 978-9941-28-252-2 (PDF)

<http://www.gtu.ge>

ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილის (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) გამოყენება არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს ელექტრონული თუ მექანიკური) არ შეიძლება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

წიგნში მოყვანილი ფაქტების სიზუსტეზე პასუხისმგებელია ავტორი/ავტორები.

ავტორის/ავტორთა პოზიციას შეიძლება არ ემთხვეოდეს საგამომცემლო სახლის პოზიციას.



1. შავი და ფერადი ლითონების პლაზმური ჭრის არსი. პლაზმაწარმომქმნელი აირები.	4
2. პირდაპირი მოქმედების პლაზმური რკალის ელექტრული მახასიათებლები და მათი კავშირი პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს აეროდინამიკურ მახასიათებლებთან.....	15
3. პლაზმური რკალის ენერგეტიკული მახასიათებლები.	25
4. პლაზმური ჭრის პროცესის ტექნოლოგიური რეჟიმის ძირითადი პარამეტრები და მათი კავშირი რკალის ენერგეტიკულ პარამეტრებთან.	35
5. გასაჭრელი ლითონის თბოფიზიკური მახასიათებლების გავლენა ჭრის რეჟიმის პარამეტრებზე.	45
6. პლაზმური ჭრის ზედაპირების ხარისხის მახასიათებლები.....	55
7. ჭრის ზედაპირების ხორკლიანობა. ხიწვები.	65
8. პლაზმური რკალის გავლენა ჭრის ზედაპირთან მიმდებარე უბნის ლითონზე.	75
9. არალითონური მასალების პლაზმური ჭრა.....	81
10. პლაზმური ჭრის ეკოლოგია.....	89
11. ზედაპირების პლაზმური განმტკიცების ტექნოლოგიური ვარიანტები. ზედაპირზე მიმდინარე თბური პროცესები.....	96
12. პლაზმური განმტკიცების რეჟიმის გავლენა განმტკიცებული არის სტრუქტურასა და მექანიკურ თვისებებზე.	104
13. პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირს შორის მანძილის გავლენა განმტკიცებული ზედაპირის მექანიკურ თვისებებზე.....	112
14. პლაზმური რკალის გენერატორები – პლაზმატრონები.....	120
15. პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს მიწოდების ხერხები.....	128
16. ლიტერატურა	132

1. შავი და ფერადი ლითონების პლაზმური ჭრის არსი.

პლაზმაწარმომქმნელი აირები

პლაზმური ჭრის ფიზიკური არსი და მისი უპირატესობა თერმული ჭრის სხვა მეთოდებთან შედარებით. პლაზმაწარმომქმნელი აირები: აზოტი, ჟანგბადი, წყალბადი, შეკუმშული ჰაერი, წყალი და წყლის ორთქლი. მათი თბოფიზიკური და ქიმიური თვისებები.

მრეწველობის განვითარება და წარმოების ეფექტურობის გაზრდა მოითხოვს თანამედროვე სამეცნიერო – ტექნიკური მიღწევების ფართო დანერგვას მრეწველობის ნებისმიერ სფეროში. XXI საუკუნეში მეცნიერთა და მწარმოებელთა ყურადღება ექცევა თანამედროვე და პროგრესული ტექნოლოგიების განვითარებასა და გამოყენებას. თანამედროვე ფიზიკისა და ქიმიის მიღწევებმა განაპირობა ტექნოლოგიებში ისეთი მაღალკონცენტრირებული ენერგიების გამოყენება, როგორცაა ლაზერის სხივი და პლაზმა. პლაზმამ, მაღალი ენერგეტიკული მახასიათებლების გამო, ფართო გამოყენება ჰპოვა მასალათა დამუშავებაში, მეტალურგიაში, ქიმიურ მრეწველობაში, ენერგეტიკაში, მედიცინასა და სხვ.

კლასიკური განმარტებით პლაზმა წარმოადგენს გარემოს, სადაც დადებითი იონები და ელექტრონები იმყოფება კვაზინეიტრალურ მდგომარეობაში. ნივთიერების აირადი მდგომარეობიდან პლაზმურ მდგომარეობაში გადასვლა განპირობებულია ნაწილაკების ურთიერთქმედების პროცესებთან, რომლებიც გამოწვეულია ნაწილაკების ურთიერთშეჯახებით ან მათი ურთიერთქმედებით გამოსხივებასთან. ატომზე ენერგეტიკული ზემოქმედებით შესაძლებელია ერთი ან რამდენიმე ელექტრონის მოგლეჯა, რის შედეგადაც წარმოიქმნება დადებითი იონი და ელექტრონი. ამ პროცესს ეწოდება იონიზაცია. იონიზაციას, როდესაც ატომს წაერთმევა ერთი ელექტრონი ეწოდება ერთჯერადი იონიზაცია, ხოლო თუ მას წაერთმევა რამდენიმე ელექტრონი – მრავაჯერადი იონიზაცია. ამრიგად, პლაზმა - იონიზირებული აირი წარმოადგენს დენგამტარ გარემოს.

დღეს განასხვავებენ ორი სახის პლაზმას: არაწონასწორული და წონასწორული პლაზმა.

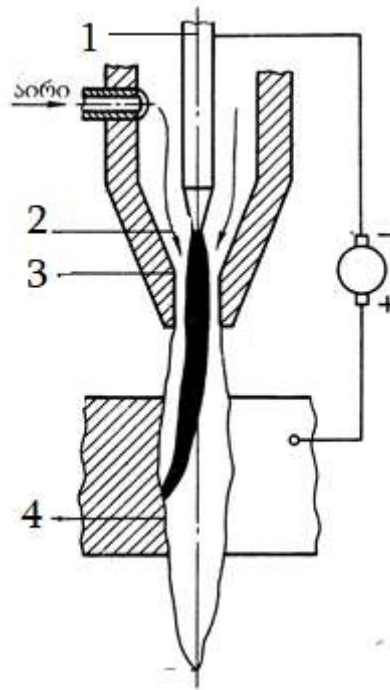
არაწონასწორული პლაზმა მიიღება დაბალ წნევებზე და მისი ტემპერატურა შესაძლებელია იყოს რამდენიმე ათეული გრადუსიდან რამდენიმე ასეულ გრადუს-

სამდე. მისი შემადგენლობა მრავალფეროვანია (აღზნებული მოლეკულები, თავისუფალი რადიკალები, დადებითი და უარყოფითი იონები, ელექტრონები, ატომები მეტასტაბილურ მდგომარეობაში, ფოტონები, ნეიტრალური ატომები). სწორედ ამიტომ არაწონასწორული პლაზმა წარმოადგენს ქიმიური რეაქციების ეფექტურ წყაროს. ხასიათდება ბიოლოგიურ ქსოვილებზე ბაქტერიოციდული ზემოქმედებითა და მიკროორგანიზმების ინაქტივაციით. XX საუკუნის 80-იანი წლებიდან მოყოლებული მეცნიერები ინტენსიურად მუშაობენ და საკმაოდ წარმატებით მისი გამოყენებისათვის მედიცინაში, ეკოლოგიაში, სოფლის მეურნეობასა და სხვ.

წონასწორული პლაზმა მიიღება მაღალ წნევებზე და მისი ტემპერატურა იწყება რამდენიმე ათასეული გრადუსიდან და ზემოთ. ტემპერატურის მიხედვით ასხვავებენ დაბალტემპერატურულ ($50\ 000^{\circ}\text{C}$ -მდე) და მაღალტემპერატურულ ($50\ 000^{\circ}\text{C}$ -დან და ზემოთ) პლაზმას. ამ ტემპერატურებზე პლაზმა ძირითადად შედგება ელექტრონებისაგან, დადებითი იონებისა და ასევე რეკომბინაციის შედეგად მიღებული ნეიტრალური ატომებისაგან. ის წარმოადგენს კარგ ელექტროგამტარს და ხასიათდება მაღალი თბოფიზიკური მახასიათებლებით. დაბალტემპერატურული წონასწორული პლაზმა ფართოდ გამოიყენება ლითონების დამუშავებაში, კერძოდ კი, შედუღებაში, ჭრაში, დადუღებაში, დაფრქვევასა და სხვ.

პლაზმური ჭრის პროცესის არსი მდგომარეობს გასაჭრელი ლითონის ზედაპირის ლოკალურ მყისიერ გახურებასა და სრულ გადნობაში. გამდნარი ლითონი ჭრის არიდან გამოიდევენება მაღალი წნევის პლაზმაწარმომქმნელი აირის შებერვით. მოწყობილობას, სადაც გენერირდება პლაზმა ეწოდება პლაზმატრონი. არსებობს პირდაპირი და ირიბი მოქმედების პლაზმატრონები. ლითონების პლაზმურ ჭრაში გამოიყენება პირდაპირი მოქმედების პლაზმატრონები, სადაც პლაზმური რკალი ანთია პლაზმატრონის კათოდსა და გასაჭრელ ლითონს შორის. (სურ.1.1) კათოდი მიერთებულია მუდმივი დენის წყაროს უარყოფით პოლუსთან, ხოლო დადებითი პოლუსი მიყვანილია გასაჭრელ ფურცელთან. პლაზმური რკალის აღზნებისთანავე კათოდსა და ფურცელს შორის იკვრება ელექტრული წრედი და პლაზმის დიდი ტემპერატურის გამო მყისიერად იწყება ჭრის პროცესი. პლაზმური ჭრა მიეკუთვნება თერმული ჭრის მეთოდს. თერმული ჭრის მეთოდები იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად.

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება ჟანგბადური ჭრის ყველა ხერხი. თითოეული მათ-



სურ. 1.1.

პირდაპირი მოქმედების პლაზმური რკალის სქემა

1. კათოდი, 2. აირის ნაკადი, 3. საქშენი, 4. გასაჭრელი ფურცელი,

განი ეფუძნება ლითონის (ფოლადის) ჯანგბადში წვის ქიმიურ და ჭრის არიდან გამდნარი ჟანგეულების გამოდევნის ფიზიკურ პროცესებს. კონცენტრირებული გახურება გამოიყენება ლითონის გასახურებლად ჟანგბადში აალების ტემპერატურამდე.

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება პლაზმური, ელექტროკალური და ლაზერული ჭრა. ამ მეთოდებს საფუძვლად უდევს ლითონების დნობის ფიზიკური პროცესები. კონცენტრირებული გახურება გამოიყენება ლითონის გასახურებლად დნობის ტემპერატურამდე და ზემოთ.

ჟანგბადური ჭრა ხორციელდება მხოლოდ იმ შემთხვევებში, თუ გასაჭრელი ლითონი ხასიათდება შემდეგი თვისებებით:

1. ლითონის დნობის ტემპერატურა მეტია მისი ჟანგბადში აალების ტემპერატურაზე. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ის წვის პროცესამდე დაიწყებს თხევად მდგომარეობაში გადასვლას;
2. ჟანგეულების დნობის ტემპერატურა დაბალი უნდა იყოს ლითონის დნობის ტემპერატურაზე. წინააღმდეგ შემთხვევაში ჟანგეულები ვერ მოასწრებს გადნობას და არ გამოიდევენება ჭრის არიდან;

3. ლითონის ჟანგეულები უნდა ხასიათდებოდეს მაღალი თხევადდენადობით. წინააღმდეგ შემთხვევაში არ გამოიძვევება ჟანგბადის ჭავლით ჭრის არიდან;
4. ლითონი უნდა ხასიათდებოდეს დაბალი ან საშუალო თბოგამტარობით, რომ მოხერხდეს წრის პროცესისათვის აუცილებელი სოთბოს კონცენტრირება;
5. ჟანგბადში ლითონის წვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა საკმარისი უნდა იყოს ჭრის პროცესის უწყვეტობის შესანარჩუნებლად.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება ავლნიშნოთ, რომ ჟანგბადური ჭრის გამოყენების არე შეზღუდულია. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ სპილენძისა და ალუმინის ჟანგბადთან ურთიერთქმედებისას, ზედაპირი იფარება მათი ოქსიდებით, რომლებსაც აქვს დიდი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა, ამასთან, მაგალითად, ალუმინის ოქსიდის დნობის ტემპერატურა საკმაოდ მაღალია (2044 °C). ამიტომ ალუმინის ჟანგბადური ჭრა არ ხერხდება, ხოლო სპილენძის ჭრა შესაძლებელია ჟანგბადურ - ფლუსური ხერხით.

ლაზერული ჭრა მიეკუთვნება თანამედროვე პროგრესულ ტექნოლოგიებს. ლაზერის სხივი გენერირდება ოპტიკურ კვანტური გენერატორების საშუალებით და წარმოადგენს მონოქრომატულ გამოსხივებას ტალღის სიგრძის ფართო დიაპაზონით. ლაზერის სხივი ხასიათდება ელექტრომაგნიტური ენერჯის დიდი სიმძლავრითა და საკმაოდ მცირე ფართობზე ფოკუსირების შესაძლებლობით (ენერჯის დიდი კონცენტრაციით). სხვადასხვა მასალის დამუშავების შესაძლებლობა დამოკიდებულია მათ მიერ განსაზღვრული სიგრძის ტალღის შთანთქმის უნარზე. გამოყენებული აქტიური გარემოს მიხედვით ლაზერები იყოფა სამ ჯგუფად: მყარ სხეულზე მომუშავე, აირზე მომუშავე და თხევად გარემოზე მომუშავე. მაგალითად, არალითონური მასალების ჭრაში გამოიყენება ლაზერები, რომელშიც აქტიური გარემო შედგება ნახშირ-ორჟანგისაგან (CO_2), აზოტისაგან (N) და ჰელიუმისაგან (He). ამ დროს გამოსხივებული ტალღის სიგრძეა 10,6 მკმ. არალითონური მასალები, როგორცაა პლასტმასები, რეზინი, კერამიკა და სხვ. შედარებით კარგად შთანთქავს აღნიშნული სიგრძის ტალღებს და შესაბამისად გამოიყოფა დიდი სითბოს რაოდენობა. ლითონები შედარებით ცუდად შთანთქავს ასეთ გამოსხივებას. კონსტრუქციული ფოლადების, ლეგირებული ფოლადებისა ან ტიტანის დამუშავების პროცესის უზრუველყოფა შესაძლებელია დამჟანგველი აირის (ჟანგბადის) საშუალებით. ლითონები, რომლებსაც აქვს დიდი არეკვლის

კოეფიციენტი, მაგალითად, სპილენძი და ალუმინი CO_2 -ის ლაზერით ჭრას არ ექვემდებარება. ლაზერით ჭრა ძირითადად გამოიყენება დაბალნახშირბადიანი, დაბალ-ლეგირებული და მაღალლეგირებული ფოლადებისათვის. აღნიშნული ფოლადების ლაზერული ჭრა ხასიათდება დიდი სიჩქარით, მცირე სითბური ზემოქმედებით, ჭრის ზედაპირების მაღალი ხარისხით, ჭრის ნაწიბურების პარალელობით. ამავე დროს, ნიმუშები არ განიცდის თბურ დეფორმაციებს. ლაზერის სხივი იძლევა 0,1 მმ და უფრო მცირე სისქის ფურცლების ჭრის შესაძლებლობას, რაც დაკავშირებულია ზედაპირზე დაწნევის არარსებობით. ლაზერული ჭრა წარმოადგენს ეკოლოგიურად სუფთა ტექნოლოგიურ პროცესს.

წარმოებაში ფართო გამოყენება ჰპოვა მასალების პლაზმურმა ჭრამ შეკუმშული ჰაერის გარემოში. რაც განპირობებულია მისი შემდეგი დადებითი თვისებებით:

- ნებისმიერი ლითონის ჭრის შესაძლებლობა;
- პლაზმური რკალის ელექტრული ენერჯის ცვლილების შესაძლებლობა ფართო დიაპაზონში;
- გასაჭრელ ლითონთა სისქეების დიდი ინტერვალი;
- მაღალი მწარმოებლურობა;
- ჟანგბადურ ჭრასთან შედარებით ჭრის ზედაპირების მაღალი ხარისხი;
- პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს - შეკუმშული ჰაერის მცირე ფასი და ადვილ-მისაწვდომობა;
- ჭრის პროცესის ეკონომიურობა.

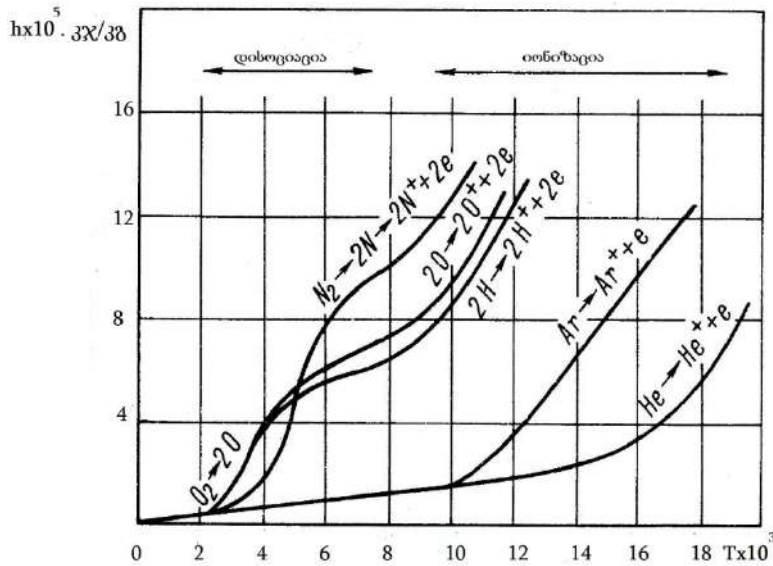
პლაზმურ ტექნოლოგიებში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს (პ.გ.) შერჩევას. მისი ისეთი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები, როგორცაა თბოტევადობა, თბოგამტარობა, იონიზაციის პოტენციალი, ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალი და სხვ. გავლენას ახდენს, როგორც პლაზმური რკალის ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე, ისე პროცესის ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე. კერძოდ, მათი თვისებები განაპირობებს პლაზმური რკალის ელექტრული ველის დამაბულობის მნიშვნელობას, რკალის ელექტრული ენერჯის თბურ ენერჯიაში გარდაქმნის და მისი მაქსიმალური გამოყენების შესაძლებლობას, ტექნოლოგიური პროცესის მწარმოებლურობას. გარემოს ქიმიურ თვისებებზეა დამოკიდებული ხარისხიანი პროდუქციის მიღება და სხვ. პლაზმაწარმომქმნელი გარემო შეიძლება შედგებოდეს ერთი, ორი ან რამდენიმე

კომპონენტისაგან, რომლებიც განსხვავდება ფიზიკურ–ქიმიური თვისებებით და აქტივობით ლითონების მიმართ. პლაზმაწარმოქმნელმა გარემომ აირის ხარჯისა და მოხმარებული ელექტრული ენერჯის მოცემული მნიშვნელობებისათვის უნდა უზრუნველყოს რკალის მაქსიმალური კუთრი სიმძლავრე, ენერჯის კონცენტრირება მცირე ფართობის უბანზე. უნდა ჰქონდეს მცირე იონიზაციის პოტენციალი.

ატომზე ენერგეტიკული ზემოქმედებით შესაძლებელია ერთი ან რამდენიმე ელექტრონის მოგლეჯა, რის შედეგადაც წარმოიქმნება დადებითი იონი და ელექტრონი. ამ პროცესს ეწოდება იონიზაცია. იონიზაციას, როდესაც ატომს წაერთმევა ერთი ელექტრონი ეწოდება ერთჯერადი იონიზაცია, ხოლო თუ მას წაერთმევა რამდენიმე ელექტრონი – მრავაჯერადი იონიზაცია. ენერჯიას, რომელიც აუცილებელია ელექტრონის მოგლეჯაზე ატომიდან ეწოდება იონიზაციის ენერჯია და ის ტოლია ატომში ელექტრონული კავშირის ენერჯისა, რომელიც დამოკიდებულია ელექტრონული ორბიტების შევსების ხარისხზე და თვით ატომის ადგილზე მენდელეევის პერიოდულ სისტემაში. იონიზაციის ენერჯია წარმოადგენს ქიმიური ელემენტის ატომური ენერჯის პერიოდულ ფუნქციას და კლებულობს ჯგუფის ნომრის შემცირებისას და ცხრილის პერიოდის ნომრის გაზრდასთან ერთად. იონიზაციის ენერჯის ერთეულია ელექტრონვოლტი $1 \text{ ე.ვ.} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ ჯ.}$ იონიზაციის პროცესში პირველად ხდება იმ ელექტრონის მოგლეჯა, რომელიც ყველაზე სუსტად არის დაკავშირებული ატომის ბირთვთან, შემდეგ კი სხვა ელექტრონებისა. ცხადია, რომ რაც მეტია იონიზაციის ხარისხი, მით მეტია პლაზმური რკალის ტემპერატურა. იონიზაციის მიმდინარეობის ხასიათი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს პლაზმის მოცულობით თბოშემცველობაზე (ენტალპია). ერთატომიანი აირისაგან განსხვავებით, ორატომიანი აირები ჯერ დისოცირდებიან, შემდეგ კი განიცდს იონიზაციას. ამიტომ, დისოციაციისა და იონიზაციის შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე, პლაზმურ რკალში თავმოყრილია ენერჯის დიდი რაოდენობა. (სურ.1.2).

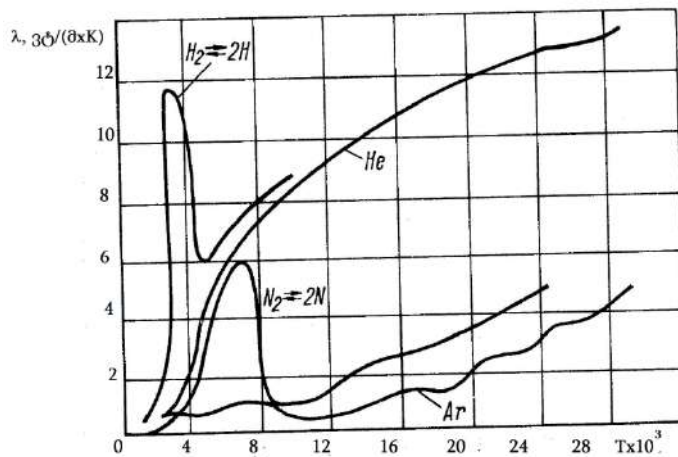
მნიშვნელოვანი სიდიდეა აირის თბოგამტარებლობა, რომელზეც არის დამოკიდებული რკალის ელექტრული ენერჯის სითბურში გარდაქმნის ეფექტურობა.

სურ.1.3.-ზე მოცემულია აირების თბოგამტარებლობის პლაზმის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. პლაზმის თბოგამტარებლობა განპირობებულია ნაწილაკების მოძრაობით. სითბოს გადატანა პლაზმის დიდი ტემპერატურის უბნებიდან მცირე



სურ.1.2.

დისოციაციისა და იონიზაციისას აირების ენტალპიის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ტემპერატურის უზნებზე ძირითადად ხდება დიდი სითბური სიჩქარის მქონე ელექტრონების საშუალებით. გაცივებისას, როდესაც აირი კვლავ ხვდება დისოციაციის ტემპერატურის უბანში, სითბოს დიდი რაოდენობა გამოიყოფა ნამზადზე და შესაბამისად იზრდება თბოგადაცემის პროცესის ეფექტურობა. აქედან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ თბოგადაცემა დამოკიდებულია როგორც აირის ტემპერატურაზე, ისე ენტალპიაზეც.



სურ. 1.3.

აირების თბოგამტარებლობის დამოკიდებულება პლაზმის ტემპერატურაზე. არსებობს იონიზაციის გამომწვევი რამდენიმე ელემენტარული პროცესი:
 – იონიზაცია ელექტრონთან შეჯახებით: ატომის ელექტრონთან შეჯახებისას, ამ უკანასკნელის კინეტიკური ენერგია უნდა იყოს ტოლი ან აღემატებოდეს ატო-

მის იონიზაციის ენერგიას. რადგან ელექტრონის მასა გაცილებით ნაკლებია ატომის მასაზე, ამიტომ შეჯახებისას მისი კინეტიკური ენერგია მთლიანად გადაეცემა ატომს და იზრდება მისი პოტენციური ენერგია;

- იონიზაცია მეორე გვარის შეჯახებით: ნეიტრალური ატომი აღზნებულ ან იონიზირებულ ატომთან შეჯახებისას ენერგიას ღებულობს შემდეგი განტოლების სახით:

$$A + B^* = A^+ + B + e.$$

ეს პროცესი ყველაზე მეტად არის ეფექტური აირების ნარევის გამოყენებისას. **B** აირის ატომის აღზნების ენერგია მეტია **A** აირის იონიზაციის ენერგიაზე და ენერგიის ეს განსხვავება იხარჯება ნაწილაკების კინეტიკური ენერგიის გასაზრდელად;

- იონიზაცია გამოსხივებით: იონიზაციის პროცესი წარიმართება, თუ დასხივებული ფოტონის ენერგია ტოლია იონიზაციის ენერგიის:

$$h\nu_p = e\varphi_i.$$

აქ **h** – პლანკის მუდმივაა და $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ ჯ·წმ, ν_p – სიხშირე, φ_i – იონიზაციის პოტენციალი;

- კუმულატიური იონიზაცია: აღზნებული ატომების მაღალი კონცენტრაციისას იზრდება ალბათობა იმისა, რომ მათი შეჯახებისას სხვა ნაწილაკებსა ან ფოტონებთან, აღზნებული ატომების უმრავლესობის ენერგეტიკული დონე გაიზრდება და საკმარისი იქნება იონიზაციის პროცესის უზრუნველყოფისათვის. იონიზაციის ამ პროცესს ეწოდება კუმულატიური იონიზაცია. ამგვარად, ამ დროს შესაძლებელია, რომ იმ ნაწილაკებთან შეჯახება, რომელთა ენერგია მცირეა აირის იონიზაციის ენერგიასთან შედარებით, წარიმართოს იონიზაციის პროცესი;

- თერმული იონიზაცია: აირების გახურების დროს იზრდება მისი შინაგანი ენერგია (ატომების კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების ჯამი), რაც, თავის მხრივ იწვევს ნაწილაკების შეჯახებათა რიცხვისა და ინტენსივობის მატებას. გარკვეული ტემპერატურიდან დაწყებული ელექტრონები ღებულობს საკმარის ენერგიას, იმისათვის, რომ მოწყდნენ ორბიტას, ამავე დროს ატომები გადადიან აღზნებულ მდგომარეობაში და ვითარდება იონიზაციის პროცესი.

ცხადია, გარდა იონიზაციის პროცესისა, აირებში ასევე მიმდინარეობს რეკომბინაციის პროცესიც – დამუხტული ნაწილაკების ნეიტრალიზაცია. რეკომბინირება შეუძლიათ, როგორც დადებით და უარყოფით იონებს, ასევე ელექტრონებსა და დადებით იონებს. ზემოთ მოყვანილი პროცესების მიმდინარეობა განაპირობებს იმ ფაქტს, რომ პლაზმის შემადგენლობაში გარდა ელექტრონებისა და დადებითი იონებისა, გვაქვს ნეიტრალური ატომები, დადებითი იონები და ატომები აღზნებულ მდგომარეობაში. მათი კონცენტრაცია დამოკიდებულია პლაზმის ტემპერატურაზე.

ტექნოლოგიურ პროცესებში პლაზმა მიიღება აირის ელექტრული განმუხტვით ორ ელექტროდს შორის. აირის განმუხტვა ეწოდება მასში ელექტრული დენის გავლის პროცესს. განმუხტვის ხასიათი დამოკიდებულია აირის გვარობაზე, წნევაზე, ტემპერატურაზე, ელექტროდებზე მოდებულ ძაბვაზე, დენის სიმკვრივეზე, ელექტროდების ზომებზე, განლაგებასა და სხვ. არსებობს თავისთავადი და არათავისთავადი განმუხტვა. პირველ შემთხვევაში, აირში მიმდინარე პროცესები თვითონ უზრუნველყოფს დამუხტული ნაწილაკების წარმოქმნასა და განმუხტვის პროცესის წარმართვას დამატებითი ენერგიის მიწოდების გარეშე. მეორე შემთხვევაში აუცილებელია აირს განუწყვეტლივ მიეწოდოს ენერგია, რომელიც უზრუნველყოფს იონიზაციის პროცესს.

აირული განმუხტვის ძირითადი სახეებია: რკალური, გვირგვინისებური, დიელექტრიკულ-ბარიერული, ნაპერწკლური, მღვივადი, მაღალსიხშირული ინდუქციური, ზემაღალსიხშირული ინდუქციური. პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიურ პროცესებში გამოიყენება რკალური განმუხტვა, რომლის მექანიზმსაც მოგვიანებით გავცნობით. პლაზმურ ტექნოლოგიებში გამოიყენება, როგორც ინერტული, ისე აქტიური აირები.

ინერტული აირები ხასიათდება ძლიერ დაბალი ქიმიური აქტივობით, რაც ნიშნავს იმას, რომ ისინი ძნელად შედის ან საერთოდ არ შედის ქიმიურ რეაქციაში სხვა ელემენტებთან, მათ შორის ლითონებთანაც. ინერტულ აირებს მიეკუთვნება არგონი (Ar), არგონი ხასიათდება დაბალი თბოფიზიკური თვისებებითა და ცუდი ენერგეტიკული მახასიათებლებით. მოცემულ შემთხვევაში, ენერგეტიკულ მახასიათებლებში იგულისხმება პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს უნარი ელექტრული ენერგიის გარდაქმნისა სითბურში და მისი გადაცემისა დასამუშავებელ ლითონზე. არგონში ანთებული

რკალის ელექტრულ ველის დამაბულობის დაბალი მნიშვნელობის გამო, რკალში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა უმცირესია, სხვა აირებთან შედარებით. მისი დაბალი თბოგამტარებლობის გამო, რკალში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის გამოყენების საშუალებაც შემცირებულია. არგონის რკალი, ასევე ხასიათდება დაბალი გამჭოლუნარიანობით, რაც ამცირებს მის ჭრისუნარიანობას და პლაზმური ჭრის სიჩქარეს. პლაზმური ჭრისას, ამ ნაკლოვანებების გამოსწორება შესაძლებელია არგონის ხარჯის მომატებით. ეს შესაძლებლობას მოგვცემდა გაგვეზარდა მაქსიმალური დასაშვები დენის ძალის სიდიდე და რკალის გამჭოლუნარიანობა. მაგრამ არგონის სიძვირის გამო პლაზმური ჭრის პროცესის წარმოება გახდება არარენტაბელური.

უნდა აღინიშნოს, რომ არგონს აქვს მცირე იონიზაციის პოტენციალი (15, 7 ვ) და ხასიათდება დიდ ტემპერატურებზე რკალის ნათების პროცესის სტაბილური მიმდინარეობით. სწორედ ამისა და ქიმიური თვისებების გამო, წარმატებით გამოიყენება შედუღებაში, დადუღებაში, დაფრქვევაში.

აზოტი (N) არგონთან შეადრებით ხასიათდება მაღალი თბოგამტარებლობით, თბოტევადობით, რკალის ელექტრული ენერჯის სითბურში გარდაქმნისა და მისი გამოყენების ეფექტურობით, თბური სიმძლავრის მარგი ქმედების კოეფიციენტით (მ. ქ. კ.) რკალის გამჭოლუნარიანობით, მაღალი სიჩქარით. მიუხედავად ამისა, მისი გამოყენება პლაზმური ჭრისას შეზღუდულია, რადგან ის უარყოფით გავლენას ახდენს დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისაგან მიღებული პროდუქციის ხარისხზე. კერძოდ, ადგილი აქვს ჭრის ზედაპირების გაჯერებას აზოტით, იზრდება სისალე, გამოჭრილი დეტალების შემდგომი შედუღებისას ნაკერი ხასიათდება ფორიანობით. ჟანგბადის შემცველ აირებთან შედარებით, ჭრის მწარმოებლურობა და ჭრის უნარიანობა მცირეა.

ჰელიუმი (He) არგონთან შეადრებით ხასიათდება რკალის ელექტრული ველის მეტი დამაბულობით. ასევე ელექტრული ენერჯის სითბურში გარდაქმნისა და გამოყენების ეფექტურობით, რაც თავის მხრივ, განაპირობებს დიდ მწარმოებლურობას. მიუხედავად ამისა, ჰელიუმმა სიძვირის გამო ვერ ჰპოვა გამოყენება.

ჟანგბადი (O_2) ძირითადად გამოიყენება პლაზმურ ჭრაში. ჟანგბადის პლაზმის ურთიერთქმედებისას ფოლადთან მიმდინარეობს მისი ინტენსიური წვა, რომლის დროსაც გამოიყოფა საკმაოდ დიდი სითბოს რაოდენობა, რომელიც რკალის თბურ სიმძლავრესთან ერთად ხელს უწყობს ჭრის მწარმოებლურობის ზრდას.

წყალბადი (H_2) გამოირჩევა ყველაზე მაღალი თბოფიზიკური მახასიათებლებით, მაგრამ მისი გამოყენება ცალკე არ არის რეკომენდირებული, რადგან დიდ ტემპერატურებზე ის კარგად იხსნება თხევად ლითონში, დაგროვების ადგილას წარმოქმნის ე.წ. ფლოკენებს და ლითონს ამყიფებს. მიზანშეწონილია მისი გამოყენება სხვა აირებთან ერთად ნარევის სახით, მაგალითად, არგონთან და აზოტთან. გარკვეული პროპორციით მისი შერევა უზრუნველყოფს პლაზმური რკალის დიდ თბურ მახასიათებლებს.

განვიხილოთ ზოგიერთი აქტიური აირი. პირობითად მათ ჰყოფენ ორ ჯგუფად: ჟანგბადშემცველი და წყალბადშემცველი აირები.

ჟანგბადშემცველი აირების გამოყენებისას გამოიყენება, როგორც ელექტრული, ისე ქიმიური ენერგია. წყალბადშემცველი აირების გამოყენებისას მაქსიმალურად იზრდება ელექტრული ენერგიის სითბურ ენერგიაში გარდაქმნის შესაძლებლობა და მისი გადაცემა დასამუშავებელ ლითონზე.

პლაზმურ ჭრაში ფართო გამოყენება ჰპოვა შეკუმშულმა ჰაერმა, რაც გამოწვეულია მისი საკმაოდ მცირე ფასით და ადვილად ხელმისაწვდომობით. ამასთან ერთად მისი გამოყენებისას პლაზმური ჭრის პროცესი ხასიათდება მაღალი მწარმოებლურობით.

შეკუმშული ჰაერი წარმოადგენს რთულ ნაერთს და მიეკუთვნება ჟანგბადშემცველ აირებს. შეკუმშული ჰაერის გარემოში პლაზმური რკალის ელექტრულ და ტექნოლოგიურ მახასიათებლებს განსაზღვრავს ჟანგბადისა და აზოტის თვისებები, რის გამოც ჭრის ზედაპირების ხარისხი არადაამაკმაყოფილებელია. ასევე მცირეა ტექნოლოგიური პროცესის ეკოლოგიური მაჩვენებლები.

პერსპექტიულ გარემოს წარმოადგენს წყლის ორთქლი, რომელიც მიეკუთვნება როგორც ჟანგბადშემცველ, ისე წყალბადშემცველ გარემოს. წყალბადის არსებობა განაპირობებს მის დიდ თბოფიზიკურ და ელექტრულ მახასიათებლებს, გააჩნია მაღალი ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალი და წარმოადგენს ეკოლოგიურად სუფთა გარემოს. ჟანგბადი კი, უზრუნველყოფს ჭრის მაღალ მწარმოებლურობას, რაც დაკავშირებულია ჟანგბადის პლაზმასა და ლითონს შორის მიმდინარე თერმოქიმიურ რეაქციებთან. სტუში ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მნიშვნელოვნად უმჯობესდება ჭრის ზედაპირების ხარისხი, ჭრის პროცესის ეკოლოგია და სხვ.

2. პირდაპირი მოქმედების პლაზმური რკალის ელექტრული მახასიათებლები და მათი კავშირი პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს აეროდინამიკურ მახასიათებლებთან

რკალის ძაბვა, ელექტრული დენი. რკალის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები. რკალის ძაბვის დამოკიდებულება პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯსა და წნევაზე.

წონასწორული პლაზმა, როგორც ადრე ავლინებდა, მიიღება რკალური განმუხტვის საშუალებით, რომელიც, თავის მხრივ, წარმოადგენს ელექტრული განმუხტვის ერთ-ერთ სახეობას. ელექტრული განმუხტვა ეწოდება ელექტრული დენის გავლას გარემოში, რომლის დროსაც იზრდება გარემოს ელექტროგამტარებლობა. აირების რკალური განმუხტვა, ხასიათდება დენის დიდი სიმკვრივით და ძაბვის მცირე ვარდნით. რკალური განმუხტვა შეიძლება გამოწვეული იყოს ელექტროდებს შორის მაღალი სიხშირისა და ძაბვის იმპულსის მიწოდებით ან ელექტროდების ერთმანეთთან მყისიერი შეხებითა და დაშორებით. რკალური განმუხტვის პროცესის მიმდინარეობა დაკავშირებულია კათოდიდან ელექტრონების ემისიასთან. ფიზიკიდან ცნობილია, რომ ემისია შეიძლება იყოს:

1. თერმოელექტრონული, როდესაც ელექტრონების ემისია განმუხტვისას გახურებული კათოდიდან მიმდინარეობს;
2. თერმოელექტრონული, როდესაც კათოდი გახურებულია გარე წყაროთი;
3. ცივი ემისია, რომელიც გამოწვეულია მძლავრი ელექტრული ველების მოედებით,

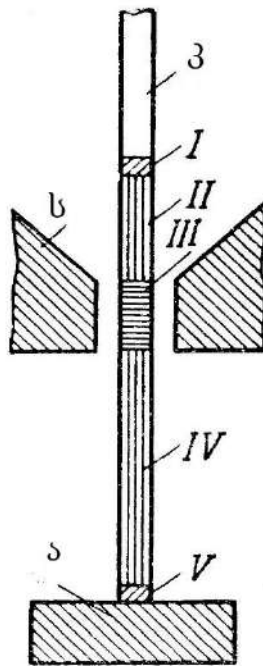
პირველ ეტაპზე, სპეციალური მოწყობილობის მიერ, რომელსაც ოსცილიატორი ეწოდება, კათოდსა და საქშენს შორის მიეწოდება მაღალი მნიშვნელობის ძაბვის იმპულსები, რომელთა მაქსიმალური მნიშვნელობა შეიძლება იყოს 6000 ვ-მდე, ხოლო სიხშირე 500 კჰც-მდე. ამ დროს კათოდის ზედაპირიდან მიმდინარეობს ელექტრონების ცივი ემისია, კათოდსა და საქშენს შორის აღიგზნება მორიგე რკალი, რომლის ლითონთან შეხებისას აღიძვრება ძირითადი პლაზმური რკალი. ოსცილიატორი ითიშება და შემდეგ, იწყება კათოდიდან თერმოელექტრონული ემისია, ხოლო განმუხტვის საკანში წნევით მიწოდებული აირი განიცდის თერმოიონიზაციას. ამ დროს ადგილი აქვს დენის

ძალის ზრდას და ძაბვის შემცირებას. თერმოელექტრონების ნაკადი და, შესაბამისად, დენის მნიშვნელობა საკმარისია პლაზმური რკალის ნათების სტაბილურობისათვის.

პლაზმური რკალი შედგება სამი უბნისაგან: ანოდური, კათოდური და რკალის სვეტი. თითოეული მათგანი ხასიათდება შესაბამისი ძაბვის ვარდნით: $U_a, U_k, U_{რკ.სვ.}$. სრული ძაბვის ვარდნა რკალზე ტოლია:

$$U = U_a + U_k + U_{რკ.სვ.}$$

პლაზმური ჭრა, როგორც წესი, ხორციელდება პირდაპირი პოლარობის მუდმივი დენის პლაზმური რკალით. კათოდის ზედაპირთან მიმდებარე უბანს ეწოდება კათოდური ლაქა, პლაზმური რკალის იმ უბანს, რომელიც გასაჭრელი ფურცლის ჭრის არეში იმყოფება და მოჭიდებულია გარკვეულ სიღრმეზე ეწოდება ანოდური ლაქა, ხოლო ანოდურ და კათოდურ ლაქებს შორის უბანს – რკალის სვეტი.



სურ. 2. 1

პირდაპირი მოჭმედების პლაზმური რკალის უბნები

პლაზმური ჭრისას რკალში შეგვიძლია გამოვყოთ შემდეგი ერთგვაროვანი უბნები (სურ. 2.1). I – შემოსაზღვრულია ერთი მხრიდან კათოდური უბნით, მეორე მხრიდან კი საქშენის ცილინდრული არხის ზედა ნაწილით. II – საქშენში განლაგებული რკალის ნაწილი, III – საქშენის ქვედა ზედაპირიდან გასაჭრელი ფურცლის ზედა სიბრტყემდე, IV – ჭრის არეში, ფურცლის ზედა სიბრტყესა და ანოდურ ლაქას შორის და V – ანოდური ლაქა. პირველ უბანზე რკალის ძაბვა პრაქტიკულად არ იცვლება

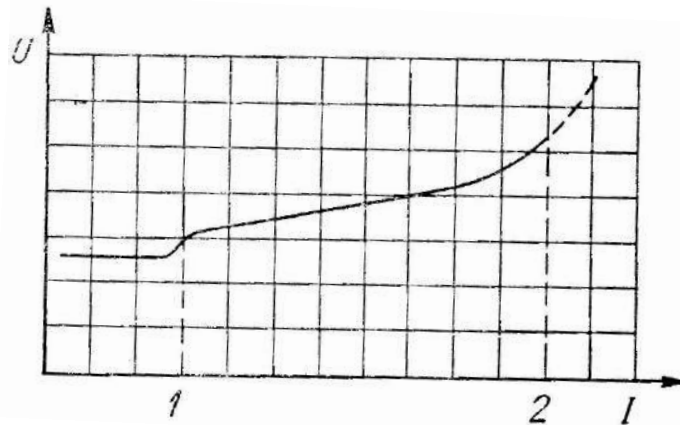
დენის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის $U(I) = \text{const}$. მეორე უბანზე რკალის დაბვა იზრდება დენის ძალის ზრდასთან ერთად. $U(I) = A + BI$. A და B მუდმივებია, რომლებიც დამოკიდებულია საქმენის გეომეტრიაზე, აირის სახეობასა და ხარჯზე. მესამე უბანზე კი, დაბვა მცირდება დენის ძალის ზრდასთან ერთად $U(I) = C - DI$. ამ სახის დამოკიდებულება შეიძლება ავხსნათ იმით, რომ რკალის ამ უბნის გახურება ხდება, უფრო მეტად გახურებული მე-2 უბნიდან სითბოს გადაცემით და ამასთან ამ უბანში რკალის სიგრძე არ იცვლება. მეოთხე უბანზეც დაბვა ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას და რკალი ანთია ლითონის ორთქლში. ამრიგად, პლაზმური რკალი შედგება უბნებისაგან სადაც დაბვის დენის ძალაზე დამოკიდებულება (ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი) არის ხისტი ($U(I) = \text{const}$), ვარდნილიც და ზრდადი, ხოლო რკალის საერთო ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი დამოკიდებულია თითოეული უბნის ფორმასა და მათ წვლილზე რკალის დაბვის სრულ მნიშვნელობაში. ამიტომ, პლაზმური რკალის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ხასიათი დამოკიდებულია საქმენის არხის დიამეტრსა და სიმაღლეზე, საქმენის ქვედა ზედაპირსა და გასაჭრელი ფურცლის ზედა სიბრტყეს შორის მანძილზე, კათოდსა და საქმენის არხის ზედა ზედაპირს შორის მანძილზე და ანოდური ლაქის ჩაძირვის სიღრმეზე ჭრის არეში.

ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების ხასიათი ასევე დამოკიდებულია დენის ძალასა და პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე. ამასთან ერთად ჭრის პროცესში რკალის სიგრძე არ არის ფიქსირებული და იცვლება. უმჯობესია მახასიათებლების აგება შესრულდეს ან გადაადგილების მუდმივი სიჩქარის რეჟიმში, ან მაქსიმალურად შესაძლებელ სიჩქარეზე.

მუდმივი სიჩქარის პირობებში დენის ძალის ცვლილებისას, განუწყვეტლივ იცვლება თანაფარდობა ჭრის არიდან გამოდნობილი ლითონის ინტენსიურობასა და სიჩქარეს შორის, რაც, თავის მხრივ, გავლენას ახდენს ჭრის სიგანესა და ანოდური ლაქის ჩაძირვის სიღრმეზე, ეს კი რკალის სრული სიგრძის ცვლილებას იწვევს, რაც აისახება დაბვაზე.

მცირე დენზე, ფურცლის გაჭრა არ მიმდინარეობს, ამიტომ რკალის სიგრძე არ იცვლება და შესაბამისად დაბვის მნიშვნელობაც მუდმივია. დენის გარკვეული მნიშვნელობიდან დაწყებული ფურცელი იჭრება მთელ სისქეზე, გამდნარი ლითონი გამოიდე-

ნება და ანოდური ლაქა მყისიერად იძირება ჭრის არეში, სიგრძე იზრდება და ძაბვა ნახტომისებურად იზრდება (სურ. 2.2). დენის ძალის შემდგომი ზრდისას იზრდება



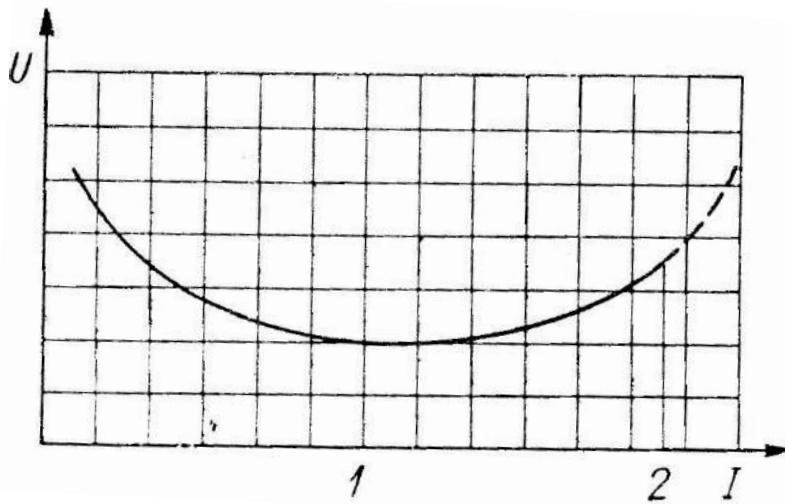
სურ. 2.2

პლაზმური რკალის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები პლაზმატრონის გადაადგილების მუდმივი სიჩქარის პირობებში

ჭრის სიგანე, რასაც მოსდევს ანოდური ლაქის ჩაძირვა, სიგრძის გაზრდა და ძაბვის მომატება. მაგრამ ეს მატება ნაკლებად ინტენსიურია, რადგან დენის ზრდა მუდმივი სიგანის პირობებში იწვევს ანოდური ლაქის აწევას და ძაბვის შემცირებას. ვინაიდან თანაფარდობა დენის ძალასა და ჭრის სიგანეს შორის დამოკიდებულია გასაჟრელი მასალის გვარობასა და ფურცლის სისქეზე, ამიტომ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის დახრის კუთხე დამოკიდებული იქნება ამ პარამეტრებზე. სურ. 2.2-ზე მოცემული ვოლტ-ამპერულ მახასიათებლის მეორე გამრუდება აიხსნება იმით, რომ საქშენის არხის მოცემული დიამეტრისათვის, დენის ძალის ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობაზე (წყვეტილი წირი) საქშენის შიგნით მკვეთრად იწყებს ზრდას რკალის ელექტრული ველის დამაბულობა.

განვიხილოთ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ხასიათი ჭრის მაქსიმალურ სიჩქარეზე (ნახ.3). მცირე დენების დროს, რკალი ღრმად უნდა იყოს ჩაძირული ჭრის არეში, რათა გასაჟრელი ფურცლის ქვედა შრეებში უზრუნველყოფილი იყოს საკმარისი სითბოს ნაკადი დნობის ზედაპირზე. დენის ამ დიაპაზონში რკალის ძაბვა მცირდება დენის ძალის ზრდასთან ერთად. დენის ძალის გარკვეული მნიშვნელობიდან დაწყებული, ანოდური ლაქა ინაცვლებს ფურცლის ზედა შრეებისაკენ და რკალის სიგრძე რჩება უცვლელი. ამ მომენტიდან ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ფორმას განსაზღვრავს რკალის დანარჩენი უბნების მახასიათებლები, როგორც სურ. 2.3-ზე ჩანს, ძაბვა დენის

გარკვეულ მნიშვნელობამდე კლებულობს, შემდეგ კი იწყებს ზრდას.

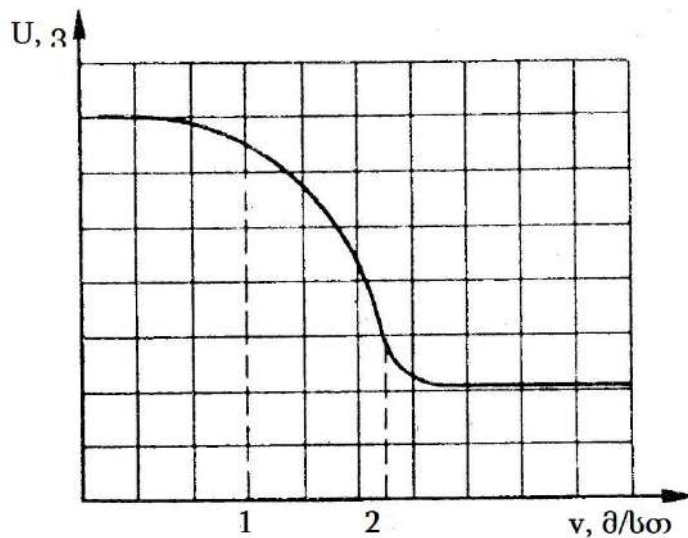


სურ. 2.3

პლაზმური რკალის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ჭრის მაქსიმალური სიჩქარის რეჟიმში.

განვიხილოთ, თუ როგორ გავლენას ახდენს პლაზმური რკალის დაბვაზე პლაზმატრონის გადაადგილების (ჭრის) სიჩქარე. დაბალ სიჩქარეებზე, ვინაიდან გადნობის ფრონტი მნიშვნელოვნად უსწრებს პლაზმატრონს და შესაბამისად პლაზმურ რკალს, ამიტომ ანოდური ლაქა ჩაძირულია ლითონის ქვედა შრეებში და მოჭიდებულია გვერდით კედელზე. სიჩქარის თანდათანობით მომატება, იწვევს ჭრის სიგანის შემცირებას და ანოდური ლაქაც იწევს ზედა შრეებისაკენ. ამავდროულად, მცირდება მანძილი დნობის ფრონტსა და რკალს შორის, ამის შედეგად, სიჩქარის გარკვეული მნიშვნელობის დროს ანოდური ლაქა გვერდითა კედლიდან გადაინაცვლებს დნობის ფრონტზე. სიჩქარის შემდგომი გაზრდისას ანოდური უბანი დნობის ფრონტის გასწვრივ საკმაოდ სწრაფად გადაადგილდება ფურცლის ზედაპირულ შრეებში, და გარკვეულ სიჩქარეზე ჭრა წყდება. ამრიგად, დაბალ სიჩქარეზე დაბვა მაქსიმალურია, რის შემდეგ იწყებს კლებას და შემდეგ აღარ იცვლება. პლაზმური რკალის დაბვის დამოკიდებულება ჭრის სიჩქარეზე ნაჩვენებია სურ, 2.4-ზე.

როგორც ვნახეთ, პლაზმური რკალის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების შესწავლისას, დაბვის მნიშვნელობა დამოკიდებულია რკალის სიგრძეზე მის სხვადასხვა უბანზე. ამ დამოკიდებულების შესწავლა მნიშვნელოვანია, რადგან სხვადასხვა სიმძლავრის პლაზმატრონებისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება პლაზმური რკალის სრული სიგრძის მინიმალური და მაქსიმალური მნიშვნელობების ცოდნას. მინიმალურ დასაშ-



სურ. 2.4

პლაზმური რკალის ძაბვის დამოკიდებულება ჭრის სიჩქარეზე

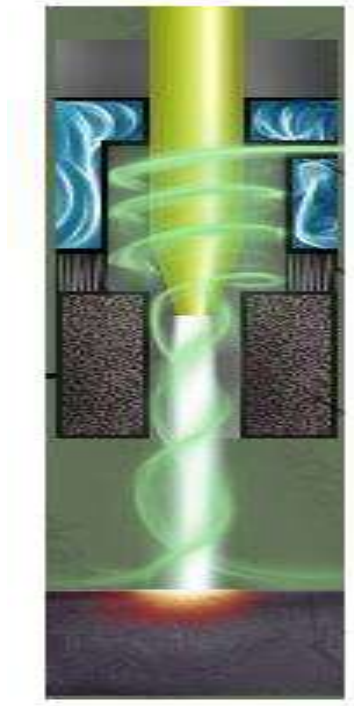
1.- ანოდური ლაქა გადაადგილდება ფურცლის ზედა ფენებისკენ.

2. პლაზმური ჭრა შეწყვეტილია

ვებ ნაკლებ მანძილზე იქმნება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება, რომელსაც პლაზმატრონი გამოჰყავს მწყობრიდან. ხოლო მაქსიმალურ სიგრძეზე წარმოიქმნება რკალის წყვეტის საშიშროება და ტექნოლოგიური პროცესი წყდება. ამასთან, პლაზმატრონსა და გასაჰრელი ლითონის ზედაპირს შორის მანძილი, ისე უნდა იყოს შერჩეული, რომ ანოდური ლაქა მაქსიმალურად ჩაიძიროს ლითონში და მაქსიმალურად იყოს უზრუნველყოფილი რკალის გადნობისუნარიანობის თვისება. ცხადია, რკალის ძაბვის სიგრძეზე დამოკიდებულება განსხვავებული იქნება სხვადასხვა სიმძლავრის რკალისათვის, საქმენის არხის დიამეტრისათვის, დენის ძალისა და აირის ხარჯისათვის და სხვ.

პლაზმურ ტექნოლოგიებში მნიშვნელოვანია ძაბვის დამოკიდებულება ისეთ პარამეტრებზე, როგორცაა პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯი და წნევა. ვინაიდან პლაზმური ჭრის პლაზმატრონებში აირი საქმენში მიეწოდება ტანგენციალურად (სურ. 2.5), ამიტომ აირის ნაკადის სიჩქარის რადიალური მდგენელი განაპირობებს რკალის შეკუმშვის ხარისხს, მის დაგრძელებას საქმენის არხში და სტაბილიზაციას. მცირე ხარჯზე, როდესაც საკმაოდ მცირეა აირის სიჩქარე, რკალის აღზნება და სტაბილური ნათება საქმენში შეუძლებელია. დაწყებული გარკვეული მნიშვნელობიდან იზრდება რკალის შეკუმშვის ხარისხი და სიგრძე, შესაბამისად მატულობს ძაბვა, რომლის მნიშვნელობა საკმარისია აღზნების, სტაბილიზაციისა და ჭრის პროცესის

დაწყებისათვის. ხარჯის შემდგომი ზრდისას. მიუხედავად ძაბვის მატებისა, მცირდება აირის კუთრი ენტალპია, საშუალომასური ტემპერატურა და ჭრის პროცესი შეუძლებელი ხდება. აირის ხარჯის საკმაოდ დიდი მნიშვნელობისას, მაღალი სიჩქარის გამო ხდება რკალის წყვეტა. ამიტომ ტექნოლოგიის შემუშავებისას დადგენილი უნდა იყოს აირის ხარჯის ცვლილების დასაშვები დიაპაზონი აირის მოცემული წნევისათვის.



სურ. 2.5

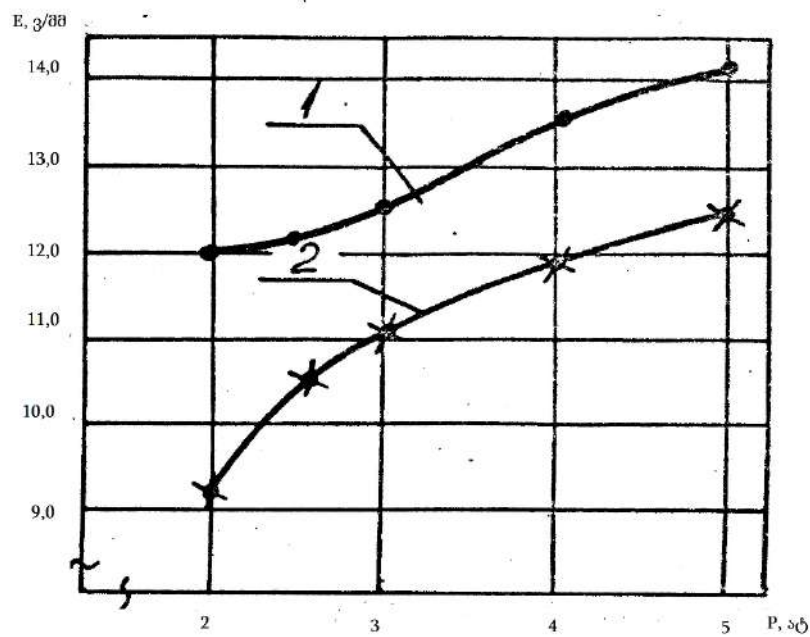
პლაზმატრონიში აირის ტანგენციალური მიწოდებისა და შეკუმშვის სქემა

აირის წნევაც მნიშვნელოვან როლს თამაშობს რკალის აღზნებისა და სტაბილიზაციის პირობების შექმნაში. ლიტერატურიდან ცნობილია, ფორმულა რომელიც გამოსახავს რკალის ელექტრული ველის დამოკიდებულებას აირის ხარჯსა და წნევაზე.

$$E = 2,64 \times 10^{-2} \times \frac{G^{0,15} P^{0,19}}{d^{0,92}} \left(355 \times 10^{-2} \frac{I}{d} + 5,13 \times 10^{-7} \frac{I^2}{d^2} \right). \quad (2.1)$$

საიდანაც ჩანს, რომ დამაბულობა და შესაბამისად ძაბვაც იზრდება ამ ორი პარამეტრის მატებით. წნევის გავლენა ძაბვაზე შეიძლება აიხსნას ანალოგიურად ხარჯის გავლენისა. წნევის გავლენა განსაკუთრებით დიდ გავლენას ახდენს წყლის ორთქლის გამოყენებისას პლაზმაწარმომქმნელ გარემოდ. მნიშვნელოვანია ის ფაქტი, რომ გადახურებული წყლის ორთქლის შემთხვევაში პლაზმური რკალის აღზნება შესაძლებელია, როგორც დაბალ, ისე მაღალ წნევებზე (2 ÷ 10 ატმ). ნაჯერობის

მდგომარეობაში, წნევის მატებასთან ერთად, იზრდება ორთქლის ტემპერატურაც. შესაბამისად, სუსტდება როგორც მოლეკულებს შორის, ისე ატომშიგა კავშირები, რაც იწვევს იონიზაციის მუშაობის შემცირებას. ძაბვის ზრდის მექანიზმი წყლის ორთქლის შემთხვევაში დაკავშირებულია რკალის შუნტირებასთან საქშენის კედელზე, იქ სადაც იკვეთება სასაზღვრო და სითბური შრეები. ერთი მხრივ, ტემპერატურის ზრდა იწვევს ორთქლის დინამიკური სიბლანტის ზრდას, რაც ამცირებს რეინოლდსის რიცხვს. შესაბამისად სასაზღვრო შრე სქელდება (შრის სისქე უკუპროპორციულია კვადრატული ფესვისა რეინოლდსის რიცხვიდან), მეორე მხრივ, იზრდება ხარჯვითი სიჩქარე და მცირდება სითბური შრის ზრდა, რის შედეგადაც საქშენში სასაზღვრო და სითბური შრეების კვეთა გადაადგილდება ქვემოთ აირის ნაკადის მიმართულებით, რკალი იჭიმება და ძაბვაც იზრდება. სურ. 2.6-ზე მოყვანილია რკალის ელექტრული ველის დამაბულობის დამოკიდებულება პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევაზე შეკუმშული ჰაერისა და წყლის ორთქლისათვის. ორივე შემთხვევაში მუშა დენის ძალა 200 ა-ის ტოლია, ხოლო საქშენის არხის დიამეტრია 2,5 მმ.



სურ. 2.6

პლაზმური რკალის ელექტრული ველის დამაბულობის დამოკიდებულება

პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევაზე

1. წყლის ორთქლი - $I=200$ ა;
2. შეკუმშული ჰაერი - $I=200$ ა.

წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, რომ პლაზმაწარმოქმნილი გარემოს შერჩევის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია ელ. ველის დამაბულობა, რომელიც განსაზღვრავს ელექტრული ენერგიის სითბურ ენერგიაში გარდაქმნის ეფექტურობას. ფიზიკის კურსიდან ცნობილია, რომ ელექტრული ველის დამაბულობა განისაზღვრება ფორმულით: $E = U/l$, სადაც E – დამაბულობაა, U – ძაბვაა, ხოლო l – რკალის სიგრძე. როგორც ფორმულიდან ვხედავთ, დამაბულობა რიცხობრივად ტოლია რკალის 1 სმ სიგრძეზე ძაბვის ვარდნისა, სწორედ ის განსაზღვრავს ამ უბანზე გამოყოფილი სითბოს რაოდენობას. პლაზმური რკალის თბური სიმძლავრე ასევე დამოკიდებულია რკალის დენის ძალასა და მის სიმკვრივეზე, რომელიც განისაზღვრება დენის ძალის ფარდობით რკალის განივი კვეთის ფართობთან, ანუ გვიჩვენებს, რკალის კვეთის ფართობის ერთეულში გამავალი დენის ძალისა და თბური ენერგიის ანოდურ ლაქაში კონცენტრირების ხარისხს:

$$j = k \frac{4I}{\pi d_b^2}.$$

აქ j – დენის ძალის სიმკვრივეა, ა/მ², d_b – საქშენის არხის დიამეტრია, I – რკალის დენის ძალაა, $k = 0,6 - 0,9$ პლაზმით საქშენის არხის შევსების კოეფიციენტი. პლაზმური რკალის ელექტრული ველის დამაბულობის ზრდა დაკავშირებულია რკალის შეკუმშვის პროცესთან. ვინაიდან ამ დროს რკალი გრძელდება, რაც იწვევს ძაბვის ზრდას. მეორე მხრივ, იზრდება დენის ძალის სიმკვრივე. პლაზმის ერთ-ერთი ელექტრული პარამეტრია კუთრი ელექტროგამტარობა, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია პლაზმის ტემპერატურაზე. ცხადია, რაც მეტია ტემპერატურა, მით მეტია იონიზირებული ატომები და შესაბამისად ელექტრონებისა და დადებითი იონების რაოდენობა, რაც, თავის მხრივ, ხელს უწყობს პლაზმის ელექტროგამტარებლობის ზრდას. მისი ზრდა, თავის მხრივ, განსაზღვრავს დენის ძალის ზრდას. ამრიგად, დენის ძალის სიმკვრივე, კუთრი ელექტროგამტარებლობა და პლაზმის ელექტრული ველის დამაბულობა დამოკიდებულია ერთმანეთზე, რომელიც გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$j = \sigma E. \quad (2.2)$$

სადაც σ – პლაზმის კუთრი ელექტროგამტარობაა.

პლაზმური რკალის დენის ძალაზეა დამოკიდებული რკალის გეომეტრიული

პარამეტრები. კერძოდ კი, მისი დიამეტრი გამოითვლება ფორმულით:

$$d = 2K^3 \sqrt{\frac{IU_b}{G-h}} l_y. \quad (2.3)$$

სადაც, U_b – რკალის ძაბვაა საქშენის არხში, G – პლაზმაწარმოქმნელი აირის ხარჯია, h – აირის ენტალპიაა პლაზმატრონის შესასვლელზე, l_y – მანძილი კათოდის ქვედა სიბრტყიდან საქშენის არხის ზედა სიბრტყემდე. კათოდის ქვედა ზედაპირიდან დაშორებით პლაზმური რკალის დიამეტრი იზრდება და მას აქვს კონუსური ფორმა. დენის ძალის ზრდაც იწვევს დიამეტრის ზრდას. იმისათვის, რომ გავზარდოთ დენის ძალის მაქსიმალურად დასაშვები მნიშვნელობა, საქშენის არხის დიამეტრის შეუცვლელად, მიზანშეწონილია არხის სიმაღლის შემცირება. ამასთან ერთად შესაძლებელია არხის დიამეტრის შემცირებაც, რაც გაზრდის თბური ენერჯის კონცენტრირების ხარისხს, მაგრამ პლაზმატრონის სტაბილური მუშაობისათვის რკალის დიამეტრი, არ უნდა აღემატებოდეს საქშენის არხის დიამეტრს. (2.3) ფორმულის საშუალებით შესაძლებელია მიახლოებით გამოვთვალოთ საქშენის არხის დიამეტრი დენის ძალისა და აირის ხარჯის მოცემული მნიშვნელობისათვის.

დენის ძალა ასევე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს რკალის გადნობისუნარიანობაზე, ძალურ ზემოქმედებაზე ლითონის ზედაპირზე, რკალის ნათების სტაბილურობაზე,

3. პლაზმური რკალის ენერგეტიკული მახასიათებლები

რკალის სრული სიმძლავრე. რკალის ეფექტური თბური სიმძლავრე. თბური დანაკარგები. ეფექტური მქკ. პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს გავლენა პლაზმური რკალის ენერგეტიკაზე. ენერგეტიკული მახასიათებლების დამოკიდებულება რკალის დენის ძალაზე, პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯზე და წნევაზე

პირდაპირი მოქმედების რკალით მასალების პლაზმურმა დამუშავებამ ფართო გამოყენება ჰპოვა წარმოებაში ისეთი თავისებურებების გამო, რომელიც საშუალებას იძლევა ფართო დიაპაზონში ვარეგულიროთ რკალის ენერგეტიკული მახასიათებლები. ენერგეტიკული მახასიათებლების ცოდნა მნიშვნელოვანია როგორც კონკრეტული ტექნოლოგიის, ისე პლაზმატრონების კონსტრუქციის შემუშავებისათვის. ენერგეტიკულ მახასიათებლებს მიეკუთვნება რკალის სრული და ეფექტური თბური სიმძლავრე, თბური დანაკარგები, ეფექტური მქკ და სხვ.

წინა ლექციებში აღვნიშნეთ, რომ პლაზმურ რკალში ხდება ელექტრული ენერჯის გარდაქმნა თბურ ენერჯიაში, ამიტომ რკალის თბური სიმძლავრე განისაზღვრება პლაზმური რკალის ძაბვით და დენის ძალით:

$$q = UI. \quad (3.1)$$

ის დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქმნელი აირის გვარობაზე, ხარჯსა და წნევაზე. რადგან რკალის ძაბვა, თავის მხრივ, დამოკიდებულია საქშენის არხის დიამეტრსა და რკალის სიგრძეზე, ამიტომ მათი გავლენის შესწავლას თბურ სიმძლავრეზე, ასევე დიდი ყურადღება ენიჭება.

იმისათვის, რომ სრულად შეფასდეს პლაზმური ჭრის პროცესის ენერგეტიკა, შევადგინოთ თბური ბალანსის განტოლება. პლაზმური რკალის სრული თბური სიმძლავრე იხარჯება პლაზმატრონის ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტების (კათოდი, საქშენი) გახურებაზე, რკალის ღია უბანზე გარემოში კონვექციით და გამოსხივებით გამოყოფილ სითბოზე, გასაჭრელ ფურცელზე გადაცემულ სითბოზე და ჭრის არიდან პლაზმური რკალის ალით დაკარგულ სითბოზე:

$$q = q_b + q_j + q_g + q_{\text{ფ}} + q_a. \quad (3.2)$$

განვიხილოთ (3. 2) ტოლობის თითოეული შემადგენელი ცალ-ცალკე. კათოდის მუშაობის რესურსი დამოკიდებულია რკალის დენის ძალის სიდიდეზე, კათოდის მუშა ზედაპირზე წარმოქმნილი ჟანგეულებისა და ნიტრიდების თბოფიზიკურ თვისებებზე,

გაცივების ინტენსიურობასა და სხვ. დენის ძალის გავლენა განისაზღვრება შემდეგი ფაქტორებით:

1. კათოდში დენის გავლის შედეგად გამოყოფილი სითბოთი:

$$q'_j = 4I^2 \rho / \pi d_3^2, \quad (3.3)$$

სადაც, I – დენის ძალა; ρ – კათოდის მასალის კუთრი წინაღობა; I_3 – კათოდის მასალის სიგრძე; d_3 – კათოდის დიამეტრი.

2. კათოდის აქტიურ ზედაპირზე, დადებითი იონების ბომბარდირების შედეგად გამოყოფილი სითბოთი. ბომბარდირებისას კათოდს გადაეცემა იონების კინეტიკური და პოტენციური ენერგია:

$$q''_j = I(1-\gamma)(U_3 + U_i - \phi_3), \quad (3.4)$$

სადაც, γ – რკალის ელექტრონული დენის წილი; U_3 – კათოდური ძაბვის ვარდანაა; U_i – დადებითი იონების იონიზაციის პოტენციალი; ϕ_3 – ელექტრონების გამოსვლის მუშაობა.

3. კათოდსა და პლაზმურ რკალს შორის თბოცვლის პროცესით.

$$q_{3j} = \alpha_j S_j (T_3 - T_j), \quad (3.5)$$

სადაც, α_j – თბოგაცემის კოეფიციენტი პლაზმური რკალის სვეტიდან კათოდზე, მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქნელი გარემოს გვარობაზე; S_j – კათოდის ზედაპირის ფართობი, რომელიც მონაწილეობს თბოცვლის პროცესში; T_3 და T_j – შესაბამისად პლაზმური რკალის და კათოდის ზედაპირის საშუალო ტემპერატურებია.

4. კათოდის ზედაპირიდან ელექტრონების ემისიის ინტენსიურობით.

საქმენში თბურ დატვირთვას განიცდის არხი, სადაც მიმდინარეობს რკალის სტაბილიზაცია. თბური სიმძლავრე გამოიანგარიშება ფორმულით:

$$q_b = \alpha_b S_b (T_3 - T_b), \quad (3.5)$$

სადაც, α_b – თბოგაცემის კოეფიციენტი პლაზმური რკალის სვეტიდან საქმენზე, მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქნელი გარემოს გვარობაზე; S_b – საქმენის არხის ზედაპირის ფართობი, რომელიც მონაწილეობს თბოცვლის პროცესში. ფართობი თავის მხრივ გამოითვლება საქმენის არხის დიამეტრით და სიმაღლით $S_b = \pi dh$. T_3 და T_b – შესაბამისად პლაზმური რკალის და საქმენის კედლის საშუალო ტემპერატურებია.

გარემოში თბური დანაკარგები, როგორც აღვნიშნეთ, გამოწვეულია კონვექციური

თბოგაცემის პროცესებსა და გამოსხივებასთან. პირველი დამოკიდებულია პლაზმისა და გარემოს ტემპერატურაზე:

$$q_{კონ} = \alpha_{კონ}(T_{კ} - T_{გ}), \quad (3.6)$$

$\alpha_{კონ}$ – კონვექციური თბოგაცემის კოეფიციენტი; $T_{გ}$ – გარემოს ტემპერატურა.

გამოსხივებით დაკარგული სითბო კი დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქნელი გარემოს სახეობასა და პლაზმის ტემპერატურაზე:

$$q_{გაგ} = CT_{კ}^4, \quad (3.7)$$

C – პროპორციულობის კოეფიციენტი.

გასაჭრელ ფურცელზე გადაცემული სითბო შედგება ორი კომპონენტისაგან: $q'_{გ}$ – ანოდურ ლაქაში ელექტრული დენის გავლისას მიღებული ენერჯისაგან და $q''_{გ}$ – პლაზმიდან მიღებული ენერჯით. ფურცლის მიერ მიღებული სითბო, თავის მხრივ, იხარჯება მთელი ფურცლის გახურებასა და ლითონის ლოკალურ გამოდნობაზე.

ელექტრული დენით გადაცემული ენერჯია დამოკიდებულია ელექტრონების პოტენციურ, კინეტიკურ და თერმულ ენერჯიაზე:

$$q'_{გ} = I(U_{კ} + \phi_{კ} + \frac{3}{2} \times \frac{KT}{e}), \quad (3.8)$$

$U_{კ}$ – ანოდური ძაბვის ვარდნა; $\phi_{კ}$ – ანოდის მასალის გამოსვლის მუშაობა; K – ბოლცმანის მუდმივა.

პლაზმური რკალიდან მიღებული სითბო დამოკიდებულია ეფექტურ მქკ-ზე:

$$q''_{გ} = \eta_{ეფ} \times q, \quad (3.9)$$

როგორც ვიცით, ლითონის გახურებისა და გამოდნობისათვის აუცილებელი სითბოს რაოდენობა შედგება ორი კომპონენტისაგან: სითბოს რაოდენობა, რომელიც აუცილებელია გასახურებლად დნობის ტემპერატურამდე და გადნობისათვის აუცილებელი სითბოს რაოდენობისაგან. ის გამოითვლება ფორმულით:

$$q_{გ} = \nu \rho \sigma \delta [c(T_{დნ} - T_0) + q_{დნგ}]. \quad (3.10)$$

აქ, ν – პლაზმური ჭრის სიჩქარე; ρ – ლითონის სიმკვრივე; $q_{დნგ}$ – დნობის ფარული სითბო (სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც აუცილებელია ერთეული მასის მყარი ნივთიერების თხევად მდგომარეობაში გადასაყვანად ტემპერატურის შეუცვლელად); $T_{დნ}$ – დნობის ტემპერატურა. ლითონზე გადაცემული სითბოს რაოდენობის ნაწილი იხარჯება გასაჭრელი ფურცლის გაცხელებაზე თბოგამტარებლობის გამო, ამიტომ თუ ამ

სითბოსაც გავითვალისწინებთ, მაშინ (3.8), (3.9) და (3.10) გამოსახულებები ჩავწერთ გაერთიანებულ სახით:

$$I(U_s + \varphi_s + 3/2 \times KT/e) + \eta_{\text{აფფ.}} \times q = V\rho\sigma\delta[c(T_{\text{დფ}} - T_0) + q_{\text{დფფ}}] + \lambda\sigma\delta T_{\text{დფ}}. \quad (3.11)$$

უკანასკნელ ფორმულაში სრული თბური სიმძლავრე გამოვსახოთ რკალის ელექტრული ველის დაძაბულობისა და რკალის სიგრძის საშუალებით და საბოლოოდ მივიღებთ:

$$I(U_s + \varphi_s + 3/2 \times KT/e) + \eta_{\text{აფფ.}} \times IEl_{\text{რკ}} = \nu\rho\sigma\delta[c(T_{\text{დფ}} - T_0) + q_{\text{დფფ}}] + \lambda\sigma\delta T_{\text{დფ}}. \quad (3.12)$$

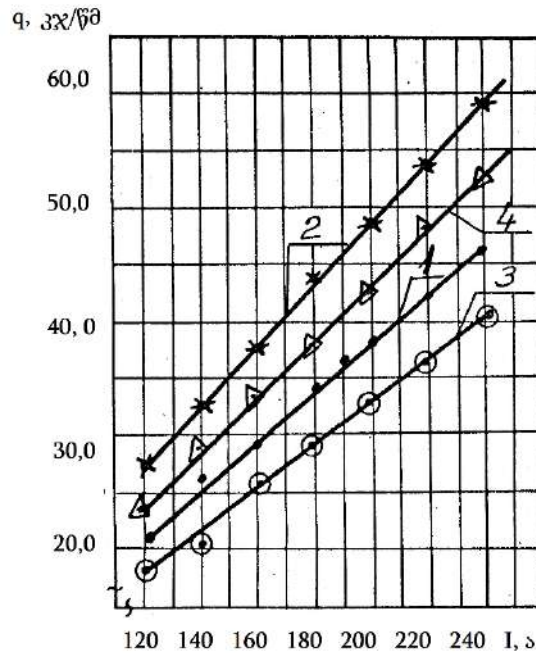
აქ λ – ლითონის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტი.

სითბური პროცესებში დიდ როლს თამაშობს პლაზმამომქმნელი გარემოს ქიმიური თვისებები. როგორც ადრე აღვიშინეთ ჟანგბადშემცველ აირებში პლაზმური ჭრისას, ლითონსა და ჟანგბადს შორის მიმდინარეობს თერმოქიმიური რეაქციები. კერძოდ, ლითონის წვისას ჟანგბადში გამოიყოფა სითბოს დიდი რაოდენობა, რომელიც ზრდის რკალის მოქმედების თბურ ეფექტს. ამ მხრივ საინტერესოა წყალბადშემცველი აირებიც, მაგალითად, წყლის ორთქლი. მისი მოლეკულების დისოციაცია მიმდინარეობს სითბოს შთანთქმით, ხოლო 5000°C - ის ფარგლებში ადგილი აქვს წყალბადის დისოციაციას, ასევე დიდი რაოდენობის სითბოს შთანთქმით. პლაზმის ცივ ლითონთან შეხებისას მიმდინარეობს წყალბადის და ჟანგბადის მოლეკულების რეკომბინაცია სითბოს გამოყოფით, რომელიც ასევე ემატება რკალის თბურ ენერგიას.

ზემო თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ პლაზმური ჭრის პროცესის ენერგეტიკული მახასიათებლები დამოკიდებულია დენის ძალაზე, პლაზმამომქმნელი გარემოს გვარობაზე, მის ხარჯზე, წნევაზე, რკალის სიგრძესა და სხვ.

პლაზმური რკალის სრული თბური სიმძლავრე განისაზღვრება ელექტრული მახასიათებლებით. რადგან პლაზმური ჭრა მიმდინარეობს პირდაპირი მოქმედების მუდმივი დენის რკალით, ამიტომ კვების წყაროებში რეგულირებადია დენის ძალა. (3.1) ფორმულიდან ავტომატურად გამომდინარეობს, რომ სრულ თბურ სიმძლავრესა და დენის ძალას შორის პირდაპირპროპორციული დამოკიდებულებაა. მაგრამ ცალსახად დამოკიდებულების განხილვა ტექნოლოგიის შემუშავებისას დაუშვებელია. აუცილებელია გავითვალისწინოთ ყველა პარამეტრის გავლენა კომპლექსურად, და საბოლოოდ შერჩეულ იქნეს მათი ოპტიმალური მნიშვნელობები. დენის ძალის გავლენის შესწავლისას, დანარჩენი პარამეტრები უნდა იყოს ფიქსირებული. საქმენის არხის დიამეტრი განსაზღვრავს რკალის შეკუმშვის ხარისხს, ამიტომ ის გავლენას ახდენს რკალის ძაბვაზე.

აქედან გამომდინარე, აირის მოცემული ხარჯისა და წნევისათვის სხვადასხვა დიამეტრის საქშენებისათვის დენის ძალის ერთი და იმავე მნიშვნელობისათვის სრული თბური სიმძლავრე განსხვავებული იქნება. სურ. 3.1-ზე მოცემულია სრული თბური სიმძლავრის დამოკიდებულება დენის ძალაზე შეკუმშული ჰაერისა და წყლის ორთქლის შემთხვისათვის. შედეგები მიღებულია საქშენებისათვის არხის დიამეტრით 2,5 მმ და 4 მმ.



სურ. 3.1

სრული თბური სიმძლავრის დამოკიდებულება დენის ძალაზე

1. წყლის ორთქლი. 3. შეკუმშული ჰაერი

$P=4$ ატ, $d_s=4$ მმ;

2. წყლის ორთქლი. 4. შეკუმშული ჰაერი;

3. $P=4$ ატ, $d_s=2,5$ მმ.

მოყვანილი დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ მოცემულ შემთხვევაში სრული თბური სიმძლავრე 2,5 მმ დიამეტრის საქშენისათვის 20-23 %-ით აღემატება თბურ სიმძლავრეს 4 მმ დიამეტრის საქშენთან შედარებით.

პლაზმაწარმოქმნელი აირის ხარჯის და წნევის ზრდა იწვევს სრული თბური სიმძლავრის მატებას. მე - 2 პარაგრაფში განვიხილეთ ამ ორი პარამეტრის გავლენის მექანიზმი რკალის დაბვაზე. რადგან დაბვა იზრდება, ცხადია სრული თბური სიმძლავრეც იმატებს. პლაზმაწარმოქმნელი გარემოს გვარობის გავლენა კარგად ჩანს სურ. 3.1-ზე მოყვანილი დამოკიდებულებიდან. კერძოდ, დენის ერთი და იმავე მნიშვნელობისათვის წყლის ორთქლის გარემოში სიმძლავრე 15-19%-ით აღემატება სიმძლავრეს

შეკუმშულ ჰაერთან შედარებით. ეს დამოკიდებულებაც გასაგებია. სხვადასხვა გარემოს თბოფიზიკური თვისებები განსაზღვრავს პლაზმური რკალის თბურ პარამეტრებს. როგორც ადრე აღვნიშნეთ, წყალბადშემცველი გარემო (წყალბადის გამო) ხასიათდება რკალის ელექტრული ველის მაღალი დამაბულობით, რაც განაპირობებს პლაზმური რკალის გენერირებას მაღალი ელექტრული მახასიათებლებით.

პლაზმური ტექნოლოგიური პროცესებისათვის მნიშვნელოვანია რკალის თბური სიმძლავრის გამოყენების ეფექტურობა, რაც გამოისახება ეფექტური მქვ - ით, რომელიც გვიჩვენებს, თუ გენერირებული სრული თბური სიმძლავრის რამდენი პროცენტი გამოიყენება უშუალოდ ჭრისათვის. იმისათვის, რომ განისაზღვროს ეს კოეფიციენტი, უნდა გაითვალოს ყველა თბური დანაკარგები, რომლებიც ტექნოლოგიურ პროცესს არ ხმარდება. პირველ რიგში განვიხილოთ კათოდის და საქშენის გახურებაზე გახარჯული თბური სიმძლავრეები და შესაძლებლობა მათი შემცირებისა. თუ კი ეს შესაძლებელია, მაშინ გაიზრდება, როგორც ეფექტურობა, ისე პლაზმატრონის მუშაობის რესურსიც. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, თბური დატვირთვები კათოდზე განპირობებულია ოთხი ფაქტორით, რომლებიც დამოკიდებულია დენის ძალაზე. სრული თბური სიმძლავრის გაზრდა დენის ძალის საშუალებით უარყოფით გავლენას მოახდენს კათოდის მუშაობის რესურსზე. ამიტომ, მიზანშეწონილია სრული თბური სიმძლავრის გაზრდა რკალის ძაბვის მატებით, რაც საშუალებას მოგვცემს ჭრისათვის აუცილებელი სიმძლავრის გენერირებას დაბალ დენებზე. პრაქტიკულად კი ეს შესაძლებელია პლაზმაწარმომქნელი აირის ხარჯისა და წნევის გაზრდით მაქსიმალურ დასაშვებ მნიშვნელობამდე, რომელზეც რკალის აღზნება და სტაბილური ნათება იქნება შესაძლებელი, საქშენის დიამეტრის შემცირებით ან წყალბადშემცველი გარემოს გამოყენებით. საქშენის დიამეტრის შემცირება შეზღუდულია გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობამდე, რადგან შემდეგ იწყება მისი ნგრევა. ამიტომ, პლაზმური ჭრის ყოველი კონკრეტული შემთვევისათვის უნდა შეირჩეს ისეთი პლაზმაწარმომქნელი აირის ხარჯი, წნევა და საქშენის არხის დიამეტრი, რომლებიც დენის ძალის შედარებით დაბალი მნიშვნელობისათვის უზრუნველყოფს პლაზმური რკალის აუცილებელ სიმძლავრესა და კათოდზე თბური დატვირთვების შემცირებას. ცხრ. 3.1-ში მოყვანილია, სრული თბური სიმძლავრისა და კათოდის გახურებაზე დახარჯული თბური სიმძლავრეების დამოკიდებულება დენის ძალის რამდენიმე კონკრეტული მნიშვნელობისათვის შეკუმშული ჰაერის სხვადასხვა ხარჯისა და

წნევისათვის.

ცხრილი 3.1

სრული თბური სიმძლავრე და კათოდზე თბური დატვირთვები
შეკუმშული ჰაერის გარემოში

I, ა	P, ატ	G, ლ/წმ	d, მმ	U, ვ	q, კჯ/წმ	q _კ , კჯ/წმ
150	4	1,5	4	178	26,70	0,81
		2,0	3	180	27,00	0,84
		2,5	2,5	228	34,20	1,02
	6	1,5	4	184	27,60	0,80
		2,0	3	192	28,80	0,88
		2,5	2,5	240	36,00	1,08
180	4	1,5	4	172	30,96	0,94
		2,0	3	178	32,04	1,00
		2,5	2,5	222	39,96	1,2
	6	1,5	4	180	32,40	0,96
		2,0	3	188	33,84	1,00
		2,5	2,5	240	43,20	1,29
200	4	1,5	4	168	33,60	1,04
		2,0	3	176	35,30	1,09
		2,5	2,5	220	44,00	1,32
	6	1,5	4	176	35,20	1,1
		2,0	3	188	37,60	1,14
		2,5	2,5	242	48,4	1,47

ცხრილში მოყვანილი მონაცემების მიხედვით, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თუ ჭრას განვახორციელებთ 150 ა დენზე, შეკუმშული ჰაერის წნევისათვის 6 ატ და ხარჯისათვის 2,5 ლ/წმ, ხოლო საქშენის დიამეტრი იქნება 2,5 მმ, მაშინ კათოდზე თბური დატვირთვები შემცირდება, ხოლო ტექნოლოგიური თვალსზრისით, მივიღებთ იმავე შედეგს, როგორც 3 მმ დიამეტრის საქშენის გამოყენებისას, როდესაც დენის ძალა არის 200 ა, შეკუმშული ჰაერის ხარჯი – 2,0 ლ/წმ, და წნევა – 4 ატ.

სხვადასხვა ქვეყნაში და მათ შორის საქართველოშიც ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ საუკეთესო შედეგი მიიღება წყალბადშემცველი აირების გამოყენებისას, მაგალითად, როგორცაა გადახურებული წყლის ორთქლი, ცხრ. 3.2-ში მოყვანილია საქართველოში და კერძოდ, სტუ-ში ჩატარებული კვლევის შედეგები.

ცხრილი 3.2.

თბური დატვირთვები კათოდზე წყლის ორთქლის გარემოში

I, ა	P, ატ	t°C	d, მმ	U, ვ	q, კვ/წმ	q _ა კვ/წმ
150	3	120	2,5	232	34,80	1,04
		300		260	39,00	1,15
	4	120		254	38,10	1,14
		300		285	42,75	1,26
	6	120		268	40,20	1,2
		300		298	44,70	1,32
180	3	120	2,5	230	41,44	1,23
		300		256	46,08	1,38
	4	120		250	45,00	1,35
		300		278	50,04	1,50
	6	120		262	47,16	1,41
		300		288	51,84	1,53
200	3	120	2,5	226	45,20	1,35
		300		252	50,40	1,56
	4	120		246	49,20	1,46
		300		270	54,00	1,64
	6	120		256	51,20	1,54
		300		282	56,40	1,70

ამგვარად, წყლის ორთქლის გამოყენებისას, თბური სიმძლავრის მნიშვნელობაზე ასევე გავლენას ახდენს მისი ტემპერატურა პლაზმატრონის შესასვლელზე. ამიტომ წყლის ორთქლის ხარჯის, წნევისა და ტემპერატურის კომპლექსური რეგულირების გზით შეგვიძლია მივიღოთ მოცემული მასალისა და სისქის პლაზმური ჭრისათვის აუცილებელი სიმძლავრე დენის ძალის შედარებით მცირე მნიშვნელობისათვის შეკუმშულ ჰაერთან შედარებით, რაც გარკვეულწილად შეამცირებს თბურ დატვირთვას კათოდზე.

ერთი მხრივ, ანალოგიური მსჯელობა შეიძლება ჩავატაროთ საქშენის შემთხვევაშიც. მეორე მხრივ კი, რკალის გარშემო წარმოიქმნება გარკვეული სისქის აირის შრე, რომელიც ქმნის საქშენის კედლების თბურ იზოლაციას რკალის სვეტიდან. ცხადია, რომ აირის ხარჯისა და წნევის მომატებით იზრდება რა სიჩქარის რადიალური მდგენელი, რომელიც მიმართულია რკალისაკენ, ძლიერდება რკალის თერმული შეკუმშვა და ინტენსიურად მიმდინარეობს მისი პერიფერიული უბნის დეიონიზაცია. ეს პროცესი ხელს უწყობს აირის შრის სისქის ზრდას, რომლის უკუპროპორციულია რკალიდან კედლებისაკენ მიმართული თბური ნაკადი. წყალბადშემცველი აირების გამოყენებისას კი ინტენსიურად მიმდინარეობს რკალის პერიფერიული უბნების გაცივება, რაც გამოწვეულია წყალბადის დისოციაციისას სითბოს დიდი რაოდენობის შთანთქმით. ეს პროცესი იწვევს რკალის განივი კვეთის დამატებით შემცირებას და აირის შრის კიდევ უფრო მეტად გასქელებას.

რკალის სვეტიდან კონვექციითა და გამოსხივებით გარემოში თბური დანაკარგები და ჭრის არიდან პლაზმური რკალის ალით დაკარგულ სითბო, ლიტერატურული მონაცემებით შეადგენს სრული თბური სიმძლავრის დაახლოებით 1,5-6 %-მდე და დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქნელ გარემოზე, პლაზმური რკალის ტემპერატურასა და სიმძლავრეზე.

როგორც უკვე ვიცით, პლაზმური რკალიდან გასაჭრელ ფურცელზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება ჭრის უბანზე ფურცლის გახურებას დნობის ტემპერატურამდე და გადნობას. ფურცელზე გადაცემული სითბოს ნაწილი, მასალის თბოგამტარებლობის გამო ვრცელდება ყველა მიმართულებით და გარკვეულ ტემპერატურამდე ახურებს მთელ ფურცელს. გახურებული ფურცლის ზედაპირიდან კი მიმდინარეობს კონვექციური თბოგაცემის პროცესი ნამზადსა და გარემოს შორის. ამიტომ, პლაზმური რკალის გამოყენების ეფექტურობა დამოკიდებულია გასაჭრელი მასალის თბოფიზიკურ თვისებებზე, რომელიც შემდეგში იქნება განხილული. ფურცელზე გადაცემულ თბურ სიმძლავრეს ეწოდება ეფექტური თბური სიმძლავრე. სრულ თბურ სიმძლავრეზე მოყვანილი მსჯელობის ანალოგიურად, ამ შემთხვევაშიც შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ეფექტური თბური სიმძლავრე დამოკიდებულია დენის ძალაზე, პლაზმაწარმომქნელი აირის გვარობაზე, ხარჯსა და წნევაზე, საქშენის არხის დიამეტრზე.

მნიშვნელოვან სიდიდეს წარმოადგენს ეფექტური მქკ (11%), რომელიც გვირ-
ვენებს, თუ რკალის სრული თბური სიმძლავრის რა ნაწილი გადაეცემა გასაჭრელ
ფურცელს. მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია თბური დანაკარგების რაოდენობაზე.
ცხადია, რაც უფრო მეტად შევამცირებთ ამ დანაკარგებს, მით მეტი სითბო გადაეცემა
გასაჭრელ ფურცელს. განვიხილოთ მქკ-ის დამოკიდებულება დენის ძალაზე. დენის
აირის ხარჯის და წნევის მოცემული მნიშვნელობისათვის დენის ძალის ზრდასთან
ერთად მქკ მცირდება. ეს აიხსნება იმით, რომ იზრდება კათოდსა და საქმენზე თბური
დატვირთვები. ასევე მატულობს თბური დანაკარგები გარემოში. ეფექტური მქკ-ის
გასაზრდელად მიზნშეწონილია გავზარდოთ პლაზმაწარმომქნელი აირის ხარჯი და
წნევა, რადგან ამ დროს რკალზე ძაბვის მატება მიმდინარეობს რკალის დახურულ
უბანზე – საქმენის არხში მისი შეკუმშვის ხარჯზე. ეს იძლევა საშუალებას სასურველი
სიმძლავრე მივიღოთ დენის ძალის შემცირებული მნიშვნელობისათვის, რაც თავის
მხრივ ამცირებს თბურ დანაკარგებს და შესაბამისად იზრდება ეფექტური მქკ.

4. პლაზმური ჭრის პროცესის ტექნოლოგიური რეჟიმის ძირითადი

პარამეტრები და მათი კავშირი რკალის ენერგეტიკულ პარამეტრებთან

ჭრის სიჩქარე. ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება გასაჭრელი ლითონის სისქეზე, დენის ძალაზე, პლაზმაწარმომქნელი აირის შერჩევასა და მის ხარჯზე. სიჩქარის გავლენა რკალის ძაბვაზე. პლაზმატრონსა და გასაჭრელი ლითონის ზედაპირს შორის მანძილის გავლენა რკალის ძაბვაზე, თბურ დანაკარგებზე, თბურ ეფექტურ მქკ-ზე და ორმაგი რკალის წარმოქმნაზე

ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესის წარმოებაში გამოყენების ეფექტურობა დამოკიდებულია სამ ფაქტორზე: ხარისხი, მწარმოებლურობა და ეკონომიურობა. ხარისხში იგულისხმება ნამზადის იმ თვისებათა ერთობლიობა, რომლებიც უზრუნველყოფს მის გამოყენებას დანიშნულების მიხედვით, როგორც ექსპლუატაციისას, ისე სხვა ტექნოლოგიური პროცესების შესრულებისას. ხარისხი ხასიათდება რიგი რაოდენობრივი მახასიათებლების მნიშვნელობებით და მცირდება მათი გადახრის ზრდით წინასწარ დადგენილი ნომინალური მნიშვნელობებიდან. ფაქტობრივი მნიშვნელობების მის ნომინალურ მნიშვნელობებთან მიახლოების ხარისხი განსაზღვრავს ნამზადის დამზადების სიზუსტეს. სიზუსტე ფასდება აბსოლუტური ან ფარდობითი ცდომილებით ხარისხის მაჩვენებლების ნომინალური მნიშვნელობებიდან. პლაზმური ჭრისას მიღებული ნამზადის ხარისხის მაჩვენებლებზე შემდგომ ლექციებზე იქნება საუბარი.

პლაზმური ჭრის მწარმოებლურობას განსაზღვრავს ჭრის სიჩქარე, რომელიც დამოკიდებულია გასაჭრელი მასალის გვარობასა და სისქეზე, პლაზმაწარმომქნელ გარემოსა და ჭრის რეჟიმის პარამეტრებზე.

პლაზმაწარმომქნელი გარემოს გავლენა პლაზმური რკალის ელექტრულ და ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე განხილული იყო წინა ლექციებზე. უნდა აღვნიშნოთ, რომ პლაზმაწარმომქნელი გარემოს შერჩევა განპირობებული უნდა იყოს, ერთი მხრივ, გასაჭრელი მასალის თვისებებითა და სისქით, რათა უზრუნველყოთ მაღალი მწარმოებლურობა, ხოლო, მეორე მხრივ კი, გასათვალისწინებელია მისი გავლენა ნამზადის ხარისხის მაჩვენებლებზე.

პლაზმური ჭრის სიჩქარის რაოდენობრივი ანგარიშისათვის შემოთავაზებულია განტოლება, რომელშიც გათვალისწინებულია ენერგეტიკული ბალანსის შემადგენელი

კომპონენტები და ის დაშვება, რომ დნობის ტემპერატურაზე მყოფი თხევადი ლითონი გასაჭრელი ფურცლის ნაწიბურებიდან განიდევენება პლამური ნაკადით:

$$v = \frac{\eta_{\text{ფფ}} UI - q_T}{\rho \delta \sigma \Delta Q} \quad (4.1)$$

აქ, v – პლამური ჭრის სიჩქარეა; $\eta_{\text{ფფ}}$ – ეფექტური მქვ; U – რკალის ძაბვაა; I – დენის ძალაა; q_T – ლითონში თბოგადაცემის ინტენსივობაა; ρ – ლითონის სიმკვრივეა; δ – ლითონის სისქეა; σ – ჭრის სიგანეა; ΔQ – ლითონის თბოშემცველობის ნაზრდი.

(4. 1) გამოსახულების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ პლამური ჭრის ზოგიერთი ტექნოლოგიური კანონზომიერება:

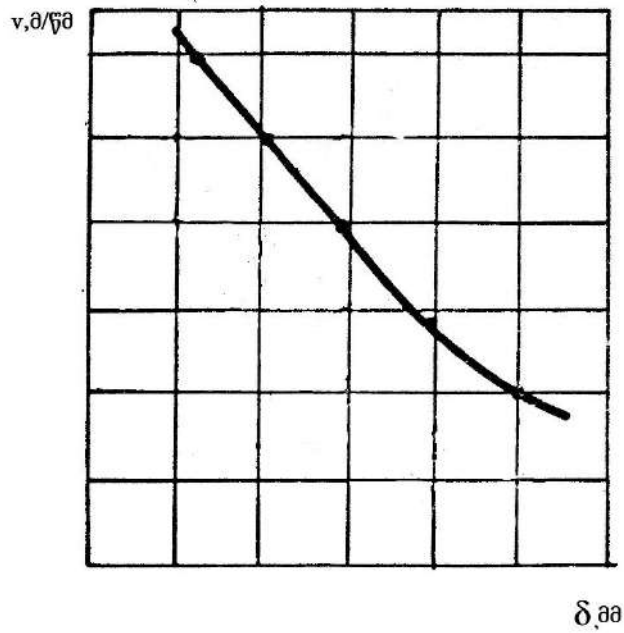
1. ჭრის სიჩქარე დამოკიდებულია პლამური რკალის სიმძლავრეზე. სწორედ ამაშია ძირეული განსხვავება და უპირატესობა ჟანგბადურ ჭრასთან შედარებით. ამ უკანასკნელში, სიჩქარე, პირველ რიგში, დაკავშირებულია ქიმიური გარდაქმნების კინეტიკასთან. მაგრამ, ამავე დროს პლამური ჭრის სიჩქარე სწრაფად ეცემა ლითონის სისქის ზრდასთან ერთად, ვიდრე ჟანგბადური ჭრისას;
2. პლამური ჭრის სიჩქარე პირდაპირპროპორციულია რკალის სიმძლავრისა და უკუპროპორციულია მასალის სისქის;
3. პლამური რკალის ეფექტური თბური სიმძლავრე უნდა იყოს არანაკლებ გარკვეული კრიტიკული სიმძლავრისა, რომლის დროსაც შესაძლებელია გარკვეული სისქის ლითონის სრული ჩადნობა (გათვალისწინებულია თბური დანაკარგები ლითონის თბოგამტარებლობაზე);
4. პლამური რკალის ძაბვისა და დენის გავლენა სიჩქარეზე არაერთგვაროვანია. დადგენილია, რომ ძაბვის მატების გავლენა სიჩქარეზე უფრო ეფექტურია, ვიდრე დენის ძალის, რადგან ძაბვის სიდიდე განსაზღვრავს რკალის ჩამირვის სიღრმეს გასაჭრელ ფურცელში. სისქის ზრდასთან ერთად, ძაბვის მატება საშუალებას იძლევა ჭრა ვაწარმოოთ ე.წ. ხისტი რკალით (აირის დიდი ხარჯით და საქშენის არხის მცირე დიამეტრით), რაც უზრუნველყოფს ჭრის დიდ სიჩქარესა და ხარისხს.

იმისათვის, რომ გავერკვეთ გასაჭრელი ფურცლის სისქის სიჩქარესა და რკალის ძაბვაზე გავლენის ხასიათში, პირველ რიგში, განვსაზღვროთ, როგორ მიეწოდება სითბო დნობის ფრონტის სხვადასხვა უბნებზე. დავუშვათ, რომ δ - სისქის ლითონის პლამური ჭრისას ანოდური ლაქა ლითონში ჩამირულია h , სიღრმეზე. ამ შემთხვევაში

დნობის ფრონტი შეიძლება დავყოთ სამ უბნად. პირველი განლაგებულია გასაჭრელი ფურცლის ზედა სიბრტყესა და ანოდურ უბანს შორის, მეორე შეზღუდულია ანოდური უბნის ზომებით და მესამე, რომელიც განლაგებულია ანოდურ უბანსა და გასაჭრელი ფურცლის ქვედა სიბრტყეს შორის. პირველ უბანზე თბური ნაკადის მიწოდება ლითონში ხდება რკალის სვეტიდან. მეორე უბანზე, დამატებით გამოიყოფა სითბო ანოდური ლაქიდან, რომელიც დამოკიდებულია ანოდური ძაბვის ვარდნაზე. მესამე უბანზე ლითონში სითბო მიეწოდება, როგორც პირველ ორ უბანზე გამდნარი ლითონის გადახურების ხარჯზე, ასევე რკალში გახურებული აირის ნაკადიდან. პირველ ორ უბანზე თბური ბალანსის პასიური ნაწილი განისაზღვრება გასაჭრელ ფურცელში სითბოს გავრცელებით, ხოლო აქტიური ნაწილი ჭრის არეში ჩაძირული რკალიდან გამოყოფილი და ანოდურ ლაქაში გამოყოფილი სითბოდან. ამიტომ, ამ უბნებზე აირის ტემპერატურა მკვეთრად არ მცირდება. მესამე უბანზე კი, გახურების წყაროების არ არსებობის გამო, ტემპერატურა სწრაფად მცირდება და გარკვეულ მნიშვნელობაზე მკვეთრად ეცემა ლითონში აირიდან მიწოდებული თბური ნაკადის მნიშვნელობა, რასაც მოჰყვება ლითონის გაცივება. ლითონის შემდგომი გამოდნობა ხდება გადახურებულ გამდნარ ლითონში დაგროვებული სითბოს ხარჯზე.

დნობის ფრონტის პირველ უბანზე რკალის ჩაძირვის სიღრმე განსაზღვრავს რკალის ძაბვას. ცხადია, რომ სიჩქარის მომატებისას რკალის ჩაძირვის სიღრმე დაიწყებს კლებას, შესაბამისად ძაბვაც და განსაზღვრულ მაქსიმალურზე მეტ სიჩქარეზე შემცირდება რკალის გამჭოლუნარიანობა და ვერ მოესწრება ლითონის გამოდნობა. საქშენის არხის მოცემული დიამეტრისათვის, დენის ძალის, პლაზმაწარმომქნელი აირის ხარჯისა და წნევის ფიქსირებული მნიშვნელობებისათვის გასაჭრელი ფურცლის სისქის გაზრდისას, იმისათვის რომ რკალი მაქსიმალურად ჩაძიროს ლითონში და წარმატებით დაიწყოს გამოდნობის პროცესი, სიჩქარე უნდა შემცირდეს (სურ. 4.1). გარკვეულ სისქეზე ჭრის პროცესი შეუძლებელი იქნება.

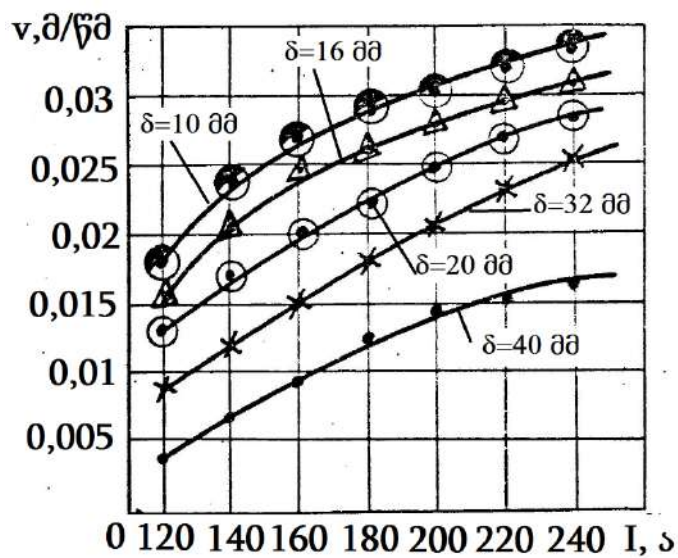
მოცემული მასალისა და სისქის ფურცლის ჭრის სიჩქარე დამოკიდებულია დენის ძალის სიდიდეზე, რადგან ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს რკალის სიმძლავრეს. მცირე დენების შემთხვევაში, იმისათვის რომ განხორციელდეს ლითონის სრული ჩადნობა, პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეს უნდა ჰქონდეს მინიმალური მნიშვნელობა, რომელიც არასასურველია პროცესის მწარმოებლურობის თვალსაზრისით.



სურ.4.1

პლაზმური ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება გასაჭრელი ფურცლის სისქეზე.

დენის ძალის შემდგომი ზრდისას, თუ სიჩქარე დარჩება უცვლელი, ეს გამოიწვევს ჭრის სიგანის ზრდას, ამიტომ აუცილებელია სიჩქარის მომატება. მართალია, დენის ძალის მატებით სიჩქარეც მატულობს, მაგრამ გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობამდე, რომლის ზემოთაც ლითონის გამჭოლი ჩადნობა ვერ ესწრება და ხდება ე.წ. რკალის ამობრუნება. სიჩქარის დენის ძალაზე დამოკიდებულება მოცემულია სურ.4.2

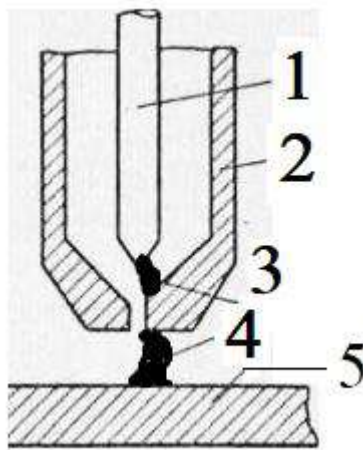


სურ.4.2

პლაზმური ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება დენის ძალაზე.

როგორც ვნახეთ, რომ პლაზმაწარმომქნელი გარემოს ხარჯი და წნევა მნიშვნელოვან გავ-

ლენას ახდენენ პლაზმური რკალის ელექტრულ და ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე, რაც დაკავშირებულია რკალის შეკუმშვის ეფექტსა და ძაბვის მატებასთან. ამიტომ ორივე პარამეტრი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ჭრის სიჩქარეზეც, რაც გამოიხატება მისი მატებით. სიჩქარეზე გავლენას ასევე ახდენს მანძილი პლაზმატრონსა და ნამზადს შორის, რომელიც პლაზმური ჭრის პროცესის დაწყების წინ დგება. მისი შერჩევასა გათვალისწინებული უნდა იყოს დასაშვები მინიმალური და მაქსიმალური სიგრძის ზომა. მინიმალურზე ნაკლებ მნიშვნელობაზე იქმნება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება. თბური რეჟიმების შესწავლამ აჩვენა, რომ საქშენის ნგრევა იწყება ისეთი თბური დატვირთვების დროს, რომლის დროსაც საშუალო თბური ნაკადი საქშენის შიდა კედლებზე ბევრად მცირეა დასაშვებ მნიშვნელობაზე. ამიტომ, მისი ნგრევის მიზეზი შეიძლება იყოს თბური ნაკადის არათანაბარი განაწილება და ზოგიერთ უბნებში დასაშვებ მნიშვნელობებზე გადაჭარბება. არათანაბარი განაწილების მიზეზი არის სწორედ ორმაგი რკალის წარმოქმნა. გარკვეულ პირობებში, მჭრელი რკალის ნაცვლად, რომელიც ანთია კათოდსა და გასაჭრელ ფურცელს შორის, ანთია ორი რკალი: კათოდსა და საქშენს შორის და საქშენსა და ფურცელს შორის (სურ. 4. 3).



სურ.4.3

ორმაგი რკალის სქემა

1. კათოდი; 2. საქშენი; 3.რკალი კათოდსა და საქშენს შორის; 4. რკალი საქშენსა და ფურცელს შორის; 5. გასაჭრელი ფურცელი

ამის შედეგად საქშენზე წარმოიქმნება პირველი რკალის ანოდური და მეორე რკალის კათოდური ლაქები, სადაც თბური ნაკადები აღემატება დასაშვებ მნიშვნელობებს და საქშენი იწყებს ნგრევას. ანოდური უბანი პრაქტიკულად ყოველთვის განლაგებულია

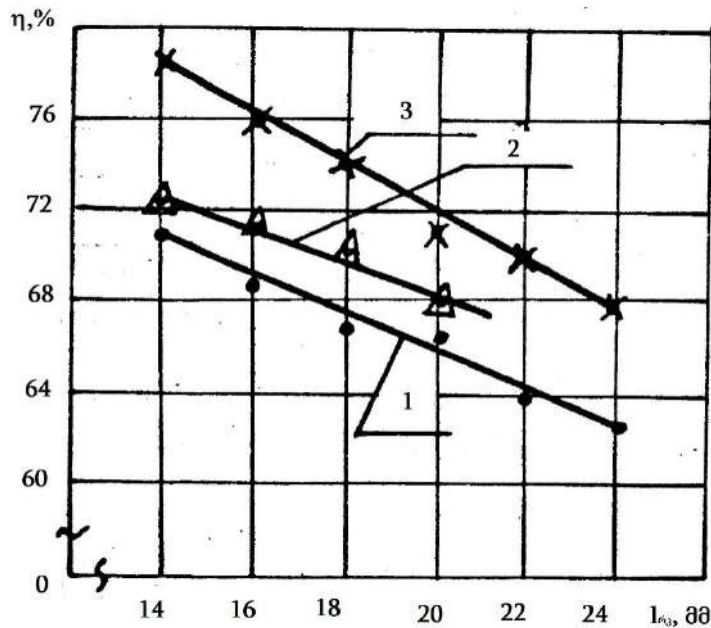
საქმენის არხის ზედა ზედაპირზე, ხოლო კათოდური გადახრილია საქმენის არხის ნახვრეტიდან რკალთან ერთად. თუ ის მიბმულია ერთ ადგილზე, მაშინ საქმენი ინგრევა სრულად. თუ კათოდური ლაქა მოძრაობს, მაშინ დნება არხის ზედა ნაწილი, ხოლო იმ ადგილზე სადც კათოდია მიბმული წარმოიქმნება გამდნარი უბანი. ორმაგი რკალის წარმოქმნა უკავშირდება შტეენბეკის მინიმუმის პრინციპს, რომლის თანახმად რკალი იკავებს იმ მდგომარეობას, რომელშიც მინიმალურია რკალის ძაბვა. ამიტომ, იმისათვის, რომ რკალი შუნტირებული იყოს საქმენის კედლებით, უნდა დაკმაყოფილდეს შემდეგი უტოლობა:

$$U_a + U_k < Eh, \quad (4.2)$$

სადაც, U_a – იმ რკალის ანოდური ძაბვაა, რომელიც ანთია კათოდსა და საქმენს შორის; U_k – იმ რკალის კათოდური ძაბვაა, რომელიც ანთია საქმენსა და ფურცელს შორის; E – საქმენის არხში მდებარე რკალის ელექტრული ველის დამაბულობაა; h – საქმენის არხის სიმაღლეა. (4.2) უტოლობის ანალიზის საფუძველზე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ პლაზმაწარმოქმნელი აირის ხარჯის გაზრდით ორმაგი რკალის წარმოქმნის ალბათობა მცირდება, რადგან იზრდება საქმენის არხში ელექტრული ველის დამაბულობა. დადგენილია, რომ ორმაგი რკალის წარმოქმნა იწყება დენის ძალის მაღალი მნიშვნელობებისას, რაც უკავშირდება დენის შუნტირებას საქმენის კედელზე. აირის ხარჯის ისეთი მნიშვნელობებისას, რომლებიც აღემატება გარკვეულ მინიმალურ მნიშვნელობას, მაშინ შუნტირებული რკალის დენი უტოლდება ნულს (საქმენი ელექტრულად იზოლირებულია რკალიდან აირის შრით) და ორმაგი რკალის წარმოქმნის ალბათობა 0-ია. თუ ხარჯი ნაკლებია ამ მინიმალურ მნიშვნელობაზე, რკალი შუნტირდება საქმენზე (საქმენი ელექტრულად არ არის იზოლირებული რკალიდან აირის შრით), იზრდება შუნტირებული დენი და მაქსიმუმამდე იზრდება ორმაგი რკალის წარმოქმნის ალბათობა. ამრიგად, რკალის შუნტირება საქმენის კედელზე დამოკიდებულია რკალის გარშემო არსებული აირის შრის სისქეზე, ტემპერატურასა და შემადგენლობაზე. თუ აირის შრე საკმაოდ სქელია, ხოლო ტემპერატურა მცირე, მაშინ გამოირიცხება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება.

პლაზმატრონსა და ფურცელს შორის მანძილის გაზრდა არ არის რეკომენდირებული, ვინაიდან დასაშვებ მაქსიმალურ სიდიდეზე მეტ მნიშვნელობაზე არ მოხერხდება მჭრელი (ძირითადი) რკალის ანთება ან მოხდება მისი წყვეტა. მეორე მხრივ,

ვინაიდან იზრდება რკალის ღია უბნის სიგრძე, მოიმატებს რკალიდან გარემო ატმოსფეროში თბური დანაკარგები, რაც გამოიწვევს ეფექტური თბური სიმძლავრისა და შესაბამისად ეფექტური მქკ-ის შემცირებას (სურ. 4.4).



სურ. 4.4

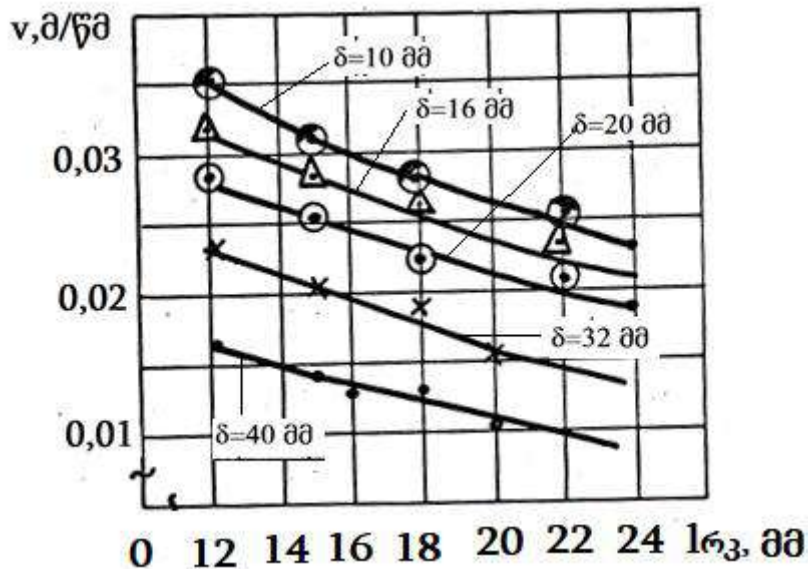
ეფექტური მქკ - ის დამოკიდებულება პლაზმატრონსა და გასაჭრელ ფურცელს შორის მანძილზე.

$$I = 200\text{ა}$$

1. პლაზმაწარმომქმნელი გარემო წყლის ორთქლი- $d_f=4$ მმ;
2. პლაზმაწარმომქმნელი გარემო შეკუმშული ჰაერი- $d_f=2,5$ მმ;
3. პლაზმაწარმომქმნელი გარემო წყლის ორთქლი- $d_f=2,5$ მმ.

შესაბამისად მოიკლებს ჭრის სიჩქარეც (სურ.4.5). ამიტომ, უნდა შეირჩეს ისეთი ოპტიმალური მანძილი, რომელზეც გამოირიცხება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება, უზრუნველყოფილი იქნება რკალის სტაბილური ნათება და მაქსიმალურად დასაშვები სიჩქარე. ზემოთ მოყვანილ დამოკიდებულებებში საუბარი იყო მხოლოდ ერთი პარამეტრის ცვლილებაზე, დანარჩენი კი იყო ფიქსირებული. იმისათვის, რომ მივიღოთ ოპტიმალურად დასაშვები მაქსიმალური სიჩქარე, ამისათვის მხედველობაში უნდა მივიღოთ დანარჩენი პარამეტრების ურთიერთგავლენაც.

დენის ძალა და ძაბვაც დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯზე, წნევაზე და საქშენის არხის დიამეტრზე. ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ ჭრის სიჩქარე პირდაპირპროპორციულია დენის ძალის შეფარდებისა საქშენის დიამეტრთან:



სურ.4.5

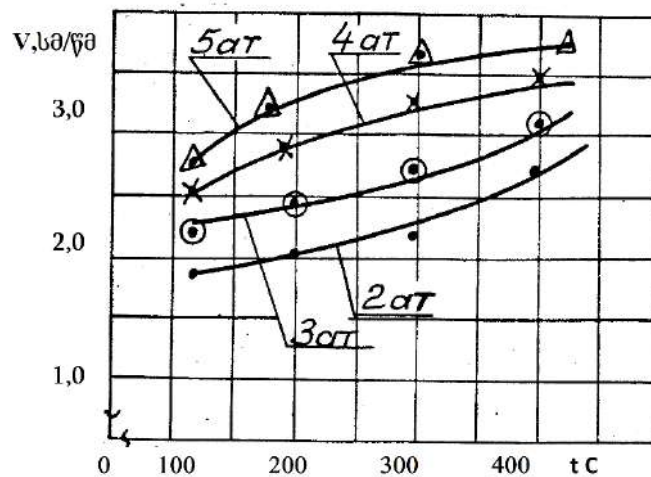
პლაზმური ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება პლაზმატრონისა და ნაშაბადს შორის მანძილზე.

$$v = \frac{kI}{d}. \quad (4.3)$$

ეს დამოკიდებულება მით უფრო ზუსტია, რაც მეტია რკალის სრული თბური სიმძლავრის შეფარდება გასაჭრელი ფურცლის სისქესთან. k – პროპორციულობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მასალის გვარობაზე და სისქეზე. ამავე დროს აღმოჩნდა, რომ I/d ზრდასთან ერთად მცირდება პლაზმატრონის მუშაობის რესურსი, ხოლო გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობაზე მუშაობა შეუძლებელი ხდება. ექსპერიმენტით მიღებული შედეგების დამუშავებისას დადგინდა, რომ თუ პლაზმატრონში აირი არ მიეწოდება გამგრიგალებელის საშუალებით, მაშინ ეს შეფარდება არ შეიძლება, რომ აღემატებოდეს 1400 (დიამეტრი იზომება სმ-ით.). ხოლო პლაზმატრონებში აირის გამგრიგალებელით შესაძლებელია ამ სიდიდის გაზრდა. I/d ასევე დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქმნელ გარემოზე. კერძოდ კი, წყალბადშემცველ აირებში 1,5-ჯერ მეტია, ვიდრე ჟანგბადშემცველ აირებში, რადგან უკეთესია რკალიდან საქმენის კედლების თბური იზოლაცია.

როგორც ვიცით, პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯი და წნევა გავლენას ახდენს პლაზმური რკალის დიამეტრსა და ძაბვაზე, ხოლო ეს უკანასკნელები კი ჭრის სიჩქარეზე. ამიტომ ხარჯისა და წნევის საშუალებით შესაძლებელია მაქსიმალურად დასაშვები სიჩქარის მიღება. ამგვარად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მოცემული მასალისა და სისქის მასალის მაქსიმალური სიჩქარის მისაღებად, აუცილებელია ყველა პარამეტრის

ოპტიმალური მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, რომლის დროსაც მისაღები იქნება პლაზმატრონის მუშაობის რესურსიც. რა თქმა უნდა, ასევე დიდი ყურადღება ექცევა აირის გვარობას. რადგან, გადახურებული წყლის ორთქლის ტემპერატურა პლაზმატრონის შესასვლელზე გავლენას ახდენს ძაბვაზე, ამიტომ ტემპერატურის საშუალებითაც შესაძლებელია სიჩქარის რეგულირება. სურ. 4.6-ზე მოყვანილია 20 მმ სისქის ფოლადის 200 ა დენზე ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება ორთქლის სხვადასხვა ტემპერატურებისათვის.



სურ.4.6

პლაზმური ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება

წყლის ორთქლის ტემპერატურაზე

$\delta = 20$ მმ, $I = 200$ ა, $d = 2, 5$ მმ.

შედარებისათვის ცხრ. 4.1-ში მოყვანილია საორიენტაციო რეჟიმის პარამეტრები, როგორც შკუმშული ჰაერის გარემოში, ისე წყლის ორთქლის შემთხვევაში. შეკუმშული ჰაერისას აღებულია პრაქტიკაში გამოყენებული ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრები. ორივე შემთხვევაში, შედარების თვალსაზრისით, საქშენის დიამეტრი და აირის ხარჯი იყო ერთი და იმავე, ხოლო წნევა წყლის ორთქლის შემთხვევაში არ აღემატებოდა 4 ატ. როგორც ცხრილიდან ვხედავთ, წყლის ორთქლის შემთხვევაში ჭრისათვის აუცილებელი სიმძლავრე გენერირდება დენის მცირე მნიშვნელობებისათვის, რაც გარდა პლაზმატრონის მუშაობის ხანგრძლივობის გაზრდისა, ასევე დადებითად მოქმედებს მოხმარებული ელექტროენერჯის ეკონომიურობაზე. მანძილი პლაზმატრონსა და საქშენს შორის მეტია ჰაერთან შედარებით, რასაც მინიმუმამდე დაჰყავს

ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება, ხოლო ჭრის სიჩქარე პრაქტიკულად არ განსხვავდება ერთმანეთისაგან.

ცხრილი 4.1

დაბალნახშირბადიანი ფოლადის პლაზმური ჭრის საორიენტაციო რეჟიმის პარამეტრები.

პლაზმაწარმოქმნელი გარემო	δ , მმ	I, ა	U, ვ	d, მმ	G, ლ/წმ	P, ატ	t°C	L, მმ	v, სმ/წმ
შეკუმშული ჰაერი	10	200	196	2,5	1,5	4	-	13	3,6
	16	200	210	2,5	2,0	4	-	12	3,2
	20	200	214	2,5	2,0	4	-	12	2,8
	32	200	220	2,5	2,6	4	-	10	1,6
წყლის ორთქლი	10	120	250	2,5	1,5	2,0	400	16	3,2
	16	160	260	2,5	2,0	3,0	300	16	3,0
	20	160	280	2,5	2,0	3,0	350	14	2,75
	32	200	300	2,5	2,6	4,0	250	12	2,5

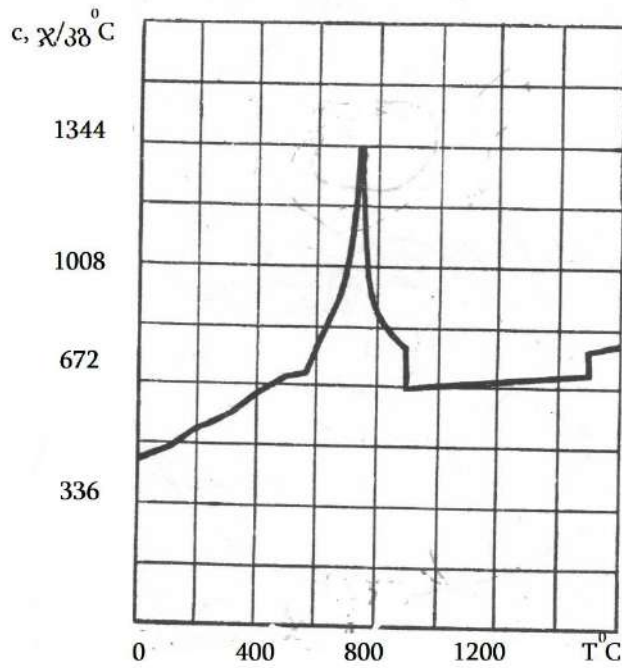
5. გასაჭრელი ლითონის თბოფიზიკური მახასიათებლების გავლენა ჭრის რეჟიმის პარამეტრებზე

შავი და ფერადი ლითონების დნობის ტემპერატურის, დნობის კუთრი სითბოს, დნობის ფარული სითბოს, თბოგამტარებლობისა და კუთრი სითბოტევადობის შედარებითი მიმოხილვა. ჭრის სირთულის თვალსაზრისით ლითონების დაყოფა სამ ჯგუფად. რკალის ძაბვისა და ეფექტური თბური სიმძლავრის დამოკიდებულება ლითონის თბოფიზიკურ თვისებებზე

მასალების პლანმური ჭრის ტექნოლოგია, პლანმური რკალის ენერგეტიკული მაჩვენებლების შერჩევა დამოკიდებულია გასაჭრელი ფურცლის მასალის გვარობაზე, რომელიც განსაზღვრავს მის თბოფიზიკურ მახასიათებლებს. წარმოებაში ძირითადად გამოიყენება შენადნობების სამი ჯგუფი: რკინის, სპილენძისა და ალუმინის. იმისათვის, რომ შევისწავლოთ მათი გავლენა ჭრის რეჟიმის პარამეტრებზე პირველ რიგში გავიხსენოთ ძირითადი თბოფიზიკური სიდიდეები, რომელთა ცოდნაც აუცილებელია პლანმური ჭრის თბური პროცესების შესწავლისათვის.

მასური კუთრი სითბოტევადობა ეწოდება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც აუცილებელია ერთეულოვანი მასის სხეულის გასახურებლად 1°C -ით. მისი ერთეულია $1 \text{ ჯ/კგ }^{\circ}\text{C}$.

მოცულობითი კუთრი სითბოტევადობა ეწოდება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც აუცილებელია ერთეულოვანი მოცულობის სხეულის გასახურებლად 1°C -ით. მისი ერთეულია $1 \text{ ჯ/მ}^3\text{C}$. კუთრი სითბოტევადობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ამიტომ, მოცემულ ტემპერატურათა შუალედში, თბური პროცესების გამოთვლების გასამარტივებლად გამოიყენება მათი საშუალო მნიშვნელობა. სურ. 5.1-ზე მოცემულია რკინის მასური კუთრი სითბოტევადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. როგორც მოყვანილი დამოკიდებულებიდან ჩანს, 1600°C -მდე მასური კუთრი სითბოტევადობა იზრდება საკმაოდ სწრაფად და აღწევს პიკს 768°C -ზე, რომელსაც ეწოდება კიურის წერტილი და წარმოადგენს მაგნიტური გარდაქმნის კრიტიკულ წერტილს. დნობის ტემპერატურაზე სხეულზე გადაცემული სითბო იხარჯება ლითონის დნობაზე, რომლის დროსაც მისი ტემპერატურა არ მატულობს. ანალოგიური სიტუაციაა იმ კრიტიკულ ტემპერატურებზეც, რომელზეც მიმდინარეობს რკინის გადასვლა ერთი მოდიფიკაციიდან მეორეში ($\alpha - \text{Fe} \rightarrow \gamma - \text{Fe}$; $\gamma - \text{Fe} \rightarrow \delta - \text{Fe}$).

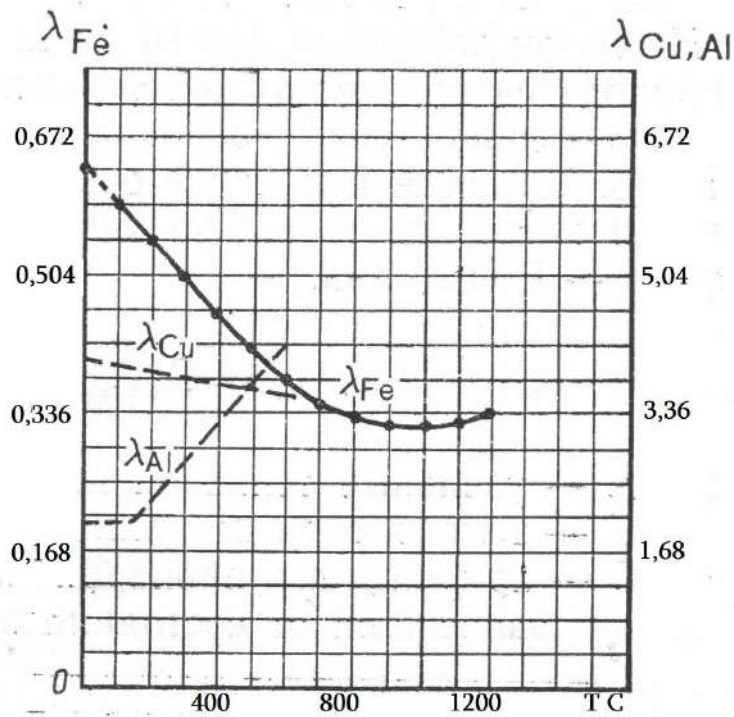


სურ. 5.1

**რკინის მასური კუთრი სითბოტევადობის
დამოკიდებულება ტემპერატურაზე**

როგორც ადრე აღვნიშნეთ, ფურცელზე გადაცემული სითბოს ნაწილი, თბოგამტარებლობის გამო გაედინება ყველა მიმართულებით და იწვევს ფურცლის გახურებას. ამიტომ ეფექტური თბური სიმძლავრის ნაწილი იხარჯება ლითონის გამოდნობაზე. აქედან გამომდინარე, დიდი მნიშვნელობა აქვს ლითონის თბოგამტარებლობას ჭრის პროცესისათვის. მასალების თბოგამტარებლობა ხასიათდება თბოგამტარებლობის კოეფიციენტით, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რა რაოდენობის სითბო გაედინება იზოთერმული ზედაპირის ერთეულ ფართობში 1 წმ-ის განმავლობაში, როდესაც ტემპერატურის ცვლილება ამ ზედაპირისადმი ნორმალის მიმართულებით შეადგენს 1°C 1 სმ სიგრძეზე. მისი მნიშვნელობაც ასევე დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ლითონის ქიმიურ შემადგენლობასა და სტრუქტურაზე. სურ. 5.2-ზე მოყვანილია რკინის, სპილენძისა და ალუმინის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ტემპერატურის მატებასთან ერთად, რკინისა და სპილენძის თბოგამტარებლობა იზრდება, ალუმინისა კი, მცირდება.

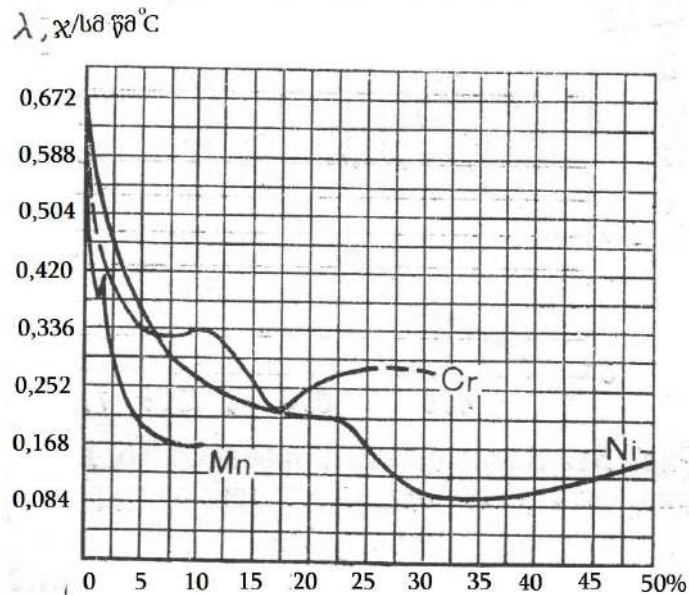
როგორც ვიცით, ფოლადი წარმოადგენს რკინა-ნახშირბადის შენადნობს, რომელშიც შედის სხვადასხვა მალეგირებელი ელემენტები, რომელთა უმრავლესობა ამცირებს ფოლადის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტს. სურ. 5.3-ზე მოცემულია ფოლადის თბო-



სურ.5.2

რკინის, სპილენძისა და ალუმინის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

გამტარებლობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მასში მალეგირებული ელემენტების პროცენტული შემცველობის მიხედვით.



სურ. 5.3

ფოლადის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მასში მალეგირებული ელემენტების პროცენტული შემცველობაზე

ლითონის გადაყვანა მყარი მდგომარეობიდან თხევად მდგომარეობაში მიმდინარეობს გარკვეულ ტემპერატურაზე, რომელსაც დნობის ტემპერატურა ეწოდება და ყველა სახის ლითონისათვის მას აქვს გარკვეული მნიშვნელობა. ამიტომ, ლითონი ჯერ უნდა გახურდეს დნობის ტემპერატურამდე და შემდეგ სითბოს მიწოდებით ის დაიწყებს დნობას, რომლის დროსაც ტემპერატურა არ იცვლება. სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც დნობის ტემპერატურაზე უნდა მივაწოდოთ ერთეულოვანი მასის მყარ სხეულს, რომ ის სრულად გადავიდეს თხევად მდგომარეობაში დნობის კუთრი სითბო ეწოდება. ტექნოლოგიურ პროცესებში, ასევე გამოიყენება ტერმინი დნობის ფარული სითბო. დნობის ტემპერატურის მიხედვით ლითონები იყოფა სამ ჯგუფად: ადვილადმდნობი ლითონები, რომელთა დნობის ტემპერატურა არ აღემატება 600°C . (ტყვია, კალა, ცინკი და სხვ.); საშუალოდმდნობი ლითონები, რომელთა დნობის ტემპერატურა მოთავსებულია 600°C -დან 1600°C -მდე. (სპილენძი, ალუმინი, რკინა და სხვა); ძნელადმდნობი ლითონები, რომელთა დნობის ტემპერატურა აღემატება 1600°C -ს (ვოლფრამი, ტიტანი, მოლიბდენი, ქრომი). შენადნობების დნობის ტემპერატურების კონკრეტული მნიშვნელობების დადგენა შეუძლებელია, რადგან ის დამოკიდებულია შენადნობში არსებული ელემენტების პროცენტულ შემცველობაზე. ამიტომ მოცემულია ტემპერატურის გარკვეული ინტერვალი ან გასაშუალებელი მნიშვნელობა.

მასალის თბოშემცველობა (ენტალპია), გვიჩვენებს, თუ სითბოს რა რაოდენობა უნდა გადაეცეს ერთეულოვანი მასის სხეულს მისი გახურებისათვის t_1 -დან t_2 ტემპერატურამდე. ენტალპიაც დამოკიდებულია მასალის გვარობასა და ტემპერატურაზე. რაც მეტია ტემპერატურა, მით მეტია ენტალპიაც.

ცხრ. 5.1-ში მოყვანილია ზოგიერთი ლითონების თბოფიზიკური მახასიათებლები. ცხრილში მოყვანილი მონაცემების მიხედვით შესაძლებელია ვიმსჯელოთ მასალების პლაზმური ჭრის შესრულების სირთულეზე. ერთანეთს შევადაროთ რკინის, სპილენძისა და ალუმინის მახასიათებლები. ყველაზე მაღალი თბოგამტარებლობის კოეფიციენტი აქვს სპილენძს (დაახლოებით 5,4-ჯერ მეტია რკინის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტზე), რაც იმას ნიშნავს, რომ რკალიდან მიღებული სითბოს დიდი რაოდენობა გაედინება ფურცლის ყველა მიმართულებით და საკმაოდ მცირდება ჭრის არეში ლითონის ლოკალურ გახურებასა და გამოდნობაზე საჭირო სითბოს რაოდენობა. ხოლო სპილენძისა და რკინის დანარჩენი პარამეტრები დიდად არ განსხვავდება ერთ-

ცხრილი 5.1

ლითონების თბოფიზიკური მახასიათებლები

სიდიდეები	Al	Fe	Cu	Ni	Ti	W	Mg	Mo
$c, \text{ჯ/კგ } ^\circ\text{C.}$	916	458	416	458	575	133	1040	292
$\lambda, \text{ჯ/მ} \cdot \text{წ}^\circ\text{C.}$	224	71	383	58	15	166	154	144
$\rho, \text{კგ/მ}^3$	2700	7870	8930	8800	4500	19300	7400	10200
$T_{\text{დნ}}, ^\circ\text{C.}$	660	1535	1083	1452	1665	3395	650	2600
$q_{\text{დნ}}, \text{კჯ/კგ}$	384	267	212	300	436	254	208	200

მანეთისაგან, ამიტომ სპილენძი და მისი შენადნობები მიეკუთვნება ძნელად გასაჭრელ მასალებს. სწორედ ამიტომ, სპილენძის ჭრის სიჩქარე 2,5-3-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე იმავე სისქის დაბალნახშირბადიანი ფოლადის ჭრისას. სპილენძის ჭრისას მოითხოვება მეტი სიმძლავრის პლანზმური რკალის გენერირება, რაც, თავის მხრივ, ზრდის მოხმარებული ელექტროენერგიის ხარჯს და ამცირებს პლანზმატრონის მუშაობის რესურსს.

ალუმინი და მისი შენადნობები მიეკუთვნება ყველაზე ადვილად გასაჭრელ მასალებს. მართალია, მათი თბოგამტარებლობის კოეფიციენტი დაახლოებით 3,2-ჯერ მეტია რკინისაზე, მაგრამ საკმაოდ დაბალი დნობის ტემპერატურა განაპირობებს მათი პლანზმური ჭრის სიადვილეს.

რკინა და მისი შენადნობები მიეკუთვნება საშუალო სირთულის მასალებს.

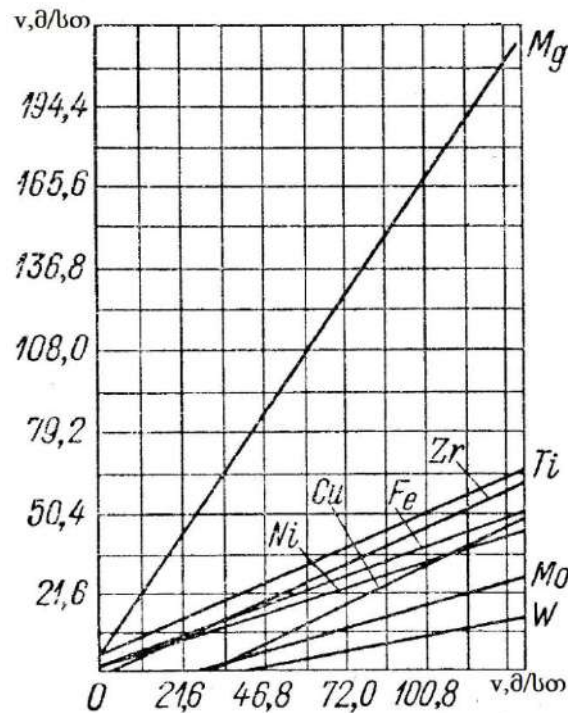
განვიხილოთ პლანზმური ჭრის სიჩქარის დამოკიდებულება მასალის თბოფიზიკურ მახასიათებლებზე. როგორც უკვე ვიცით ლითონის ლოკალური გამოდნობისათვის აუცილებელი თბური სიმძალვრე გამოითვლება (3.10) ფორმულით. თბური სიმძლავრე, რომელიც თბოგამტარებლობის გამო გაედინება გასაჭრელ ფურცელში შეიძლება გამოისახოს შემდეგი სახით:

$$q_{\omega} = k\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \sigma \delta,$$

თუ ამ უკანასკნელ გამოსახულებაში დავუშვებთ, რომ $k = 1$ და $\Delta T/\Delta x = T_{\text{დნ}}$ მივიღებთ $q_{\omega} = \lambda \sigma \delta T_{\text{დნ}}$. თუ დავუშვებთ, რომ ორი ერთაირი სისქის სხვადასხვა მასალის ერთნაირ რეჟიმებზე ჭრისას რკალიდან ლითონზე თბოგადაცემის კოეფიციენტი არ არის დამოკიდებული მასალის გვარობაზე, მაშინ ორივე შემთხვევაში ფურცელზე გადაცემული თბური სიმძლავრეები ერთმანეთის ტოლია

$$v_1 \rho_1 [c_1 (T_{\text{დნ}_1} - T_0) + q_{\text{დნ}_1}] + \lambda_1 T_{\text{დნ}_1} = v_2 \rho_2 [c_2 (T_{\text{დნ}_2} - T_0) + q_{\text{დნ}_2}] + \lambda_2 T_{\text{დნ}_2} \quad (5.1)$$

(5.1) ფორმულის საშუალებით შეიძლება გამოვთვალოთ ნებისმიერი ლითონის სიჩქარე, თუ ვიცით მეორე მასალის სიჩქარე. ამ გზით სიჩქარის განსაზღვრის მეთოდს ეწოდება ფარდობითი სიჩქარეების მეთოდი. ამ მეთოდით სარგებლობისათვის აგებულია გრაფიკი, სადაც აბსცისათა ღერძზე მოცემულია ალუმინის პლაზმური ჭრის სიჩქარეები, ხოლო ორდინატთა ღერძზე – სხვა ლითონების სიჩქარეები (სურ. 5.4). ექსპერიმენტის გზით ადგენენ მოცემული სისქის ალუმინის სიჩქარეს, შემდეგ აბსცისათა ღერძზე მოიძებნება მიღებული მნიშვნელობა და ამ წერტილიდან აღიმართება მართობი. საძიებელი ლითონის წრფისა და მართობის გადაკვეთის წერტილიდან გაივლება მართობი ორდინატთა ღერძის გადაკვეთამდე, რომელიც იქნება ამ ლითონის სიჩქარის მნიშვნელობა.



სურ.5.4

ფარდობითი სიჩქარეების გრაფიკი

ამ მეთოდით განსაზღვრული სიჩქარის ცდომილება შეადგენს დაახლოებით 20-30%-ს, რაც სავსებით მისაღებია სიჩქარის წინასწარი შეფასებისათვის.

ფარდობითი სიჩქარეების მეთოდის ერთ-ერთი ძირითადი უპირატესობაა სხვადასხვა ლითონების ჭრის სიჩქარეების ფარდობის დამოუკიდებლობა ფურცლის სისქისაგან. მაგალითად, ალუმინის ჭრის სიჩქარეს 100 მ/სთ შეესაბამება სპილენძის

ჭრის სიჩქარე 35 მ/სთ, ეს შესაბამისობა დამოკიდებული არ არის, თუ რა სისქის ალუმინის ჭრისას მიიღეს 100 მ/სთ – 20 მმ სისქის ალუმინის ჭრისას 30 კვტ სიმძლავრის რკალით, თუ 40 მმ სისქის ჭრისას 90 კვტ სიმძლავრის რკალით.

აღნიშნოთ, ფარდობითი სიჩქარეების გრაფიკის ზოგიერთი განსაკუთრებული მხარეები.

პირველი ის, რომ ზოგიერთი წრფეები იკვეთება. ეს ნიშნავს, რომ ამ ლითონების სიჩქარეებს შორის განსხვავების ნიშანი დამოკიდებულია ჭრის სიჩქარეების აბსოლუტურ მნიშვნელობაზე. ეს აიხსნება იმ ფაქტით, რომ ჭრის მაღალი სიჩქარეების შემთხვევაში (5.1) ფორმულაში ძირითადი მნიშვნელობა ენიჭება სიდიდეს $\rho[c(T_{დწ} - T_0) + q_{დწ}]$. თუ ლითონებს დავალაგებთ ამ სიდიდის ზრდადობის მიხედვით, მივიღებთ ლითონების შემდეგ მწკრივს: W, Mo, Ni, Cu, Fe, Zr, Ti, Al, Mg.

პლაზმური რკალის სიმძლავრის ფურცლის სისქესთან ფარდობის მაღალი მნიშვნელობების დროს, სიჩქარის ზრდადობის მიხედვით ლითონები იმავე თანამიმდევრობით ლაგდება.

პლაზმური რკალის სიმძლავრის ფურცლის სისქესთან ფარდობის მცირე მნიშვნელობების დროს (5.1) ფორმულაში ძირითადი მნიშვნელობა ენიჭება $\lambda T_{დწ}$ ამიტომ ლითონების მწკრივს ჭრის სიჩქარეების ზრდადობის მიხედვით ექნება შემდეგი სახე: W, Cu, Mo, Zr, Al, Mg, Ni, Fe, Ti. თუ შევადარებთ ამ ორ მწკრივს, ვნახავთ, რომ ზოგიერთი ლითონები განლაგებულია არაერთნაირი თანამიმდევრობით, რის გამოც, სიჩქარის გარკვეული მნიშვნელობიდან დაწყებული, მათი სიჩქარეებს შორის განსხვავების ნიშანი შეიცვლება.

გრაფიკის მეორე განსაკუთრებული თვისება მდგომარეობს იმაში, რომ ზოგიერთი წრფეები კვეთს აბსცისათა ღერძს, ზოგიერთი კი - ორდინატთა ღერძს. თუ, გარკვეული სიმძლავრის რკალით, მოცემული სისქის ალუმინის ჭრის სიჩქარე, არ აჭარბებს რომელიმე ლითონის წრფის აბსცისათა ღერძთან გადაკვეთის წერტილის მნიშვნელობას, მაშინ შეუძლებელია იმავე სისქის ლითონის, იმავე სიმძლავრის რკალით მცირე სიჩქარეებით ჭრა. ხოლო, თუ ლითონის შესაბამისი წრფე კვეთს ორდინატთა ღერძს, მაშინ მისი ჭრა შესაძლებელია, მხოლოდ ორდინატთა ღერძთან გადაკვეთის წერტილზე არა ნაკლები მნიშვნელობით.

მესამე თავისებურება მდომარეობს იმაში, რომ სიჩქარეების მაღალი მნიშვნელო-

ბებისათვის სიჩქარისა და მასალის სიმკვრივის ნამრავლი ყველა ლითონისათვის თითქმის ერთნაირია $\nu\rho = const$. რაც მეტია რკალის სიმძლავრის შეფარდება ფურცლის სისქესთან, მით უფრო ზუსტად სრულდება ტოლობა:

$$\nu_1\rho_1 = \nu_2\rho_2.$$

პლაზმური რკალის მაღალი სიმძლავრეების გამოყენებისას, ერთნაირი სისქის სხვადასხვა გვარის მასალების ჭრისას პლაზმურ რკალზე ძაბვის ვარდნა შეიძლება მცირედით განსხვავდებოდეს ერთმანეთისაგან. ამ განსხვავების მიზეზი შეიძლება იყოს პლაზმატრონსა და ფურცელს შორის მანძილის ცდომილება. ცნობილია, რომ სიგრძის 1 მმ-ს შესაბამება 2 ვ. შესაბამისად, დიდი სიმძლავრეების დროს რკალის ძაბვა დამოკიდებული არაა მასალის თბოფიზიკურ თვისებებზე. ეს შეიძლება აიხსნას, იმით რომ ლითონები ანოდური ძაბვის ვარდნის მიხედვით უმნიშვნელოდ განსხვავდება, ხოლო რკალის ლითონში ჩაძირვის ხარისხი ან ძალიან მცირეა ან ყველა ლითონისათვის ერთნაირია.

მცირე სიმძლავრეებზე ჭრისას, როდესაც პირობა $\nu\rho = const$ არ სრულდება, მაშინ გარკვეული სისქის ერთი სახის ლითონიდან, იმავე სისქის მეორე სახის ლითონის ჭრაზე გადასვლა ხორციელდება რკალზე ძაბვის მნიშვნელოვანი ცვლილებით. ყველა შემთხვევაში, გადასვლას ერთი ლითონიდან, რომლის სიჩქარე მეტია, იმავე სისქის მეორე ლითონზე თან სდევს რკალზე ძაბვის მატება.

კავშირს რკალის ძაბვასა და გასაჭრელი ფურცლის მასალას შორის შეიძლება ჰქონდეს შემდეგი ახსნა. დიდ სიმძლავრეებზე ანოდური უბანი განლაგებულია ფურცლის ზედა სიბრტყესთან ახლოს, ხოლო სხვა ლითონზე გადასვლისას იცვლება მხოლოდ სიჩქარე $\nu\rho = const$ პირობის შესაბამისად. რკალის სიმძლავრე იმდენად დიდია, რომ სითბური დანაკარგები ლითონში მინიმალურია და თბოგამტარებლობის ცვლილება გავლენას არ ახდენს სიჩქარეზე. რკალის მცირე სიმძლავრისას, მაღალი თბოგამტარებლობის ლითონიდან დაბალი თბოგამტარებლობის ლითონზე გადასვლისას ადგილი აქვს სიჩქარის მკვეთრ შემცირებას. ეს უკანასკნელი კი იწვევს რკალზე ძაბვის ზრდას, რაც, თავის მხრივ, განპირობებულია რკალის ჭრის არეში ჩაძირვის სიღრმის გაზრდით.

პლაზმური რკალის ეფექტური თბური სიმძლავრის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მასალის გვარობაზე (თბოფიზიკურ თვისებებზე). ცხადია, რომ

თანაბარი სისქის სხვადასხვა მასალის ჭრა შესაძლებელია პლაზმური რკალის ერთსა და იმავე სიმძლავრეზე. თუ ტექნიკურად მოსახერხებელია. ჭრის უზრუნველყოფა შესაძლებელია სიჩქარის რეგულირებით. მეორე მხრივ, პლაზმატრონიში გენერირებული პლაზმური რკალის სრულ თბური სიმძლავრე გავლენას ახდენს პლაზმატრონის მუშაობის რესურსზე და ქსელიდან მოთხოვნილ ელექტრულ სიმძლავრეზე. ამიტომ მიზანშეწონილია თბური სიმძლავრე შეირჩეს მოთხოვნილი სისქისა და მასალის თბოფიზიკური მახასიათებლების მიხედვით. ამ შერჩევას გათვალისწინებულ უნდა იყოს გასაჭრელი ფურცლის გეომეტრიული ზომებიც, რათა წინასწარ შესწავლილი იყოს ჭრის პროცესში ფურცლის ტემპერატურული ველი. მაგალითად, ფოლადის ჭრისას თავიდან უნდა ავიცილოთ გახურება იმ კრიტიკულ ტემპერატურებამდე, რომელზეც მიმდინარეობს რკინის გადასვლა ერთი მოდიფიკაციიდან მეორეში. უნდა გაანგარიშდეს სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც აუცილებელია ლოკალური გახურებისა და გამოდნობისათვის. სითბოს რაოდენობის ეს ყველა შემადგენელი დამოკიდებულია მასალის ფიზიკურ მახასიათებლებზე. მაგალითისათვის, მიახლოებით გამოვთვალოთ იმ სითბოს რაოდენობის მნიშვნელობები, რომელიც აუცილებელია $\delta=0,04$ მ სისქის ალუმინისა და სპილენძის ფურცლების 1სმ (0,01 მ) სიგრძეზე პლაზმური ჭრისათვის. დავუშვათ, რომ პლაზმატრონის საქშენის არხის დიამეტრია $d=0,004$ მ. ამიტომ ჭრის სიგანე იქნება $\sigma=0,008$ მ-ის ტოლი, ფურცლის საწყისი ტემპერატურა $T_0=15^{\circ}\text{C}$. გამოთვლებისათვის გამოვიყენოთ ცხრ. 5.1-ის მონაცემები. ამ მონაცემებით ალუმინის გახურებისათვის დნობის ტემპერატურამდე აუცილებელი სითბოს რაოდენობა ტოლია:

$$Q_{g1} = l\delta\sigma\rho_1c_1(T_{df} - T_0) = 0,01 \cdot 0,04 \cdot 0,008 \cdot 2700 \cdot 916 \cdot (660 - 15) \approx 5105 \text{ ჯ.}$$

გამოვთვალოთ გამოდნობისათვის აუცილებელი სითბოს რაოდენობა:

$$Q_{df} = l\delta\sigma\rho_1q_{df} = 0,01 \cdot 0,04 \cdot 0,008 \cdot 2700 \cdot 384000 \approx 3318 \text{ ჯ.}$$

ფურცელში თბოგამტარებლობით გახარჯული თბური სიმძლავრე იქნება:

$$q_{\sigma} = \lambda\delta\sigma \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda\delta\sigma T_{df} = 224 \cdot 0,04 \cdot 0,008 \cdot 660 \approx 47 \text{ ჯ/წმ.}$$

ალუმინის ფურცელზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, რომელიც უშუალოდ ხმარდება გახურებასა და გამოდნობას იქნება:

$$Q = 5105 + 3318 = 8423 \text{ ჯ.}$$

ანალოგიური გათვლებით სპილენძისათვის მივიღებთ:

$$Q = 12696 + 6058 = 18754 \text{ ჯ.}$$

$$q_{\omega} \approx 133 \text{ ჯ/წმ.}$$

როგორც მოყვანილი კონკრეტული მაგალითოდან ჩანს, სპილენძის შემთხვევაში ლითონის გახურებასა და გადნობაზე მოითხოვება 2,2-ჯერ მეტი სითბო, ხოლო თბოგამტარებლობის გამო ფურცელში 1 წმ-ში გაედინება თითქმის 3-ჯერ მეტი სითბო. ამრიგად, პლაზმური რკალის თბურ სიმძლავრეს განსაზღვრავს გასაჭრელი ლითონის თბოფიზიკური თვისებები. პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების დადგენისას ყველა დამოკიდებულებები განხილულ უნდა იქნეს კომპლექსურად.

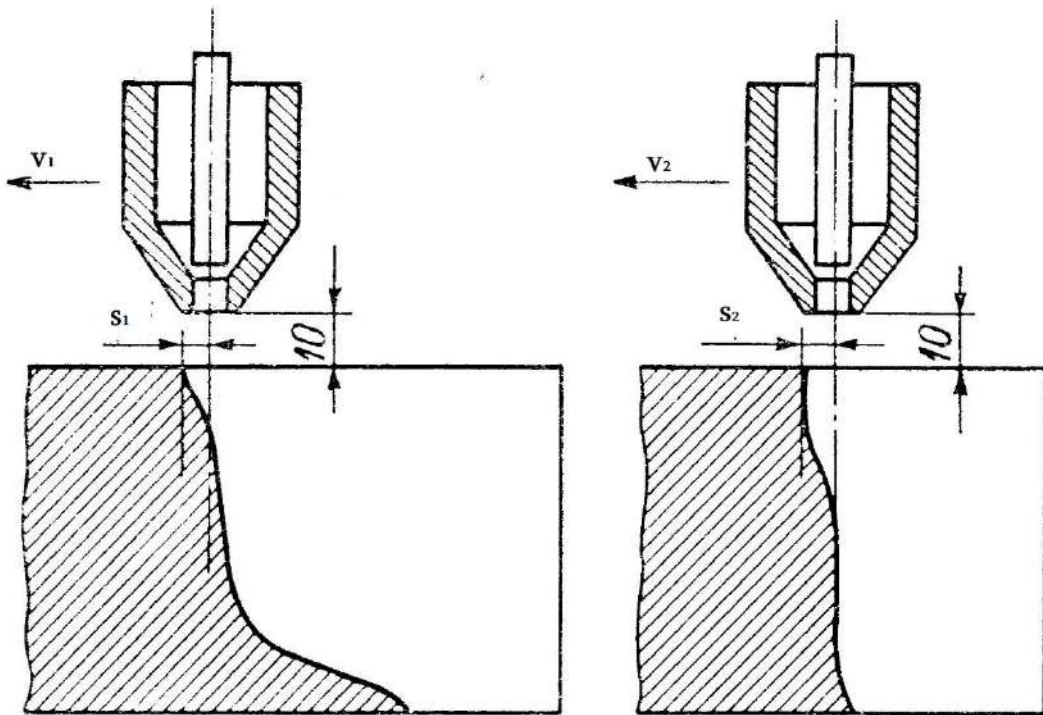
6. პლაზმური ჭრის ზედაპირების ხარისხის მახასიათებლები

ჭრის სიგანე, მისი დამოკიდებულება პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევასა და ხარჯზე, ჭრის სიჩქარეზე, დენის ძალასა და მანძილზე პლაზმატრონიდან გასაჟრელი ლითონის ზედაპირამდე, ჭრის ზედაპირების გადახრა პერპენდიკულარობიდან. მისი დამოკიდებულება ჭრის სიჩქარეზე, დენის ძალასა და მანძილზე პლაზმატრონიდან გასაჟრელი ლითონის ზედაპირამდე

პლაზმური ჭრის პროცესის ეფექტურობის ერთ-ერთ მაჩვენებელს წარმოადგენს ჭრის სიგანე, რადგან მისი სიდიდე განსაზღვრავს ლითონის დანაკარგებს. როგორც წესი, ჭრის სიგანე ფურცლის სისქის გასწვრივ არათანაბარია, რაც აიხსნება პლაზმური რკალის სხვადასხვა უბნის განსხვავებული მჭრელი აქტივობით. ჭრის სიგანეზე გავლენას ახდენს საქმენის არხის დიამეტრი და სიმაღლე, დენის ძალა, პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე, პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯი და წნევა, მანძილი პლაზმატრონსა და ფურცელს შორის და სხვ. ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრები, თავის მხრივ, განსაზღვრავს პლაზმური რკალის გეომეტრიულ ზომებს, კერძოდ კი, განივი კვეთის სიდიდეს. ჭრის სიგანეზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გამაგრიგალებელის არხების საერთო ფართობი. შვეისწავლოთ თითოეული მათგანის გავლენა სიგანეზე.

მოცემული სისქისა და მასალის პლაზმური ჭრის ოპტიმალური სიჩქარე დამოკიდებულია რკალის სიმძლავრეზე და მისი სწორედ შერჩევა განაპირობებს ჭრის სიგანის ზომებს. მაქსიმალურად შესაძლებელ სიჩქარეზე მანძილი (s_1) პლაზმატრონის სიმეტრიის ღერძსა და გადნობის ფრონტის კონტურის გასაჟრელი ფურცლის ზედა სიბრტყესთან გადაკვეთის წერტილს შორის მინიმალურია (სურ..6.1). ამიტომ ფურცლის ზედა ფენებზე მიწოდებული სითბოს რაოდენობა მაქსიმალურია, ხოლო ქვედა ფენებზე – მინიმალური. ამის შედეგად, ზედა ფენებიდან გამომდნარი ლითონის რაოდენობა მეტია ქვედა ფენებიდან გამომდნარ ლითონზე. რის გამოც ჭრის სიგანე ფურცლის ზედა სიბრტყესთან დიდია და მცირდება ქვედა სიბრტყისაკენ. სიჩქარის შემცირებისას მანძილი (s_2) პლაზმატრონის ღერძსა და დნობის ფრონტის კონტურის ზედა ნაწილს შორის იზრდება, რაც იწვევს რკალიდან თბური ნაკადის შემცირებას ფურცლის ზედა ფენებში. სითბოს უმეტესი ნაწილი რჩება აირში და დამატებით მიეწოდება ქვედა ფენებში. ამიტომ, განსხვავება ჭრის სიგანის ზომებს შორის ზედა და ქვედა სიბრტყეებში კლებულობს. სიჩქარის გარკვეულ მნიშვნელობაზე ჭრის სიგანის მაქსიმალური ზომა

მიიღება ანოდური ლაქის დონეზე, რაც აიხსნება ანოდურ ლაქაში კუთრი თბური ნაკადის მაქსიმალური მნიშვნელობით.



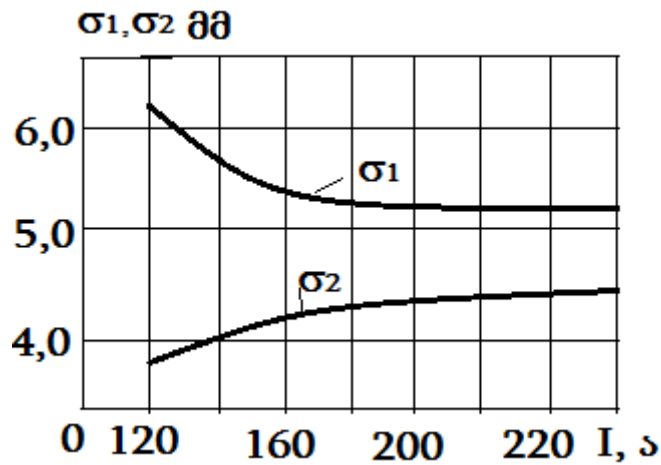
სურ. 6.1

დნობის ფრონტის კონტური

$$v_1 > v_2; s_1 < s_2$$

განვიხილოთ დენის ძალის გავლენა ჭრის სიგანეზე პლავმატრონის გადაადგილების ფიქსირებული სიჩქარის შემთხვევაში. დენის ძალის შემცირებით, იკლებს ლითონზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა და შესაბამისად ლითონის ქვედა ფენებში გადაცემული სითბოს რაოდენობაც, რაც იწვევს ჭრის სიგანის შემცირებას ფურცლის ქვედა სიბრტყეში. დენის ძალის გარკვეულ მნიშვნელობაზე კი გადნობა ქვედა ფენებში შეუძლებელი ხდება და ჭრის პროცესი წყდება. დენის ძალის მომატებისას იზრდება თბური ნაკადები, როგორ ზედა ისე ქვედა ფენებში, გამოდნობა მიმდინარეობს ინტენსიურად და ჭრის საშუალო სიგანე იზრდება. ამიტომ დენის ძალის ზრდასთან ერთად, სასურველია სიჩქარის მომატებაც, რაც უზრუნველყოფს სიგანის შემცირებას ქვედა სიბრტყეში. თუ დენის ძალას დავაფიქსირებთ და ვცვლით სიჩქარეს, მაშინ მისი შემცირებისას გაიზრდება ლითონის გამოდნობის ინტენსიურობა და ჭრის საშუალო სიგანე გაიზრდება, ხოლო მომატებისას მცირდება ლითონის გამოდნობის

ინტენსიურობა, რაც განაპირობებს სიგანის შემცირებას ქვედა სიბრტყეში და ჭრაც შეიძლება შეწყდეს. ამიტომ დენის ძალისა და სიჩქარის მნიშვნელობები, ისე უნდა შეირჩეს, რომ საშუალო სიგანეს ჰქონდეს ოპტიმალური მნიშვნელობა, ხოლო განსხვავება ფურცლის ქვედა და ზედა სიბრტყეებში არსებულ ჭრის სიგანეებს შორის უნდა იყოს უმცირესი. სურ. 6.2-ზე მოყვანილია გასაჭრელი ფურცლის ზედა და ქვედა სიბრტყეებში ჭრის სიგანეების დამოკიდებულება დენის ძალაზე.



სურ. 6.2

ჭრის სიგანის დამოკიდებულება დენის ძალაზე

σ_1 - ჭრის სიგანე ზედა სიბრტყეში;

σ_2 - ჭრის სიგანე ქვედა სიბრტყეში.

ჭრის პალზმატრონებში პლაზმაწარმომქმნელი აირი საქშენში მიეწოდება ტანგენციალურად, ხრახნისმაგვარი არხების საშუალებით. აირი მოძრაობს სპირალზე და გარს ერტყმის პლაზმურ რკალს. როგორც ადრე აღვნიშნეთ, აირის ტანგენციალური მიწოდებისას იზრდება ნაკადის სიჩქარის რადიალური მდგენელი, რომელიც განაპირობებს რკალის შეკუმშვის ხარისხს და მის დაგრძელებას საქშენის არხში. ამასთან ერთად, პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯის მომატებასთან ერთად იზრდება რკალის შეკუმშვის ხარისხიც, რაც, თავის მხრივ, დადებითად მოქმედებს ჭრის სიგანის ზომებზე. ამავე დროს გათვალისწინებული უნდა იყოს გამაგრიგალელების კონსტრუქციული პარამეტრები, კერძოდ კი გამაგრიგალელების არხების რაოდენობა და მათი საერთო კვეთის ფართობი, რომელიც არ უნდა აღემატებოდეს საქშენის არხის კვეთის ფართობს, რათა არ მოხდეს გრიგალის შესუსტება. ამიტომ ხარჯის ოპტიმალური მნიშვნელობა დამოკიდებულია საქშენის არხის გამტარუნარიანობაზე. პლაზმატრონის კონსტრუქ-

ციის შემუშავებისას, საქშენის არხის დიამეტრისა და გამაგრებულ არხების გეომეტრიული ზომების შერჩევა უნდა მოხდეს ერთმანეთთან შესაბამისობაში. ამავე დროს, ჭრის სიგანეზე გავლენას ახდენს პლაზმაწარმოქმნილი გარემოს სახეობაც, რომელთა ქიმიურ და ფიზიკურ თვისებებზე გვექონდა საუბარი პირველ ლექციაზე. რადიალური სიჩქარის ცვლილება, შესაბამისად აჩქარების ტანგენციალური და ნორმალური მდგენელებიც, ხარჯის ცვლილებასთან ერთად განსხვავებულია ამ აირებისათვის, რაც განპირობებულია მათი სიმკვრივითა და სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტით. აირის ტურბულენტური დინების ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელი რეინოლდსის რიცხვი კი დამოკიდებულია ამ პარამეტრებზე. ცხადია, რომ ნებისმიერი აირის შემთხვევაში ხარჯის ზრდა გამოიწვევს ჭრის საშუალო სიგანის შემცირებას. ცხრ. 6.1-ში მოყვანილია ჭრის სიგანის დამოკიდებულება აირის ხარჯზე შეკუმშული ჰაერის, ჟანგბადისა და წყლის ორთქლის შემთხვევებისათვის.

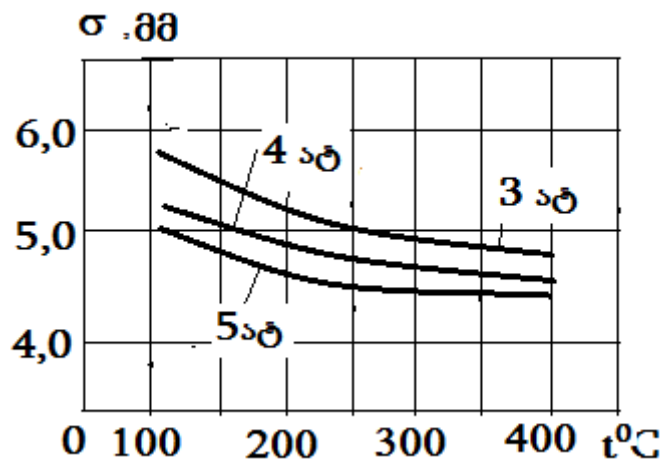
ცხრილი 6.1

ჭრის სიგანის დამოკიდებულება აირის ხარჯზე

აირი	აირის ხარჯი, ლ/წმ	საქშენის არხის დიამეტრი, მმ	დენის ძალა, ა	რკალის ძაბვა, ვ	ჭრის საშუალო სიგანე, მმ
შეკუმშული ჰაერი	0,6	2,5	200	190	5,9
	1,3			210	5,4
	2,0			220	5,4
	2,6			228	5,2
ჟანგბადი	0,6	2,5	200	170	6,4
	1,3			180	6,2
	2,0			190	6,0
	2,6			200	6,0
წყლის ორთქლი	0,6	2,5	200	226	5,6
	1,3			235	5,1
	2,0			245	4,8
	2,6			252	4,6

ცხრილში მოყვანილი მონაცემებიდან ჩანს, რომ ჭრის სიგანე წყლის ორთქლის შემთხვევაში 0,3-0,6 მმ-ით ნაკლებია შეკუმშულ ჰაერთან შედარებით. ეს განსხვავება დამოკიდებულია წყლის ორთქლის ტემპერატურაზე პლაზმატრონის შესასვლელზე. ტემპერატურის გავლენაზე პლაზმური რკალის ძაბვასა და გეომეტრიულ ზომებზე

განხილული იყო წინა ლექციებში. ადრე განხილული მექანიზმის გარდა წყალბადის დისოციაციისას მიმდინარეობს სითბოს დიდი რაოდენობის შთანთქმა, რაც იწვევს პლაზმური რკალის პერიფერიული უბნების ინტენსიურ გაცივებას და შესაბამისად რკალის განივი კვეთის შემცირებას. (2.3) ფორმულის თანახმად რკალის დიამეტრი უკუპროპორციულია კუბური ფესვისა ენტალპიიდან, ეს უკანასკნელი კი დამოკიდებულია ტემპერატურაზე და 3-5 ჯერ აღემატება შეკუმშული ჰაერის ენტალპიას. ამიტომ წყლის ორქოლის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მცირდება ჭრის საშუალო სიგანე. ცხადია, რომ აირის ხარჯის ანალოგიურია პლაზმაწარმომქნელი აირის წნევის გავლენის მექანიზმი ჭრის სიგანეზე. სურ. 6.3-ზე მოყვანილია ჭრის საშუალო სიგანის დამოკიდებულება წყლის ორქოლის ტემპერატურაზე სხვადასხვა წნევებისათვის.

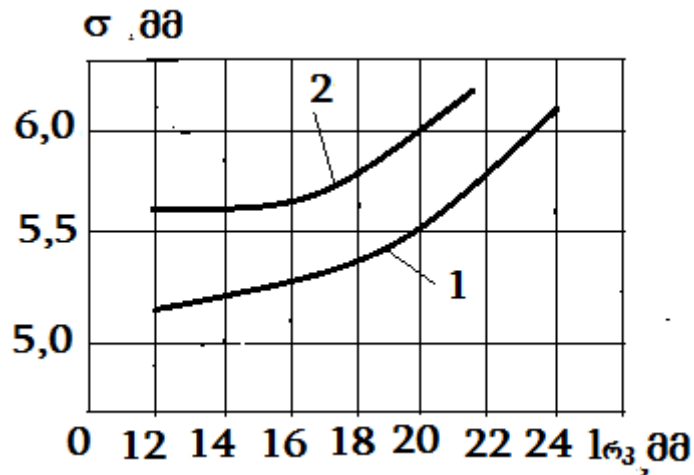


სურ. 6.3

ჭრის საშუალო სიგანის დამოკიდებულება წყლის ორქოლის ტემპერატურაზე სხვადასხვა წნევებზე

პლაზმური რკალის დენის ძალის, პლაზმაწარმომქნელი გარემოს წნევისა და ხარჯის, წყლის ორქოლის შემთხვევაში მისი ტემპერატურის ფიქსირებული მნიშვნელობების დროს, ჭრის საშუალო სიგანე დამოკიდებულია პლაზმატრონსა და გასაჟრელ ფურცელს შორის მანძილზე. როგორც ვიცით, ამ მანძილის ზრდა იწვევს ჭრის სიჩქარის შემცირებას, რაც თავის მხრივ სიგანის გაზრდის მიზეზია (სურ. 6.4). ამიტომ, ამ შემთხვევაშიც, მოცემული პარამეტრებისათვის უნდა შეირჩეს მანძილის ოპტიმალური მნიშვნელობა.

პლაზმური ჭრის პროცესის ერთ-ერთ პრობლემას წარმოადგენს პლაზმური ჭრის ზედაპირების გადახრა პერპენდიკულარობიდან – ჭრის ზედაპირს აქვს კონუსისმაგვა-

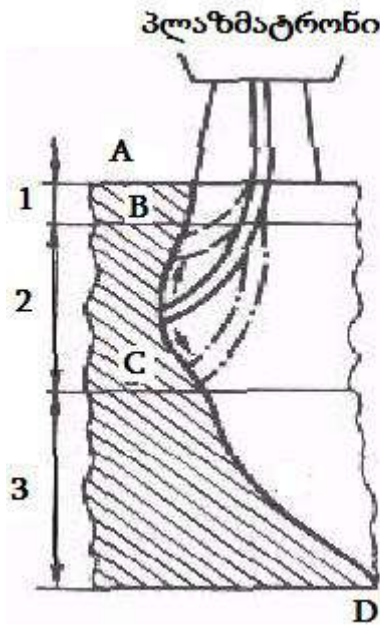


სურ. 6.4

ჭრის საშუალო სიგანის დამოკიდებულება პლაზმატრონსა და გასაჭრელ ფურცელს შორის მანძილზე $l = 200$; $d_b = 2,5$ მმ

1. წყლის ორთქლი;
2. შეკუმშული ჰაერი.

რი ფორმა და მისი შემცირება წარმოადგენს მნიშვნელოვან ამოცანას. სურ. 6.5-ზე მოცემულია პლაზმური რკალის ანოდური ლაქის ჭრის ზედაპირზე გადაადგილების სქემა, რომელიც ნათლად ასახავს პერპენდიკულარობიდან გადახრის მექანიზმს. პირველ უბანზე (AB) ლითონი დნება რკალის სვეტიდან გადაცემული სითბოთი, მეორე (BC) უბანი განლაგებულია ფურცლის სისქის შუაში და წარმოადგენს ლაქის მიბმის ადგილს. ამ უბანზე ლითონი დნება პლაზმური რკალის სვეტისა და ანოდური ლაქის ენერჯის ხარჯზე, ამიტომ წინა უბანთან შედარებით იზრდება გამომდნარი ლითონის რაოდენობა, რითაც აიხსნება მისი ზედაპირის ფორმა. მესამე (CD) უბანზე ლითონი ძირითადად დნება პლაზმური ნაკადის სითბოთი, რომელიც ქვედა სიბრტყისაკენ მცირდება. გამდნარი ლითონის რაოდენობის შემცირებასთან ერთად ჭრის ზედაპირი ხდება მეტად ციცაბო. აქედან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სისქის მიხედვით სითბოს არათანაბარი განაწილება იწვევს ჭრის ზედაპირებისათვის კონუსისმაგვარი ფორმის მიღებას. ამიტომ, პლაზმური ჭრით მიღებული დეტალები მოითხოვენ დამატებით მექანიკურ დამუშავებას. ამ პრობლემის ნაწილობრივ მოგვარების გზაა ანოდური ლაქის ლითონში ჩაძირვის სიღრმის გაზრდა, რომელიც დამოკიდებულია პლაზმური რკალის გაჭიმვის მაქსიმალურ სიგრძეზე, პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე, საქმენის გეომეტრიულ ზომებზე, პლაზმაწარმომქნელი გარემოს გვარობაზე, მის ხარჯსა



სურ. 6.5

პლაზმური რკალის ანოდური ლაქის ჭრის ზედაპირზე გადაადგილების სქემა

და წნევაზე. პერპენდიკულარობიდან გადახრაზე გავლენას ახდენს რკალის III უბნის – საქმენის ქვედა ზედაპირიდან გასაჭრელი ფურცლის ზედა სიბრტყემდე და IV – ჭრის არეში, ფურცლის ზედა სიბრტყესა და ანოდურ ლაქას შორის სიგრძეები (სურ. 2.1). პრაქტიკულად III უბნის სიგრძე ყველა შემთხვევაში შეადგენს 10 – 12 მმ-ს, რომელზეც ქვემოთ იქმნება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება. IV – უბნის სიგრძე განსაზღვრავს ანოდური ლაქის ჩაძირვის სიღრმეს. ცნობილია, რომ ანოდური ლაქა მოიცავს ფართო არეს – გასაჭრელი ფურცლის სისქის 0,3 – 0,6 ნაწილს. რაც მეტია ეს ზომა, მით უფრო მეტ სიგრძეზე იქნება თანაბრად განაწილებული პლაზმური ნაკადის სითბო და შესაბამისად ჭრის ზედაპირი იქნება ნაკლებად ციცაბო. ექსპერიმენტების დროს მოსახერხებელია გაიზომოს მანძილი პლაზმატრონსა და ფურცლის ზედაპირს შორის, რადგან მისი ცვლილება პირდაპირ კავშირშია IV – უბნის სიგრძის ცვლილებასთან. პლაზმური რკალისა და ტექნოლოგიური პარამეტრების ფიქსირებული მნიშვნელობებისათვის ჩატარებულმა ცდებმა ცხადჰყო, რომ პერპენდიკულარობიდან გადახრა (K, მმ) იზრდება პლაზმატრონსა და ფურცლის ზედაპირს შორის მანძილის გაზრდით, ე.ი. ჩაძირვის სიღრმის შემცირებით ლითონში. იმისათვის, რომ დავადგინოთ ეს უკანასკნელი, ამიტომ ექსპერიმენტულად უნდა განისაზღვროს რკალის მაქსიმალური გაჭიმვის სიგრძე. კვლევების დროს გამოიყენება ე.წ. „ცივი ანოდი“, რომელიც წარმოად-

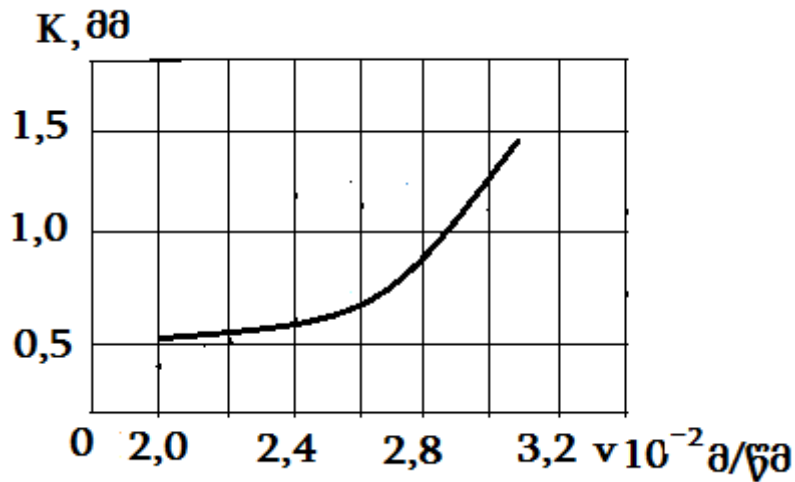
გენს სპილენძისაგან დამზადებულ მბრუნავ და წყლით გაცივებულ დისკოს, რომლის ზედაპირზე ანთია რკალი. ე.ი. ანოდური ლაქა განლაგებულია ზედაპირზე. ამ მეთოდით დგინდება რკალის სრული და ცალკეული უბნების სიგრძე. მაგალითად, ჩვენს მიერ ჩატარებული ცდებით დადგინდა, რომ შეკუმშული ჰაერის შემთხვევაში რკალის მაქსიმალური სიგრძე პლაზმატრონიდან ანოდური ლაქის განლაგების წერტილამდე (ცივი ანოდის ზედაპირი) შეადგენს 18 მმ, ხოლო წყლის ორთქლის შემთხვევაში – 24 მმ. ორივე შემთხვევაში პლაზმური რკალის დენის ძალა იყო 200 ა, საქმენის დიამეტრი – 2,5 მმ, პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევა 4 ატ. თუ მანძილი პლაზმატრონიდან გასაჭრელი ფურცლის ზედაპირამდე იქნება 10 მმ, მაშინ ლითონში რკალის ჩაძირვის სიღრმე პირველ შემთხვევაში იქნება 8 მმ, ხოლო მეორე შემთხვევაში 14 მმ. ე.ი. IV – უბნის სიგრძე (სურ. 2.1) წყლის ორთქლის შემთხვევაში თითქმის 2-ჯერ მეტია შეკუმშულ ჰაერთან შედარებით, მაშასადამე, მეტია ლითონის თანაბარად დნობის უბანი. შედარებითმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ პერპენდიკულარობიდან გადახრა წყლის ორთქლის შემთხვევაში მართლაც მცირდება 2-ჯერ.

პლაზმური რკალის გაჭიმვის სიგრძე დამოკიდებულია რკალის შეკუმშვის ხარისხზე. რომელიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია საქმენის არხის დიამეტრზე, აქედან გამომდინარე მისი სიდიდეც ახდენს გავლენას ჭრის ზედაპირების პერპენდიკულარობიდან გადახრის მნიშვნელობაზე. არ უნდა დაგვავიწყდეს, რომ საქმენის არხის დიამეტრის ზომაც დამოკიდებულია პლაზმური რკალის ელექტრულ მახასიათებლებზე და მისი შემცირება შეზღუდულია გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობამდე.

წინა ლექციებში საუბარი იყო პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯისა და წნევის გავლენაზე პლაზმური რკალის ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე, ახსნილი იყო მათი ზემოქმედების ფიზიკა. როგორც ვნახეთ, ეს ორი პარამეტრიც ახდენს გავლენას რკალის შეკუმშვის ხარისხზე, რაც ასევე აისახება პერპენდიკულარობიდან გადახრის სიდიდეზე.

პლაზმური ჭრის ერთ-ერთი მთავარი და რეგულირებადი პარამეტრია სიჩქარე, რომელზეც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ჭრის ზედაპირების ხარისხი და პროცესის მწარმოებლურობა. სიჩქარის ზრდა ერთი მხრივ ხელს უწყობს მწარმოებლურობას, მაგრამ, მეორე მხრივ, იწვევს ჭრის სიგანის შემცირებას ფურცლის ქვედა სიბრტყეში, ეს უკანასკნელი კი პერპენდიკულარობიდან გადახრის გაზრდის მიზეზია.

სურ. 6.6-ზე მოყვანილია პერპენდიკულარობიდან გადახრის დამოკიდებულება პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე.



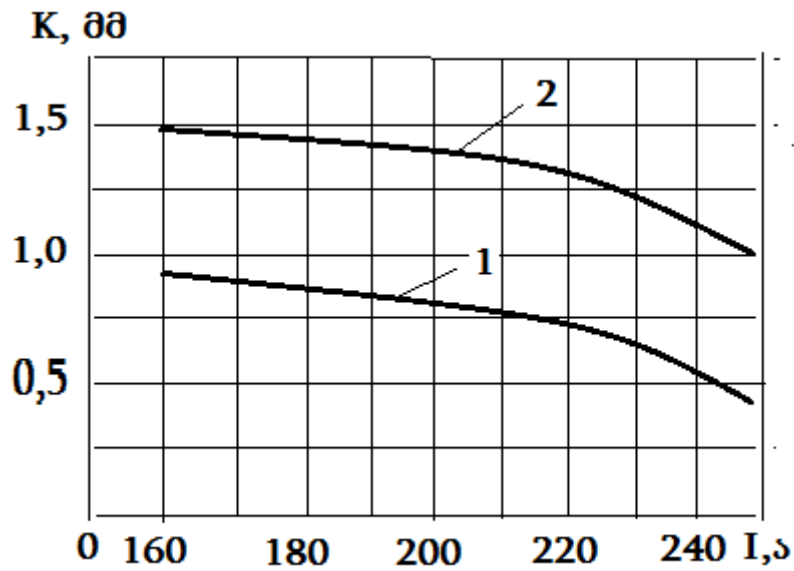
სურ. 6.6

პერპენდიკულარობიდან გადახრის დამოკიდებულება პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე.

დენის ძალის ზრდა, სხვა პარამეტრების ფიქსირებული მნიშვნელობებისათვის, იწვევს პერპენდიკულარობიდან გადახრის შემცირებას (სურ. 6.7). დენის ძალის გაზრდისას, მატულობს რკალის სვეტიდან ჭრის ზედაპირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, რომელიც პლაზმატრონის გადაადგილების მოცემული მნიშვნელობისას ხელს უწყობს ჭრის სიგანის ზრდას ფურცლის ქვედა სიბრტყეში და შესაბამისად მცირდება პერპენდიკულარობიდან გადახრა.

წყლის ორთქლის გამოყენებისას პერპენდიკულარობიდან გადახრაზე გავლენას ახდენს მისი ტემპერატურა პლაზმატრონის შესასვლელზე. როგორც უკვე ვიცით, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება პლაზმური რკალის ძაბვა, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს პლაზმური რკალის გადნობისუნარიანობის გაზრდას და ლითონში ჩაძირვის სიღრმის მომატებას. ეს უკანსკნელი კი ამცირებს პერპენდიკულარობიდან გადახრის მნიშვნელობას.

ამრიგად, ამ შემთხვევაშიც, ჭრის ზედაპირის პერპენდიკულარობიდან გადახრის მინიმალური მნიშვნელობის მისაღებად, აუცილებელია გასაჭრელი ფურცლის მასალისა და სისქის მიხედვით, კომპლექსურად შეირჩეს მასზე მოქმედი ყველა პარამეტრი. მაგალითისათვის ცხრ. 6.2-ში მოგვყავს 16 მმ ფოლადის პლაზმური ჭრის პარამეტრების



სურ. 6.7

პერპენდიკულარობიდან გადახრის დამოკიდებულება დენის ძალაზე.

1. წყლის ორთქლი;
2. შეკუმშული ჰაერი.

საორიენტაციო მიახლოებითი მნიშვნელობები, რომელთა ერთობლიობა გვაძლევს ჭრის სიგანისა და პერპენდიკულარობიდან გადახრის მისაღებ მნიშვნელობებს.

ცხრილი 6.2

პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიური პარამეტრები

პარამეტრები	$I, \text{ ა }$	$l_{\text{რკ}}, \text{ მმ }$	$G, \text{ ლ/წმ }$	$p, \text{ ატ }$	$v, \text{ მ/წმ }$	$t^{\circ}\text{C}$	$d_p, \text{ მმ }$	$\sigma, \text{ მმ }$	$K, \text{ მმ }$
შეკუმშული ჰაერი	200	10	2,6	4	0,021	-	2,5	5,25	1,35
წყლის ორთქლი	180	10	2,6	6	0,028	300	2,5	4,5	0,75

7. პლაზმური ჭრის ზედაპირების ხარისხის მახასიათებლები

ჭრის ზედაპირების ხორკლიანობა. ხიწვები. მისი ზომების დამოკიდებულება დენის ძალაზე, ჭრის სიჩქარესა და პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევასა და ხარჯზე. ჭრის სიზუსტე. მისი დამოკიდებულება პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯზე, რკალის ძაბვასა და რკალის შეკუმშვის ხარისხზე. აზოტითა და ჟანგბადით ზედაპირების გაჯერების მექანიზმი და მათი გავლენა ზედაპირების ხარისხზე. აირგაჯერების შემცირების ხერხები

პლაზმური ჭრის შემდეგ ჭრის ზედაპირებისათვის დამახასიათებელია ხორკლიანობა, რომელიც წარმოადგენს უსწორმასწორობების ერთობლიობას.

ცნობილია, რომ ჭრის ზედაპირებზე წარმოიქმნება ლითონის სახეშეცვლილი სტრუქტურა ნათელი ზოლის სახით, რომელსაც ეწოდება თერმული გავლენის არის სხმული უბანი. სწორედ ამ უბანში მიმდინარეობს მიკროსტრუქტურის არასასურველი ცვლილებები და ხასიათდება მაღალი სისალით. მიკრო– და მაკროშლიფების შესწავლამ აჩვენა, რომ ზედაპირზე უსწორმასწორობების წარმოქმნა დაკავშირებულია სწორედ სხმული უბნის არსებობასთან. რაც უფრო მცირეა მისი სიღრმე, მით უფრო მცირეა ხორკლიანობაც. ხორკლიანობის წარმოქმნის მექანიზმი შეიძლება აიხსნას შემდეგნაირად. ჭრის პროცესში ჭრის ზედაპირზე ლითონი დნება, იჟანგება და გამოიდევენება პლაზმური ჭავლით, ხოლო გამდნარი ლითონის ნაწილი ფრონტალური ზედაპირიდან გადაადგილდება ჭრის ნაწიბურებზე. ეს პროცესი მიმდინარეობს ულუფებით ანუ ფრონტალურ ზედაპირზე გამდნარი ლითონის დაგროვების მიხედვით. თითოეული ულუფის გამოდევენებას და გადაადგილებას შეესაბამება ერთი ნაღარის წარმოქმნა. თითოეული ულუფის მოცულობა დამოკიდებულია ლითონის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტზე. რაც უფრო დიდია კოეფიციენტი მით უფრო მეტია ლითონის ერთი ულუფის მოცულობა და ნაკლებია მათი გამოდევენების პერიოდი. ლითონები მცირე ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტით გაცილებით თხიერდენადებია, ამიტომ ულუფის მოცულობა მცირეა, გამოდევენების პერიოდი კი მეტი. პირველ შემთხვევაში ნაღარების რაოდენობა სიგრძის ერთეულზე ნაკლებია, მაგრამ ღრმა, მეორე შემთხვევაში კი – პირიქით.

ნაღარების წარმოქმნასა და სიდიდეზე გავლენას ახდენს ჭრის სიჩქარე და გასაჭრელი ფურცლის სისქე, განსაკუთრებით მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს არათანა-

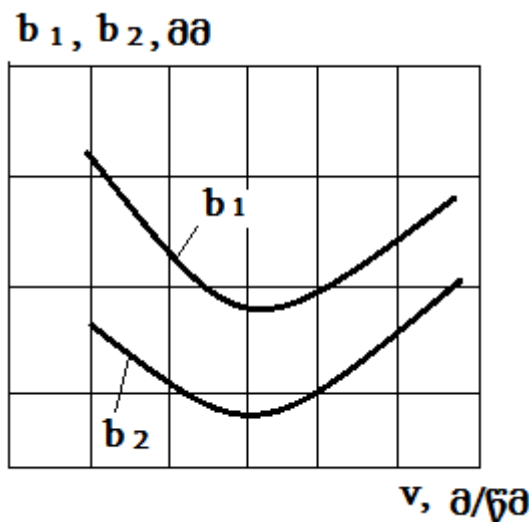
ბარი სიჩქარე. მაქსიმალური სიჩქარის მომენტში პლაზმური რკალი შესაბამის უბანზე იმყოფება ისეთი მცირე დროის განმავლობაში, რომ ესწრება ლითონის მინიმალური რაოდენობის აღება და წარმოიქმნება გამონაშვერი. თუ რაღაც მომენტში სიჩქარე შემცირდა მინიმუმამდე, მაშინ პლაზმური რკალი ამ დროის განმავლობაში ასწრებს ლითონის დიდი რაოდენობის მოხსნას და ამ ადგილზე წარმოიქმნება ჩაღრმავება. ამგვარად წარმოქმნილი ნაღარების სიხშირე შეესაბამება სიჩქარის ცვლილების სიხშირეს. ნაღარების ზომები დამოკიდებულია სიჩქარის ამპლიტუდასა და ცვლილების სიხშირეზე. ამავე დროს, პლაზმური რკალის საკუთარი პულსაციები განაპირობებენ ტალღური ზედაპირის მიღებას. სიჩქარის ცვლილების მაღალი სიხშირე დამახასიათებელია ხელით პლაზმური ჭრისათვის და დამოკიდებულია ოპერატორის კვალიფიკაციაზე, ხოლო მექანიზირებული ჭრისას გადასაადგილებელი მექანიზმის სრულყოფილებაზე.

პრაქტიკაზე ხორკლიანობა იზომება მიკრომეტრის საშუალებით პროფილის უსწორმასწორობების სიმაღლის გაზომვით 8 მმ-ის სიგრძის ტოლ ბაზურ ხაზზე 10 წერტილის მიხედვით.

პლაზმური ჭრის პროცესი ხასიათდება ნაღვენთის წარმოქმნით ხიწვების სახით ფურცლის ქვედა სიბრტყეზე. ხიწვები იზომება მისი სიგანითა და სიმაღლით. ჭრის არეში წარმოქმნილი გამდნარი ლითონის დიდი ნაწილი რკალის ჭავლის ზემოქმედებით გამოიღვენება გარეთ, ნაწილი კი გადაადგილდება ნაწიბურებისაკენ, სადაც ჭავლი შესუსტებულია. შედარებით ცივ ლითონთან შეხებისას მყარდება და ზედაპირული მიზიდულობის ძალების მოქმედებით მიეკრობა ჭრის ნაწიბურებს. ჭრის პროცესის დასრულების შემდეგ აუცილებელია მისი მოშორება დეტალიდან. ხიწვების არსებობა და ზომები დამოკიდებულია რკალის ძალურ ზემოქმედებაზე გასაჭრელი ფურცლის ქვედა სიბრტყეზე. ძალური ზემოქმედება განისაზღვრება იმ ელექტრომაგნიტური ძალებით, რომლებიც წარმოიქმნება რკალში დენის ურთიერთქმედებით საკუთარ მაგნიტურ ველთან. ცილინდრულ გამტარში ელექტრომაგნიტური ძალები იწვევს რადიალურ კუმშვას (პინჩ-ეფექტი). დენის ხაზების გამრუდებისას აღიძვრება პინჩის გრძივი მდგენელი, რომელიც ქმნის ელექტროდისაკენ მიმართულ აირის ნაკადს. ელექტროდთან მიმდებარე უბანი მოქმედებს, როგორც ელექტრომაგნიტური ტუმბო, იწოვს აირს გარემო ატმოსფეროდან და განდევნის მას გასაჭრელი ფურცლისაკენ. ძალური ზემოქმედება პროპორციულია დენის ძალის კვადრატისა.

პლაზმური რკალის ძალური ზემოქმედების კვლევებით დადგენილია, რომ ის ასევე დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს წნევაზე და ხარჯზე. შესაბამისად ხიწვის ზომებიც დამოკიდებული იქნება ამ პარამეტრებზე. თითოეული მათგანის ზრდა იწვევს რკალის ძალური ზემოქმედების ზრდასა და ხიწვის ზომების შემცირებას. ხიწვის სიგანე არ უნდა აღემატებოდეს 1,2 მმ-ს, სიმაღლე კი – 0,6 მმ-ს.

ხიწვის ზომებზე დიდ გავლენას ახდენს ჭრის სიჩქარე. გარკვეულ ოპტიმალურ მნიშვნელობაზე მეტად მცირე სიჩქარეებისათვის, ფურცლის ზედა და ქვედა სიბრტყეებში მიმდინარეობს ინტენსიური დნობა, გამდნარი ლითონის მასა დიდია და ძალური ზემოქმედების მიუხედავად, მისი დიდი ნაწილის გამოდევნება ვერ ხერხდება. სიჩქარის შემდგომის ზრდისას რკალიდან სითბოს გადაცემის დრო კლებულობს, მცირდება გამდნარი ლითონის რაოდენობაც და იზრდება მისი გამოდევნის ეფექტურობაც, შესაბამისად იკლებს ხიწვის ზომებიც. გარკვეული მნიშვნელობიდან დაწყებული, როდესაც ჭრის სიგანე ქვედა სიბრტყეში იმდენად მცირდება, რომ გამდნარი ლითონის გამოდევნისათვის ქმნის წინააღმდეგობას და იწყება ხიწვის ზომების ზრდა (სურ. 7.1). სიჩქარეების მნიშვნელობები დამოკიდებულია მასალასა და სისქეზე.



სურ. 7.1

ხიწვის ზომების დამოკიდებულება ჭრის სიჩქარეზე

1. b_1 - ხიწვის სიგანე, მმ; 2. b_2 - ხიწვის სიმაღლე, მმ

პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიების შემუშავებისას დიდი ყურადღება ექცევა გამოჭრილი დეტალების სიზუსტეს. არსებობს გადახრები გაბარიტული ზომებიდან, გადახრები ნაწიბურების მოცემული ფორმიდან. კერძო შემთხვევაში – გადახრა სწორ-

ხაზოვნებიდან, ნაწიბურების ერთმანეთის მიმართ მოცემული განლაგებიდან გადახრა, დეტალის ზედაპირის გადახრა სიბრტყიდან, დეტალი ზედაპირსა და ჭრის სიბრტყეს შორის პერპენდიკულარობის დარღვევა, შედუღებისათვის ნაწიბურების გამოყვანის ფორმიდან და ზომებიდან გადახრა. ნებისმიერი გადახრა უნდა შეესაბამებოდეს დასაშვებ ნორმებს. ცხრ. 7.1-ში მოყვანილია ზომებიდან გადახრის დასაშვები ნორმები.

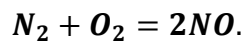
ცხრილი 7.1

ზომებიდან გადახრის დასაშვები ნორმები

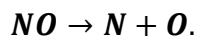
სიზუსტის კლასი	ფურცლის სისქე, მმ	დეტალის ნომინალური ზომებიდან გადახრის დასაშვები ნორმები, მმ			
		500-მდე	500-1500	1500-2500	2500-5000
1	5-30	± 1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	31-60				
2	5-30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
	31-60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
3	5-30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
	31-60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0

ნებისმიერი მეთოდით პლაზმური ჭრისას (ხელით, მექანიზირებული, პროგრამული მართვით) გათვალისწინებული უნდა იყოს ჭრის სიგანე, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია პლაზმური რკალის განივი კვეთის ზომაზე, ეს უკანაკნელი კი დამოკიდებულია საქშენის დიამეტრზე. როგორც წესი, ანგარიშების დროს აიღება დიამეტრზე ორჯერ მეტი. ზემოთ ვნახეთ, რომ ჭრის სიგანე, თავის მხრივ, გარდა საქშენის არხის დიამეტრისა, დამოკიდებულია ჭრის სიჩქარეზე, პლაზმაწარმოქმნელი გარემოს ხარჯსა და წნევაზე, მანძილზე პლაზმატრონიდან გასაქრელი ფურცლის ზედაპირამდე. ყველა ეს პარამეტრი კი ერთდროულად განსაზღვრავს რკალის შეკუმშვის ხარისხს. ამიტომ, დეტალების გამოჭრისას, მაქსიმალური სიზუსტის მისაღწევად გათვალისწინებულ უნდა იქნეს ყველა პარამეტრის გავლენა ჭრის სიგანეზე და პროცესის დროს ვუზრუნველყოთ მათი მნიშვნელობების სტაბილურობა. სიზუსტეზე ასევე მოქმედებს მაგიდა, რომელზეც თავსდება გასაქრელი ფურცელი. მაგიდა აუცილებლად მყარად უნდა იყოს დამაგრებული და ჰქონდეს იდეალურად ჰორიზონტალური ზედაპირი, რომელზეც გასაქრელი ფურცელი იქნება დაფიქსირებული სპეციალური სამარჯვების საშუალებით.

პლაზმური ჭრის პროცესი ხასიათდება პლაზმის ატმოსფეროდან ჭრის ზედაპირების აირგაჯერებით, რაც დაკავშირებულია მათ ხსნადობის კინეტიკასთან. ჰაერ-პლაზმური ჭრისას ზედაპირების გაჯერება ძირითადად ხდება აზოტითა და ჟანგბადით. განსაკუთრებით საშიშია აზოტი, რადგან პლაზმით გამოჭრილი დეტალე-ბის შემდგომი შედუღებისას, შენადული ნაკერი ხასიათდება ფორიანობით. აზოტი ზედაპირებში შეიძლება მოხვდეს ორი გზით: პლაზმაწარმომქმნელი გარემოდან და რკალში გარემო ატმოსფეროდან ჰაერის ინჟექციის გზით. რკალური განმუხტვის არეში მიმდინარეობს აზოტის დისოციაცია და იონიზაცია. ელექტრორკალური პროცესების დროს ლითონში აზოტის შეღწევის უნარი იზრდება ჟანგბადის არსებობის შემთხვევაში. ამ დროს შეიძლება აზოტი დაიჟანგოს შემდეგი რეაქციის სახით.



ამ ქიმიური რეაქციის წარმართვის შედეგად სისტემის ენტალპიის ცვლილება შეადგენს 90,37 კჯ/მოლ. ენდოთერმული ნაერთი NO ტემპერატურის შემცირებისას ან იჟანგება NO_2 ან კვლავ იშლება:



ჟანგბადის არსებობისას თხევად ლითონში აზოტის შეღწევადობის უნარის გაზრდა მეცნიერები ხსნიან სხვადასხვანაირად: NO -ს წარმოქმნით, N_2 -ის აქტივაციით რკალური განმუხტვის არეში O_2 -ის არსებობისას, დიდ ტემპერატურებზე FeO -ს არსებობისას რკინაში აზოტის ხსნადობის ზრდით, აზოტის ჟანგის კარგი ხსნადობით ლითონის თხევად აბაზანაში. ზოგიერთი მეცნიერის აზრით, თხევადი ლითონის მიერ აზოტის შთანთქმა მიმდინარეობს მოლეკულურ მდგომარეობაში. ჰაერ-პლაზმური ჭრით მიღებული ზედაპირების სპექტრულ-ემისიური მეთოდით შესწავლისას დადგინეს, რომ აზოტის მაქსიმალური რაოდენობა 50-ჯერ მეტია ვიდრე საწყის ლითონში და თითქმის 10-ჯერ აღემატება ფოლადში აზოტის ხსნადობის ზღვრულ მნიშვნელობას. როგორც სჩანს, ფოლადების ჰაერ-პლაზმური ჭრისას იქმნება ისეთი პირობები, რომ აზოტით გაჯერება მიმდინარეობს ყველა შესაძლო გზით. ამ პროცესებში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს პლაზმური რკალის ატმოსფეროს დისოციაციისას მიმდინარე იონურ-მოლეკულური რეაქციები ელექტრონ-აღზნებული იონების მონაწილეობით.

ატმოსფერულ წნევაზე თხევადი რკინა აზოტს შთანთქავს სუსტად, ხოლო გამყარებისას ნაწილობრივ გამოიყოფა. აზოტი რკინასთან ქმნის შემდეგ ნაერთებს:

FeN (11,2 % N_2); Fe_4N (6% N); $Fe_{16}N_2$. ნიტრიდი Fe_2N მიიღება $450^{\circ}C$ ტემპერატურაზე. ტემპერატურის მომატებისას ის იშლება და წარმოიქმნება ნიტრიდი Fe_4N . თუ $550^{\circ}C$ -ზე ზემოთ ეს ნიტრიდიც იშლება. სუფთა რკინაში აზოტის ხსნადობა $1600^{\circ}C$ -ზე შეადგენს 0,044%-ს. აზოტის გავლენით γ – ფაზის არსებობის უზანი მცირე ტემპერატურებისაკენ იწევს და პერლიტური წერტილი აღმოჩნდება $585^{\circ}C$ ტემპერატურაზე. აზოტის მაქსიმალური ხსნადობა α – რკინაში შეადგენს დაახლოებით 0,1% და დამოკიდებულია მალეგირებელ ელემენტებზე.

ნახშირბადი აზოტის ხსნადობას რკინაში ამცირებს. აუსტენიტურ მდგომარეობაში ნახშირბადის გავლენა აზოტის ხსნადობაზე იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად. აზოტის ხსნადობის შემცირებაზე გარკვეულ გავლენას ასევე ახდენენ **Si, Ni, Cu**.

Mn, Cr, V, Al წარმოქმნს მდგრად ნიტრიდებს და ზრდის აზოტის ხსნადობას. ეს კომპონენტები ახდენს გავლენას აზოტის დაბმაზე ფოლადში, და ამასთან ერთად, შენადულ ნაკერში ამცირებს ფორიანობას. აზოტის შემცველობის შემცირებაზე კარგად მოქმედებს წყალბადი. წყალბადი უერთდება აზოტს და ამცირებს მის ადსორბციას ფოლადში.

ჭრის ზედაპირების აირგაჯერების შესამცირებლად, ერთ-ერთი ეფექტური გზაა პლაზმაწარმოქმნელ გარემოდ ჟანგვა-აღდგენითი პოტენციალის მქონე აირების გამოყენება. ამ მიზნით, იდეალურია ისეთი აირების გამოყენება, რომლებიც შეიცავს წყალბადს. პრაქტიკაში გამოიყენებოდა აზოტისა და წყალბადის ნარევი, ჰაერისა და ნახშირწყლების ნარევი, წყალი და სხვა. შემუშავებული იყო ჰაერ-პლაზმური ჭრის ისეთი ტექნოლოგიები, სადაც შეკუმშული რკალის გარშემო მიეწოდებოდა წყლის ან წყლის ორთქლის ფარდა, რომლებიც რკალის არეში მოხვედრისას დისოცირდებოდა ჟანგბადად და წყალბადად. ასევე შემუშავდა ტექნოლოგიები, სადაც პლაზმაწარმოქმნელ გარემოდ გამოიყენება წყლის ორთქლი. ყველა შემთხვევაში ზედაპირების აირგაჯერების შემცირებაზე გავლენას ახდენს წყალბადი.

უფრო დაწვრილებით განვიხილოთ აირგაჯერებაზე წყალბადის ზემოქმედების მექანიზმი. ფოლადების პლაზმური ჭრისას ლითონსა და აირებს შორის მიმდინარეობს ჟანგვა-აღდგენითი რეაქციები, რომელთა დასრულების ხარისხი განისაზღვრება ურთიერთმოქმედ ნივთიერებათა აგრეგატული მდგომარეობით. ასეთ რეაქციებს მიეკუთვნება

-აირფაზური. ჭრის არეში დიდი ტემპერატურა ქმნის ურთიერთქმედების ისეთ სპეციფიკურ პირობებს, რომელიც მაღალი ენერგიების ქიმიისთვის არის დამახასიათებელი. ამიტომ, ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის დიდი სიჩქარეები სავსებით საკმარისია ჟანგვა-აღდგენითი პროცესების სრული დასრულებისათვის.

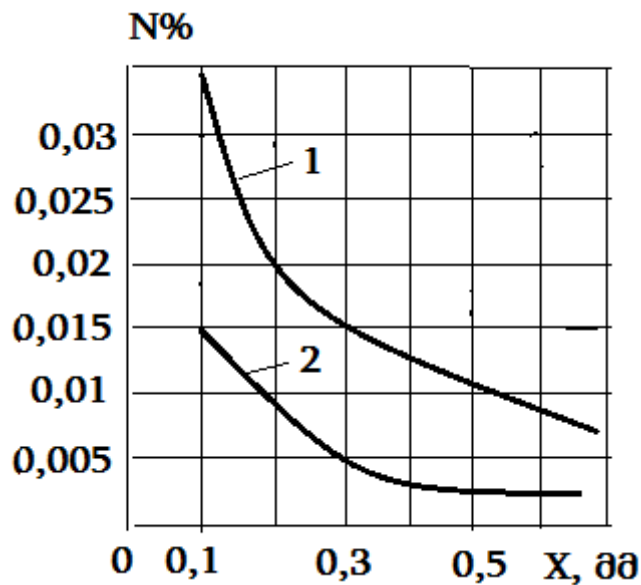
მაგალითად, წყლის ორთქლის გარემოში პლაზმური ჭრისას, ჭრის არეში ჟანგვის რეაქციის შედეგად მიიღება ჟანგეულთა სისტემა $FeO - Fe_3O_4$, რომელთა ნაწილი ორთქლის ნაკადით განიდევენება, ხოლო ნაწილი კონდენსირდება შედარებით ცივი ჭრის ზედაპირზე. ჟანგეულთა სისტემა განაპირობებს ზედაპირების კარგ დასველებას. რკინის ჟანგეულები მცირე ფაზათაშორის დაჭიმულობისა და მაღალი სიბლანტის წყალობით სწრაფად განიღვრება, ილექება ზედაპირზე და უკეთებს ევრანირებას. სხვა სიტყვებით, რომ ვთქვათ, ასრულებს ფლუსის როლს. ეს ნადები იცავს ზედაპირს გარემო ატმოსფეროდან აირების გაჯერებისა და ლითონისაგან მისი შემადგენელი კომპონენტების ამოწვისაგან. მეორე მხრივ, წყლის ორთქლის დისოციაციისას წარმოქმნილი წყალბადი უერთდება აზოტს და ამცირებს მის ადსორბციას ჭრის ზედაპირში. დისოციაციისას წარმოქმნილი ჰიდროქსილი წარმოადგენს მაღალმდგრად ნაერთს და არ იხსნება ლითონში. წყალბადი, როგორც მსუბუქი ელემენტი ხასიათდება მაღალი ძვრადობით და გამჭოლუნარიანობით. პლაზმური რკალის ზემოქმედებისას ლითონზე მისი ზედაპირის დეფექტური უბნები (დისლოკაციები, ბზარები და სხვ.) ივსება წყალბადის ატომებით და ეწინააღმდეგება ნაკლებად ძვრადი აზოტის ატომების შეღწევას ლითონში. ლითონის გაცივებისას, კვლავ მაღალი ძვრადობის გამო, მიმდინარეობს წყალბადის ატომების დესორბცია ზედაპირიდან.

წყალბადი ჭრის ზედაპირს იცავს ჟანგბადის გაჯერებისაგანაც, რომლის წყალობით ხდება ლითონის ჟანგვის თავიდან აცილება. წყალბადის ნაერთი ჟანგბადთან არ იხსნება ფოლადში, ლითონს აღადგენს ოქსიდებისაგან და ეწინააღმდეგება ნიტრიდების წარმოქმნას.

ჭრის ზედაპირების აირგაჯერება დამოკიდებულია გასაჭრელი ფურცლის სისქეზე. რაც მეტია სისქე, მით უფრო ნაკლებია აირგაჯერების სიღრმე. გასაჭრელი ფურცლის სისქის გაზრდისას, ჭრის სიჩქარე კლებულობს, შესაბამისად სიგრძის ერთეულზე ლითონს მიეწოდება მეტი სითბოს რაოდენობა და ჭრის ზედაპირების გაცივების

სიჩქარე მცირდება. ამიტომ, ლითონის ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ყოფნა მაღალ ტემპერატურაზე ხელს უწყობს აზოტის გამოყოფას ზედაპირული შრეებიდან.

მართალია, წყალბადი დადებით გავლენას ახდენს ჭრის ზედაპირების აირგაჯერებაზე, მაგრამ წყალბადის ატომები დიდ ტემპერატურებზე კარგად იხსნება თხევად ლითონში, სადაც იწვევს ფორებისა და ბზარების წარმოქმნას. დიდი ტემპერატურიდან ლითონის გაცივების პროცესში მიმდინარეობს წყალბადის ატომების (მაღალი ძვრადობის გამო) დესორბცია ჭრის ზედაპირებიდან. ამავე დროს იქმნება პირობები იმ რეაქციებისა, რომლის დროსაც წარმოიქმნება ჰიდროქსილი, რომელიც არ იხსნება ლითონში:



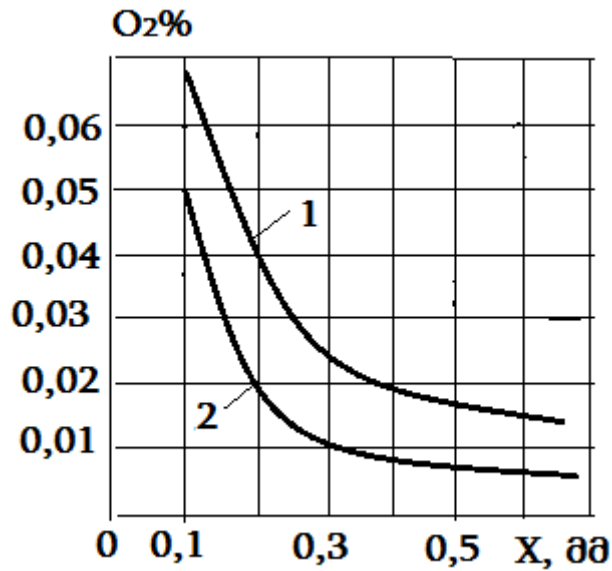
სურ. 7.2

აზოტის განაწილება ჭრის ზედაპირიდან სიღრმეში

1. ჰაერ-პლაზმური ჭრა; 2. პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის გარემოში.

მაგალითისათვის, სურ. 7.2, სურ. 7.3 და სურ. 7.4-ზე მოყვანილია ექსპერიმენტით მიღებული შედეგები აზოტის, ჟანგბადისა და წყალბადის პროცენტული შემცველობის განაწილებისა ჭრის ზედაპირიდან სიღრმის მიხედვით.

სურ. 7.2-ზე მოყვანილი გრაფიკიდან ჩანს, რომ აზოტის შემცველობა წყლის ორთქლი გარემოში ჰაერ-პლაზმურ ჭრასთან შედარებით 2-3 ჯერ არის შემცირებული, ჟანგბადის შემცველობა კი – 1,5-1,6 ჯერ.

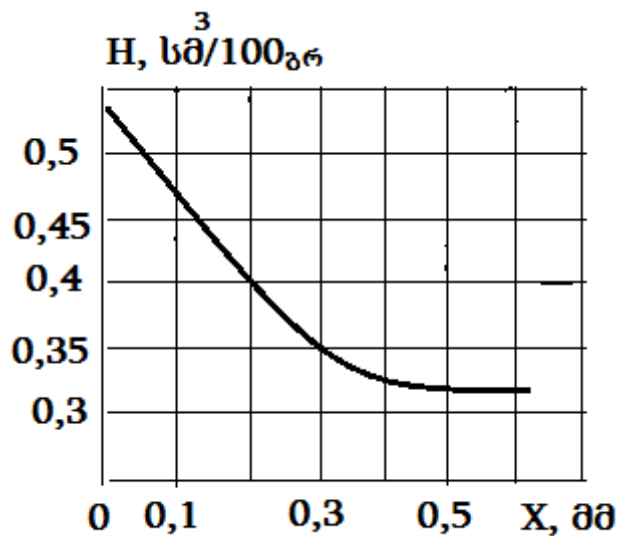


სურ. 7.3

ჟანგბადის განაწილება ჭრის ზედაპირიდან სიღრმეში

1. ჰაერ-პლაზმური ჭრა; 2. პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის გარემოში.

წყლის ორთქლის გარემოში პლაზმური ჭრისას წყალბადის შემცველობა ჭრის ზედაპირიდან სიღრმეში მინიმალურია და შეესაბამება დასაშვებ ნორმებს.



სურ. 7.4

წყალბადის განაწილება ჭრის ზედაპირიდან სიღრმეში

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, წყალბადშემცველი პლაზმაწარმოქმნელ გარემოში ჟანგვა-აღდგენითი რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი ჟანგეულები ჭრის ზედაპირზე დალექვის შემდეგ წარმოქმნის დამცავ ეკრანს, რომელიც ლითონს ასევე იცავს ქიმიური ელემენტების ამოწვისაგან. ცხრ. 7.2-ში მოყვანილია ჭრის ზედაპირის ქიმიური შემად-

გენლობა, როგორც ჰაერ-პლაზმური ჭრისას, ისე წყლის ორთქლის შემთხვევაში და შედარებულია ლითონის საკუთარ ქიმიურ შემადგენლობასთან. როგორც ცხრილიდან ვხედავთ, წყლის ორთქლის შემთხვევაში ქიმიური შემადგენლობა თითქმის არ არის შეცვლილი.

ცხრილი 7.2

ჭრის ზედაპირის ქიმიური შემადგენლობა პლაზმური ჭრის შემდეგ

ქიმიური ელემენტები	გასაჭრელი ფურცელი	ჰაერ-პლაზმური ჭრა	პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის გარემოში
C	0,260	0,40	0,280
SI	0,130	0,09	0,120
Mn	0,460	0,35	0,420
P	0,017	0,01	0,017
S	0,037	0,29	0,036
Al	0,017	0,012	0,015

8. პლაზმური რკალის გავლენა ჭრის ზედაპირთან მიმდებარე უბნის

ლითონზე

თერმული გავლენის არე. მისი შემადგენელი უბნები. დენის ძალის, სიჩქარის, გასაჭრელი ლითონის სისქისა და შემადგენლობის გავლენა თგა-ის ზომებზე.

პლაზმაწარმოქმნელი გარემოს გავლენა თგა-ის თვისებებზე

ლითონების პლაზმური ჭრისას სითბოს წყაროს სწრაფი გადაადგილებისას ჭრის ზედაპირის მცირე უბანზე მიმდინარეობს ტემპერატურის მყისიერი და ნახტომისებური ცვლილება – ლითონის საწყისი ტემპერატურიდან დნობის ტემპერატურამდე. ცვლილების შედეგად ლითონის ნაწიბურებში მიმდინარეობს მეტალურგიული პროცესები ქიმიური შემადგენლობის, სტრუქტურული მდგენელებისა და მექანიკური მახასიათებლების ცვლილების თანხლებით. ჭრის ნაწიბურებიდან 0,1 მმ სიღრმემდე ლითონის გახურებისა და გაცივების სიჩქარე აღწევს საკმაოდ დიდ მნიშვნელობებს 1000-2000°C. ამ უბანს ეწოდება თერმული გავლენის არე (თგა). თგა შედგება სამი უბნისაგან: სხმული უბანი, გამსხვილებული მარცვლის უბანი და სრული და არასრული გადაკრისტალების უბანი. თგა-ს ზომები დამოკიდებულია გასაჭრელი ფურცლის გვარობასა და სისქეზე, რკალის დენის ძალასა და ჭრის სიჩქარეზე. ლითონის ნაწიბურებში გადაკრისტალება ფაზური შემადგენლობის ცვლილებით იწვევს ძაბვების აღძვრას, რომლებსაც შეუძლიათ თგა-ს ზედაპირულ შრეებში წარმოქმნას ბზარები.

ლითონის ქიმიური შემადგენლობის ცვლილებაზე დიდ გავლენას ახდენს პლაზმაწარმოქმნელი გარემო, რაც გამოიხატება ამა თუ იმ ელემენტის პროცენტული შემცველობის ცვლილებით. ადგილი აქვს ჭრის ზედაპირების აირგაჯერებას, თვისებების ცვლილებას, რომლებიც უარყოფით გავლენას ახდენს გამოჭრილი დეტალების შედუღებადობაზე. ამ ტიპის ცვლილებები ძირითადად მიმდინარეობს სხმულ უბანში. დიდი სიჩქარის აირის ნაკადის ურთიერთქმედებისას ჭრის ნაწიბურებთან სხმული უბნის ლითონი გადაადგილდება ნაწიბურების ზედაპირზე, რის გამოც მისი სიღრმე არათანაბარია. ჭრის ზედაპირზე ასევე წარმოიქმნება მიკრორელიეფი ვერტიკალური და ფურცლის ზედაპირისადმი დახრილი ბურცობებით.

ჭრის ნაწიბურებზე დიდი ტემპერატურის მოქმედების დროის ხანგრძლივობაზე არის დამოკიდებული თგა-ს ზომები, სტრუქტურული ცვლილების შესაძლებლობა, მაგალითად, როგორცაა ქრომნიკელიან უჟანგავ ფოლადებში აუსტენიტის მარცვლების

საზღვარზე კარბიდების ამოგდება, რაც ამცირებს ფოლადის კოროზიამდეგობას. თგა-ს ზომები ასევე დამოკიდებულია ლითონის შემადგენლობასა და სისქეზე. მაგალითად, 50 მმ სისქის უჟანგავი ფოლადის X18H10T თგა-ის სიღრმე შეადგენს 1,5-2 მმ-ს, 20 მმ სისქის იგივე ფოლადისათვის კი, არ აღემატება 0,2 მმ. სისქის შემცირებისას იზრდება ჭრის სიჩქარე, რაც თავისთავად იწვევს ნაწიბურებში გადაცემული სითბოს რაოდენობის შემცირებას და შესაბამისად მცირდება თგა-ის სიღრმეც.

დაბალნახშირბადიან ფოლადებსა და ალუმინის შენადნობებში სხმული უბნის სიღრმე შეადგენს თგა-ის სიღრმის 20 – 30%-ს და მეტს. დაბალნახშირბადიან ფოლადებში სხმული უბნის შემდეგ გვაქვს გამსხვილებული მარცვლის და სრული და არასრული გადაკრისტალების უბანები, რომლებსაც მოყვება ფოლადის საწყისი სტრუქტურა. გამსხვილებული მარცვლის უბანი ასევე შეიმჩნევა ალუმინიან შენადნობებსა და უჟანგავ ფოლადებში. აუსტენიტურ უჟანგავ ფოლადებში ამ უბნის ზომები შეზღუდულია და შეადგენს 5 – 30 %, დანარჩენი კი უკავია სხმულ უბანს.

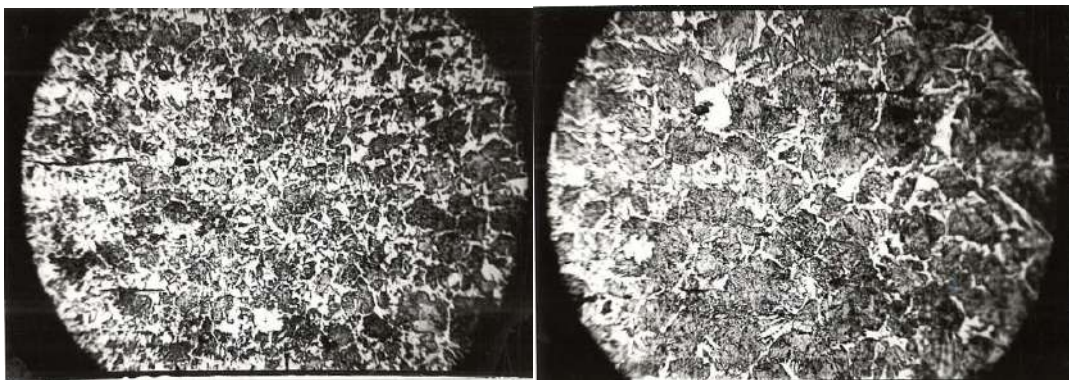
ფოლადების პლაზმური ჭრისას ნაწიბურებზე წარმოქმნილი თხევადი ლითონი პლაზმის ნაკადით განიდევენება ინტენსიურად მაღალი თხიერდენადობის გამო, მაგრამ არასრულად. დარჩენილი ნაწილი კი კრისტალიზირდება თგა-ს სხმული უბნის სახით. ეს უბანი ნაწიბურის ზედა წიბოდან დაწყებული იზრდება სიღრმის მიმართულებით. სიჩქარის გაზრდით იზრდება სხმული უბნის სიღრმე, ხოლო თგა-ს ზომები მცირდება. სხმულ უბანში მიმდინარეობს მიკროსტრუქტურის არასასურველი გარდაქმნები და ხასიათდება მაღალი სისალით. მაღალი სისალე აიხსნება ამ უბნის დანახშირბადიანებით და მისი გაჯერებით აზოტით, რომლის მექანიზმაც საუბარი იყო წინა ლექციაში.

განვიხილოთ სხმული უბნის სიღრმეზე პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს ხარჯის, პლაზმური რკალის ღია უბნის სიგრძის გავლენა სხმული უბნის სიღრმეზე. რაც მეტია რკალის ღია უბნის სიგრძე, მით უფრო სუსტდება პლაზმური ნაკადის მოქმედება თხევად ლითონზე, რაც ამცირებს ნაწიბურებიდან მისი განდევნის ინტენსიურობას, შესაბამისად მეტი თხევადი ლითონი კრისტალიზირდება ნაწიბურებზე და იზრდება სხმული უბანი. აირის ხარჯის მომატებისას სხმული უბნის სისქე იწყებს შემცირებას, რაც დაკავშირებულია მაღალტემპერატურული აირის ნაკადის თხევად ლითონზე მექანიკური ზემოქმედების გაძლიერებით. გარკვეული მნიშვნელობიდან დაწყებული, ხარჯის გაზრდისას სხმული უბანის ზომები კვლავ იწყებს შემცირებას, რაც შეიძლება

აიხსნას თხევადი ლითონის გაცივებით გაზრდილი აირის ნაკადით, რის გამოც იზრდება მისი სიბლანტე.

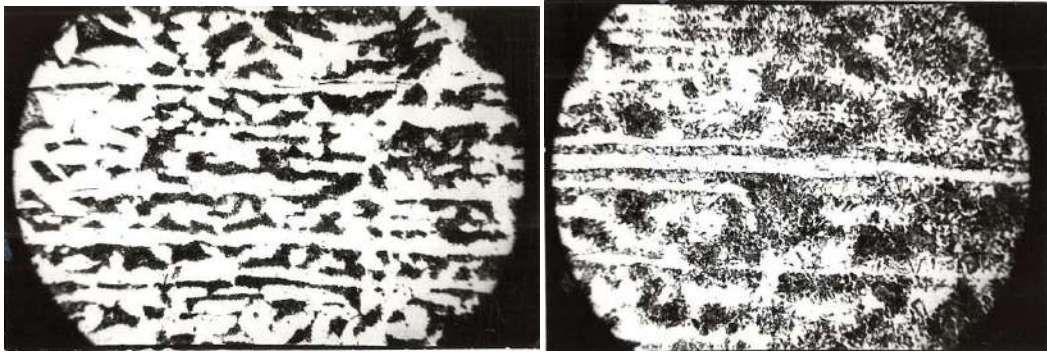
თვა-სა და მის უბნებზე შესამჩნევ გავლენას ახდენს პლაზმაწარმომამნელი აირის შემადგენლობა. ჰაერ-პლაზმური ჭრისას მიმდინარეობს ჭრის ზედაპირული შრეების ინტენსიური გაჯერება აზოტით, ამიტომ სხმული უბანი შეადგენს თვა-ის ძირითად ნაწილს. როდესაც პლაზმაწარმომქმნელ აირად გამოყენებულია წყლის ორთქლი სურათი იცვლება. როგორც ადრე აღვნიშნეთ წყალბადის არსებობა განაპირობებს აზოტის ადსორბციას ჭრის ზედაპირიდან, რაც ცვლის სხმული უბნის ფაზურ შემადგენლობას. მეორე მხრივ წყლის ორთქლის შემთხვევაში დანახშირბადიანება მინიმუმამდე არის შემცირებული (ცხრ. 7.2). პლაზმური რკალის ენერგეტიკული მახასიათებლების შესწავლისას ვნახეთ, რომ რკალის დენის ძალის ტოლი მნიშვნელობებისათვის წყლის ორთქლის შემთხვევაში სრული თბური სიმძლავრე აღემატება შეკუმშული ჰაერის თბურ სიმძლავრეს, რაც გვადლევს მეტი სიჩქარით ჭრის შესაძლებლობას და სხმული უბნის სიღრმის შემცირებას.

სურ. 8.1-ზე ნაჩვენებია დაბალნახშირბადიანი ფოლადის ჰაერ-პლაზმური ჭრით მიღებული ზედაპირების მიკროსტრუქტურა, ხოლო სურ. 8.2 წყლის ორთქლის გარემოში.



სურ.8.1

დაბალნახშირბადიანი ფოლადების ჰაერ-პლაზმური ჭრით მიღებული ზედაპირების მიკროსტრუქტურა

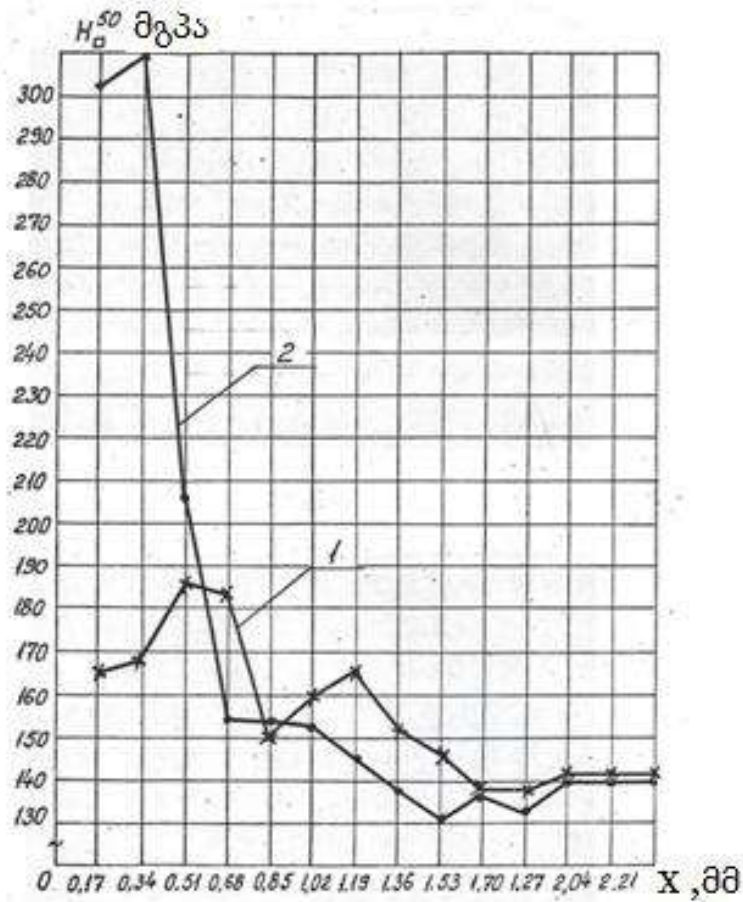


სურ.8.2

დაბალნახშირბადიანი ფოლადების წყლის ორთქლის გარემოში პლაზმური ჭრით მიღებული ზედაპირების მიკროსტრუქტურა

მიკროსტრუქტურების შედარებისას ვხედავთ, რომ ჰაერ-პლაზმური ჭრის შემთხვევაში არსებობს ნაკლებად შეწამლული უბანი ნათელი ზოლის სახით, რომელიც შეესაბამება სხმულ უბანს. წყლის ორთქლის შემთხვევაში ეს უბანი არ ჩანს. როგორც უკვე ვიცით, ამის მიზეზა აზოტის დესორბცია და სტრუქტურის ფაზური ცვლილება. სხმული უბნის შემდეგ ლითონის სტრუქტურა შედგება ტროსტიტისა და ფერიტის მცირე რაოდენობისაგან. პირველ შემთხვევაში მიკროსტრუქტურაში გამოვლენილია დენდრიტის-მაგვარი მარტენსიტი, რაც მიუთითებს დანახშირბადიანებაზე. მეორე შემთხვევაში დანახშირბადიანება მიმდინარეობს საკმაოდ მცირე ხარისხით. ნაწიბურიდან ძირითადი ლითონის სიღრმისაკენ ფერიტის რაოდენობა იზრდება. სტრუქტურა შედგება სორბიტისა და ტროსტოსორბიტისაგან თავისუფალი ფერიტის მცირე უბნებით. ამ შემთხვევაში მცირდება მიკროსისალე. შემდეგ სტრუქტურა შეესაბამება ფოლადის საკუთარ სტრუქტურას. მიკროსისალის მნიშვნელობით შესაძლებელია განვსაზღვროთ სხმული უბნის სიღრმე. სურ. 8.3-ზე მოცემულია მიკროსისალის განაწილების გრაფიკი. ფოლადის მიკროსისალე უშუალოდ ჭრის ნაწიბურთან ჰაერ-პლაზმური ჭრის შემთხვევაში უშუალოდ შეადგენს 3120 მგპა-ს, ხოლო წყლის ორთქლის გარემოში 1840 მგპა-ს. როგორც ვხედავთ, ფოლადის მიკროსისალე ძირითადი ფოლადის მიკროსისალემდე მცირდება ჭრის ზედაპირიდან 0,2 მმ, ხოლო შეკუმშული ჰაერის გარემოში 0,7 მმ-ზე, რაც შეესაბამება თგა-ს სიღრმეს. წყლის ორთქლის შემთხვევაში მაღალი მიკროსისალით უბანი გაჭიმულია 0,03 მმ-დე, ხოლო შეკუმშული ჰაერში – 0,08 მმ-ს. ამგვარად,

პლაზმაწარმოქმნელ გარემოდ წყლის ორთქლის გამოყენებისას თვა-ს სიღრმე 3-3,5 ჯერ მცირდება, ხოლო სხმული უბნის 2,6-3 ჯერ.



სურ. 8.3

მიკროსისალის განაწილება

1. წყლის ორთქლი;
2. შეკუმშული ჰაერი.

არანაკლებ ინტერესს წარმოადგენს პლაზმური ჭრისას სპილენძის ზედაპირზე მიმდინარე პროცესები. პრაქტიკამ გვაჩვენა, რომ სპილენძის ზედაპირი საკმაოდ სუფთაა. ნაწიბურის ქვედა წიბოზე შეიმჩნევა ხიწვები თხელი ლითონური აფსკის სახით, რომელიც ადვილად შორდება ფურცელს. მიხედვად ამისა, ჭრის ზედაპირზე, განსაკუთრებით კი ქვედა ნაწილში, შეიძლება მოხდეს მის გაჯერება ჟანგბადით და ხასიათდებოდეს წვრილი ფორიანობით და წიღური ჩანართებით. ჟანგბადით გაჯერება დამოკიდებულია პლაზმური ჭრის რეჟიმებზე. მაგალითად, 20 მმ სისქის M1 სპილენძის ჭრისას 300 ა დენზე სიჩქარით 0,015 მ/წმ შეცვლილი ზედაპირული შრის სიღრმე ქვედა ნაწილში შეადგენდა 1,2 მმ-ს. ზედა ნაწილში კი – 0,016 მმ-ს. შემდეგ

მდებარეობდა მსხვილმარცვლოვანი უბანი, რომლის სიღრმე ქვედა ნაწილში შეადგენდა 1,8 მმ-ს, ხოლო ზედა ნაწილში კი – 0,9 მმ-ს.

პლაზმური ჭრის პლაზმატრონებში აირი მიეწოდება ტანგენციალურად, რომელიც იწვევს აირის ნაკადის გაგრიგალებას. ამის გამო პლაზმური რკალის სვეტი ჭრის მარჯვენა და მარცხენა ნაწიბურებზე ახდენს სხვადასხვა თერმულ გავლენას. აირის მარჯვენა გაგრიგალებისას ანოდური ლაქა გადაადგილდება მარჯვნივ და მარჯვენა ნაწიბურს გადაეცემა მეტი სითბო, ამიტომ თვა განსხვავებული უნდა იყოს მარჯვენა და მარცხენა ნაწიბურებზე. კერძოდ კი, მარჯვენაზე მეტი უნდა იყოს თვა-ს სიღრმე. ცდებით დადგინდა, რომ სხმული უბანი მარჯვენა ნაწიბურზე გაცილებით დიდია, ვიდრე მარცხენაზე. მაგალითად, 8 მმ სისქის ფოლადის ჰაერ-პლაზმური ჭრისას მარჯვენა ნაწიბურზე თვა-ს ზომა მარჯვენა ნაწიბურზე 15%-ით მეტია, ვიდრე მარცხენაზე.

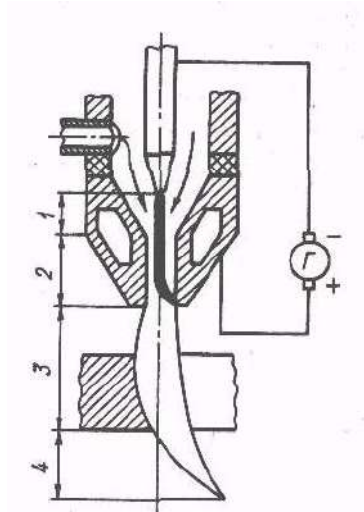
ჭრის ზედაპირების ხორკლიანობის ერთ-ერთი მიზეზი არის თვა-ს სხმული უბნის წარმოქმნა. რაც ნაკლებია მისი სიღრმე. მით ნაკლებია ხორკლიანობა. ამის ნათელი მაგალითია წინა ლექციის კურსში მოყვანილი ჰაერ-პლაზმური ჭრით და წყლის ორთქლის გარემოში პლაზმური ჭრით მიღებული დეტალების ზედაპირების ხორკლიანობის შედარების შედეგი, რომელიც დასტურდება ზემოთ მოყვანილი სხმული უბნების სიღრმეების რიცხვითი მონაცემებით.

ამგვარად, თერმული გავლენის არე, რომელიც წარმოიქმნება ჭრის ნაწიბურების ზედაპირულ შრეებში, უარყოფით გავლენას ახდენს ჭრის ხარისხზე და მისი ზომების შემცირება წარმოადგენს მნიშვნელოვან ამოცანას. როგორც ვნახეთ, გარდა ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრებისა, ერთ-ერთი ეფექტური გზაა ისეთი პლაზმაწარმოქმნელი გარემოს შერჩევა, რომელიც შეიცავს წყალბადს. ყველაზე იაფი, ადვილად-მისაწვდომი და შესანიშნავი თბოფიზიკური მახასიათებლების მქონეა წყლის ორთქლი.

9. არალითონური მასალების პლაზმური ჭრა

არალითონური მასალების ჭრის ირიბი მოქმედების პლაზმური რკალის ელექტრული და ენერგეტიკული მახასიათებლები. ზოგიერთი სახეობის არალითონური მასალების ჭრის ტექნოლოგიური თავისებურებანი

მრეწველობის მრავალ დარგში ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა ბუნებრივი წარმოშობის ქვები, ბაზალტი, მარმარილო და სხვა. ასევე ისეთი არალითონური მასალები, როგორცაა თერმოპლასტები, ფტოროპლასტები, პოლისტიროლი, პოლიეთილენისაგან ან მისი ბოჭკოსაგან დამზადებული დეტალები. არალითონური მასალები წარმოადგენს დიელექტრიკულ მასალებს, ერთმანეთისაგან განსხვავებული თბოფიზიკური თვისებებით. წარმოებაში ძირითადად გამოიყენება მათი მექანიკური დამუშავება. მაგალითად, ჭრა, რომელიც ხასიათდება დაბალი წარმადობით და დიდი ღირებულებით. მე-20 საუკუნის 70-80 წლებიდან დაიწყო არალითონური მასალების პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიების შემუშავება და დანერგვა წარმოებაში. ვინაიდან არალითონური მასალები წარმოადგენს დიელექტრიკებს და შეუძლებელია ელექტრული წრედის შეკვრა ელექტროდსა და გასაჭრელ დეტალს შორის, ამიტომ გამოიყენება ჰვოვა პლაზმატრონებმა დამოუკიდებელი პლაზმური რკალით. ამ ტიპის პლაზმატრონები ცნობილია, როგორც ირიბი მოქმედების პლაზმატრონები, სადაც ელექტრული წრედი შეკრულია უდნობ ელექტროდსა (კათოდი) და საქშენს (ანოდი) შორის. სურ. 9.1-ზე მოცემულია ასეთი რკალის სქემა. პლაზმური რკალის სვეტი მთლიანად განლაგებულია პლაზმატრონის შიგნით. იწყება ელექტროდზე და მთავრდება ანოდური ლაქით, რომელიც მიზნულია საქშენის არხის შიდა კედელზე. პლაზმაწარმომქმნელი აირის წნევით ზემოქმედების გამო, რკალის სვეტი მოძრაობს არხის გასწვრივ და ანოდური ლაქა გადაადგილდება არხის კედლის გასწვრივ საქშენის ქვედა კვეთამდე. ამიტომ პლაზმაწარმომქმნელი აირი და მისი პლაზმა მცირე მანძილზე კონტაქტირებენ რკალის სვეტთან და შემდეგ არსებობენ მისგან დამოუკიდებლად. ამ ტიპის რკალით ჭრას უწოდებენ „ჭრას პლაზმური ჭავლით“, რადგან ნამზადის გახურება ხორციელდება მხოლოდ პლაზმური ჭავლის საშუალებით. სურ. 9.1 გამოსახულ სქემაზე რკალის 1 და 2 უბანზე გამოდინების დიდი სიჩქარისა და პლაზმური რკალის საკუთარი ელექტრომაგნიტური ველის მოქმედებით რკალის სვეტი მაქსიმალურად არის შეკუმშული და იკავებს არხის განივი კვეთის მცირე ნაწილს.



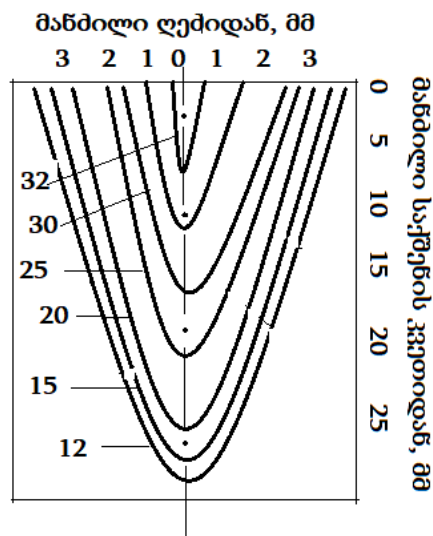
სურ.9.1.

ორიბი მოქმედების პლაზმური რკალის სქემა და მისი უბნები

1.დახურული უბანი; 2. შეკუმშული რკალის უბანი; 3. პლაზმური ჭავლი 4. პლაზმის ჩირაღდანი მე-3 უბნიდან იწყება დეიონიზაციისა და ატომების რეკომბინაციის პროცესები ენერჯის გამოთავისუფლებით. ამ უბნის სიგრძე დამოკიდებულია აირის გამოდინებისა და პროცესის სიჩქარეზე. ელექტრონები და იონების რეკომბინაცია ნეიტრალური ატომის წარმოქმნითა და ატომების რეკომბინაცია მოლეკულის წარმოქმნით მიმდინარეობს სწრაფად, რადგან აქტივაციის ენერჯია რაიმე კავშირების გაწყვეტაზე არ იხარჯება. რეკომბინაციისას გამოყოფილი ენერჯის არინების ინტენსიურობა საქშენის კედლიდან დაბალია, რადგან პლაზმასა და საქშენის არხის კედელს შორის შედარებით დაბალი თბოგამტარებლობის აირის ფენაა. აქედან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ ამ უბანზე რკალის სიგრძე შესამჩნევად დიდია. ანოდური ლაქის შემდეგ უბანზე აირის ტემპერატურა იწყებს გათანაბრებას, რადგან მაგნიტური ძალები აღარ მოქმედებს. ამის შედეგად, წინა უბნებზე შეკუმშული პლაზმური ნაკადი იწყებს გაფართოებას და ავსებს საქშენის კვეთის დიდ ნაწილს. რადგან ანოდური ლაქა მიბმულია საქშენზე, ამიტომ მოკიდების წერტილში მიმდინარეობს ინტენსიური სითბოცვლის პროცესი პლაზმურ რკალსა და საქშენის არხის კედელს შორის, რაც უარყოფითად მოქმედებს მისი მუშაობის რესურსზე. ისევე, როგორც პირდაპირი მოქმედების პლაზმატრონებში, აქაც მიზანშეწონილია პლაზმაწარმოქმნელი აირის ტანგენციალური მიწოდება, რაც ხელს უწყობს ანოდური ლაქის წრიულ მოძრაობს არხის კედელზე. ეს მოძრაობა ხელს უწყობს საქშენის თანაბარ გახურებას. იმისათვის, რომ მიღწეული იქნეს საქშენის არხიდან გამომავალი აირის ენტალპიის თანაბარი განაწილება, უნდა შესრულდეს

შემდეგი პირობა $v < Gd$, სადაც G – აირის ხარჯია, d – რკალის დიამეტრი, v – ცივი აირის გრძივი სიჩქარე.

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ ლითონის გახურება ხდება მხოლოდ პლაზმური ჭავლის საშუალებით. მისი ტემპერატურა და სიჩქარე საქმენის ქვედა კვეთიდან დაწყებული დასამუშავებელი ზედაპირისაკენ კლებულობს. ამიტომ მნიშვნელოვანია მანძილი პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირის შორის. სურ. 9.2-ზე მოყვანილია ტემპერატურის განაწილების მრუდები პლაზმურ ჭავლში, როგორც რადიალური მიმართულებით, ისე ღერძის გასწვრივ.



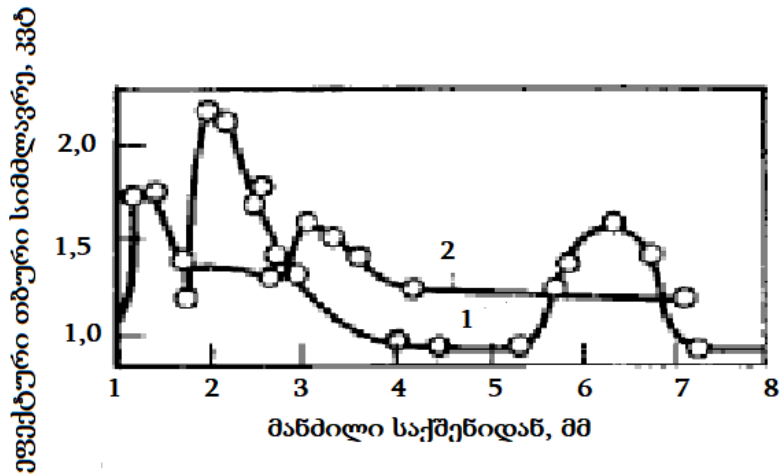
სურ. 9.2

**ირიბი მოქმედების (დამოუკიდებელი) რკალის ტემპერატურის განაწილება
(მრუდებთან ტემპერატურა 10^3K)**

ტემპერატურა მაქსიმალურია საქმენთან და იკლებს ღერძის გასწვრივ. ვინაიდან პლაზმური რკალის მიერ გამოყოფილი სრული სითბო თავმოყრილია საქმენის არხში, ამიტომ პირდაპირი მოქმედების პლაზმატრონებისაგან განსხვავებით ირიბი მოქმედების პლაზმატრონების მქვ საკმაოდ მცირეა და შეადგენს 30-40%-ს.

განვიხილოთ ეფექტური თბური სიმძლავრის განაწილება პლაზმური ჭავლის სიგრძის გასწვრივ. ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით, ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, რომ სრული თბური სიმძლავრის მომატებისას სიგრძის გასწვრივ ჩნდება ტალღისებური „პიკები“, რომლებიც შეესაბამება ტემპერატურის შემცირებისას მიმდინარე რეკომბინაციის საზღვრებს. ორჯერადი იონები გადადის ერთჯერადში, ხოლო ერთჯერადი იონები რეკომბინირებს და წარმოქმნის ნეიტრალურ ატომებს. სურ.

9.3-ზე მოყვანილია არგონის პლაზმური ჭავლის ეფექტური სიმძლავრის მრუდები საქშენიდან სხვადასხვა მანძილზე. რკალის დენის ძალა, რომლისთვისაც იქნა ჩატარებული ექსპერიმენტები, შეადგენდა 165 ა-ს.

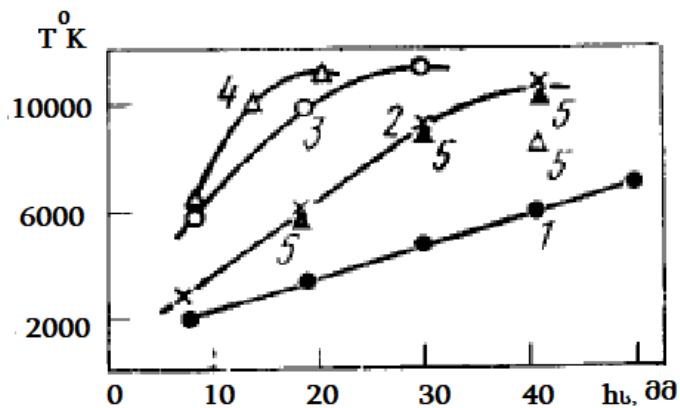


სურ. 9.3

ეფექტური თბური სიმძლავრის განაწილება სიგრძის მიხედვით.

1. $G=0,8$ ლ/წმ; 2. $G=0,5$ ლ/წმ.

სურ. 9.3-ზე მოცემულია დენის ძლისა და საქშენის არხის სიმაღლის გავლენა არგონის პლაზმური ჭავლის ტემპერატურაზე.



სურ. 9.3.

დენის ძლისა და საქშენის არხის სიმაღლის გავლენა არგონის პლაზმური ჭავლის ტემპერატურაზე.

1. $I=100$ ა; 2. $I=200$ ა; 3. $I=300$ ა; 4. $I=400$ ა; 5. $I=200$ ა თეორიული მონაცემები.

დენის ძალის გავლენა გასაგებია. იზრდება რკალის სრული თბური სიმძლავრე და შესაბამისად ეფექტური თბური სიმძლავრეცა და ტემპერატურაც. საქშენის არხის სიგრძეც დადებით გავლენას ახდენს. ირიბი მოქმედების რკალი, რომელიც განიცდის შუნტირებას არხის კედელზე, იჭიმება მაქსიმალურად, რაც, თავის მხრივ, იწვევს რკალის ძაბვის

ვარდნის ზრდას და შესაბამისად თბური სიმძლავრის მომატებას. რკალის შუნტირების სიგრძე დამოკიდებულია პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯსა და დენის ძალაზე.

პლაზმაწარმომქმნელი აირის ხარჯის შემცირებისას იცვლება მისი დინების ხასიათიც. გარკვეულ მნიშვნელობაზე ხდება გადასვლა ტურბულენტური დინებიდან ლამინარულში. ამიტომ პლაზმური ჭრის პროცესში ყურადღება უნდა მიექცეს აირის ხარჯს. ამასთან. ტურბულენტური დინებისას, რაც მეტია ხარჯი მით მეტია მქკ.

ლითონებისაგან განსხვავებით, მაგალითად, ბაზალტის ქიმიური შემადგენლობა და თბოფიზიკური პარამეტრები განსხვავდება მათი მოპოვების ადგილის მიხედვით. პლაზმურ ჭრას არ ექვემდებარება დიდი ძაბვების მქონე მასალები, მაგალითად, მინა, რომელიც მყიფე ნივთიერებაა და ტემპერატურის მყისიერი ცვლილებისას იმსხვრევა.

არ უნდა დაგვავიწყდეს, რომ ის მასალები, რომლებიც შეიცავს სილიკატებს, პლაზმური ჭრის შემდეგ ჭრის ზედაპირები იფარება მყიფე (მტვრევადი) შრით, რომლის მოშორება აუცილებელია. არის შემთხვევები, როდესაც ზედაპირული მყიფე შრის დატოვება მიზანშეწონილია, მაგალითად, შენობების საფასადე პანელების, ბლოკების და სხვ. წარმოქმნილი მყიფე სილიკატური ფენა ასრულებს დანარჩენი მასალის დაცვის როლს (წყლისაგან, მზის ფამოსხივებისაგან და სხვ.) და ზრდის ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას.

პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიური რეჟიმი დამოკიდებულია მასალის ქიმიურ შემადგენლობაზე, დნობის ტემპერატურაზე, კუთრ სითბოტევადობასა და დნობის კუთრ სითბოზე, სისქეზე. თითოეული კონკრეტული შემთხვევისათვის უნდა შემუშავდეს ტექნოლოგია. მაგალითად, ბეტონის ბლოკების თბოფიზიკური თვისებები განსხვავებულია და დამოკიდებულია იმ ცემენტის მარკაზე, რომლისგანაც ისინი მზადდება.

გასაჭრელი მასალის სისქე განსაზღვრავს მანძილს პლაზმატრონსა და ზედაპირს შორის. ერთი მხრივ, მანძილი შეიძლება იყოს მინიმუმადე დაყვანილი, რადგან ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება არ არსებობს, მაგრამ, მეორე მხრივ, გამოდნობისას ამოტყორცნილმა მასამ შეიძლება ამოავსოს საქმენის არხი, რაც შეასუსტებს პლაზმური ჭავლის ძალურ ზემოქმედებას, ან სრული ამოვსების შემთხვევაში დააზიანებს პლაზმატრონს. ჭრის პროცესის დაწყება რემონდირებულია ნამზადის კიდიდან. ხოლო თუ მოითხოვება ჭრის დაწყება სხვა წერტილიდან, მაშინ უმჯობესია, მაქსიმუმადე გავზარ-

დოთ მანძილი და დავიწყოთ ზედაპირის თანმიმდევრული ჩადნობა. ჩადნობის სიღრმის მიხედვით პლაზმატრონი მივუახლოვოთ ზედაპირს. სრული ჩადნობის შემდეგ გაგრძელდება ჭრა. ამ ხერხით თავიდან ავიცილებთ საქშენისა და პლაზმატრონის დაზიანებას.

ბოლო წლებში ხშირად მიმართავენ ბოჭკოვანი მასალისაგან დამზადებული მასალების პლაზმურ ჭრას, რადგან მათი მექანიკური დამუშავება დაკავშირებულია არაერთ პრობლემასთან. მაგალითისათვის განვიხილოთ სტუ-ში არამიდების ბოჭკოვანი მაღალმტკიცე კომპოზიტების პლაზმური ჭრის დამუშავებული ტექნოლოგია. კომპოზიტების მექანიკური ჭრის პროცესი ხასიათდება რიგი უარყოფითი მხარეებით, კერძოდ:

- დაბალი წარმადობა;
- მაღალი ღირებულება;
- წყობიდან ხშირად გამოდის საჭრისები;
- ადგილი აქვს ჭრის ზედაპირები სრლვევას, რაც ამცირებს მასალის სიმტკიცეს;
- ზიანდება ნამზადის შემომსაზღვრელი აფსკი, რაც იწვევს მასალის საერთო რღვევასა და თვისებების დაკარგვას.

არამიდების მასალისაგან დამზადებული ნამზადების პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიის შემუშავებისას, გასათვალისწინებელია შემდეგი მომენტები: 1. არამიდების ბოჭკოები იწვის ჟანგბადის გარემოში; 2. მისი გახურებისას $400-500^{\circ}\text{C}$ – ტემპერატურამდე და ამ მდგომარეობაში ხანგრძლივად ყოფნისას განიცდის დაშლას.

პირველი ფაქტი გავლენას ახდენდა პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს შერჩევაზე. არჩევანი შეჩერდა შეკუმშულ ჰაერზე. ლიტერატურული მონაცემების ანალიზმა და წინასწარ ჩატარებულმა ცდებმა აჩვენა, რომ ჰაერში ჟანგბადის არასაკმარისი კონცენტრაციის გამო ბოჭკოების წვის პროცესი მიმდინარეობს საკმაოდ მცირე დროის განმავლობაში და ალი სწრაფად ქრება.

უნდა აღინიშნოს, რომ მასალა მექანიკურ თვისებებს ინარჩუნებს და სტაბილურად მუშაობს 250°C -ზე. აქედან გამომდინარე ჭრის პროცესის დროს მასალა არ უნდა გადახურდეს ჭრის ზონიდან 1 სმ-ით დაშორებულ წერტილებში.

პირველ ეტაპზე აუცილებლად უნდა განისაზღვროს პლაზმური რკალის სიმძლავრე. მოცემულ შემთხვევაში ოპტიმალური სიმძლავრე შეადგენდა 10 კვტ-ს. კვე-

ბის წყაროს ელექტრული პარამეტრები მოცემულია ცხრ. 9.1-ში, კვების წყაროს პარამეტრებმა უნდა უზრუნველყოს პლაზმატრონის მუშაობის მაქსიმალური რესურსი. პლაზმური ჭრის პროცესი სრულდება ირიბი მოქმედების პლაზმური რკალით. ამისათვის შემუშავდა საქშენის განსაკუთრებული კონსტრუქცია, რომელშიც საქშენის არხის სიმაღლე 9-ჯერ აღემატება მის დიამეტრს. მოცემული ამოცანის გადაწყვეტისათვის არხის დიამეტრი შეადგენდა 2 მმ-ს, ხოლო სიმაღლე – 18 მმ-ს

ცხრილი 9.1.

კვების წყაროს ელექტრული პარამეტრები

პარამეტრები	სიდიდე
უქმი სვლის ძაბვა, ვ	360
ნომინალური მუშა ძაბვა, ვ	220
ნომინალური მუშა დენი	45

პლაზმური ჭრის ტექნოლოგიის შემუშავებისას აღმოჩნდა, რომ ადგილი ჰქონდა პლაზმური რკალის ალის შეტაცებას ჭრის არეში, რის გამოც იწყებოდა ბოჭკოების წვა. მიუხედავად იმისა, რომ ეს პროცესი გრძელდებოდა საკმაოდ მცირე დროის განმავლობაში, ის მაინც იწვევდა:

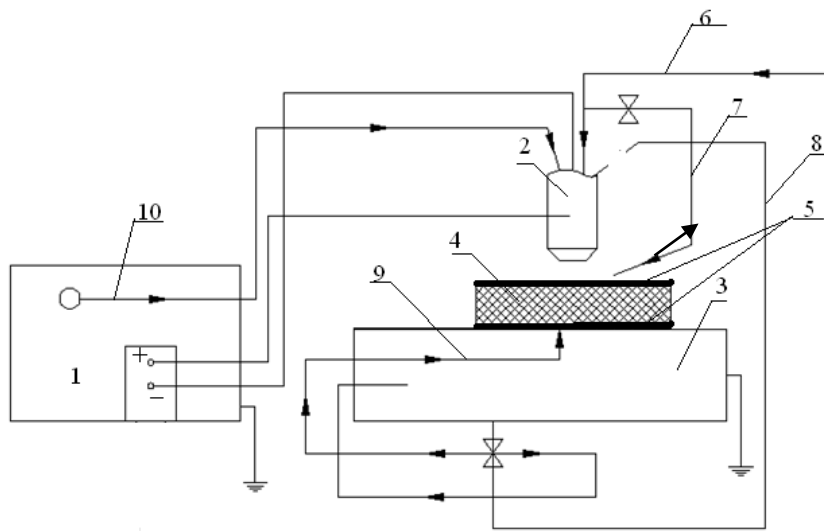
- ჭრის სიგანის გაფართოვებას;
- ჭრის ზედაპირების დაბალ ხარისხს;
- ჭრის ზედაპირზე ბოჭკოების რღვევას;
- მასალის ფენების ერთმანეთისაგან დაშორებას.

ფენების ერთმანეთისაგან დაშორების თავიდან აცილების მიზნით, გასაჭრელი მასალა მოთავსდა 6 მმ სისქის სპილენძის ფირფიტებს შორის და მექანიკური მომჭერებით დაფიქსირდა. ამასთან ერთად, ფირფიტებს, იმ მხრიდან, საიდანაც ეყრდნობა მასალას, უკეთდება ღარები, და იქ მიეწოდება წყალი. წყლის დანიშნულებაა ზედაპირების გაცივება, რაც სპილენძის ფირფიტებთან ერთად, გამორიცხავს არამიდების გადახურებას. ამასთან ერთად ჭრის არეში მიეწოდება წყლის ნაკადი, რომელმაც საერთოდ გამორიცხა წვის პროცესის დაწყება.

ექსპერიმენტებისას აღმოჩნდა, რომ ალის შეტაცებას ჭრის არეში ხდება ჭრის მაქსიმალური სიჩქარისას, როდესაც ალი გადახრილია პერპენდიკულარობიდან და

გასაჭრელი მასალის ზედაპირთან შეადგენს 30°-იან კუთხეს. დადგინდა, რომ თუ ჭრის სიჩქარე ისე იქნება შერჩეული, რომ ალმა ზედაპირთან შეადგინოს 90°, მაშინ შეტაცება არ მოხდება. ზემოთ ჩამოთვლილი ტექნიკური გადაწყვეტილებებისა და ტექნოლოგიური პირობების გამოყენებით შესრულებული ჭრის შედეგად, მიიღება დამაკმაყოფილებელი ხარისხის ჭრის ზედაპირები. ამასთან, დნობის პროცესის გამო ჭრის ზედაპირი წარმოადგენს მონოლითურ ზედაპირს, რომელიც ადვილად მუშავდება მექანიკური გზით და არ განიცდის რღვევას.

სურ. 9.4-ზე ნაჩვენებია შემუშავებული დანადგარის კომუნიკაციების შეერთებათა სქემა.



სურ. 9.4

დანადგარის კომუნიკაციების შეერთებათა სქემა.

1. კვების წყარო; 2. პლაზმატრონი; 3. აბაზანა; 4. გასაჭრელი მასალა; 5. სპილენძის ფირფიტები; 6. ქსელიდან პლაზმატრონის გამაცივებელი წყლის კომუნიკაცია;
7. ქსელიდან ჭრის არეში მიწოდებული წყლის ნაკადი. 8. და 9. პლაზმატრონიდან სპილენძის ფირფიტებში წყლის მიწოდების კომუნიკაცია; 10. პლაზმატრონში შეკუმშული ჰაერის მიწოდების კომუნიკაცია.

10. პლაზმური ჭრის ეკოლოგია

ჰაერ-პლაზმური ჭრისას გარემოში გამოყოფილი მავნე აირები და მათი ზემოქმედება მომსახურე პერსონალის ჯანმრთელობაზე. ულტრაიისფერი გამოსხივება. სითბური მოქმედება. ეკოლოგიური მაჩვენებლების შემცირების ტექნოლოგიური გზები

წარმოებაში ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესის დანერგვისას დიდი ყურადღება ექცევა ეკოლოგიურ მაჩვენებლებს და მათი შემცირების გზებს. ჰაერ-პლაზმური ჭრის პროცესი არ წარმოადგენს გამონაკლისს და ხასიათდება მუშაობის პროცესში გარემოში მავნე აირებისა და ლითონის მტვრის გამოყოფით. კერძოდ კი, ჭრის პროცესში წარმოიქმნება: აზოტის ჟანგი და ორჟანგი, ნახშირჟანგი, ოზონი, ლითონის ბოლი და მტვერი, ადგილი აქვს ულტრაიისფერ გამოსხივებას და სითბურ ზემოქმედებას მომსახურე პერსონალზე, პროცესი ხასიათდება ხმაურით და სხვ.

აზოტის ჟანგის (NO) და აზოტის ორჟანგის (NO_2) წარმოქმნას განაპირობებს რკალის ნათების ფიზიკურ-ქიმიური პირობები. ფილტვებისათვის და სისხლისათვის განსაკუთრებით საშიშია აზოტის ორჟანგი. აზოტის ჟანგი ეწინააღმდეგება აზოტის მოხვედრას სისხლში და მომენტალურად იწვევს მოწამვლას.

ოზონი (O_3) წარმოიქმნება ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებისას ჟანგბადის ატომებსა და მოლეკულებზე და იმყოფება შეკუმშულ პლაზმურ რკალში. ოზონი აღიზიანებს ლორწოვან გარსს და შეუძლია გამოიწვიოს ფილტვების მძიმე დაავადება.

ერთ-ერთ ყველაზე საშიშ აირს წარმოადგენს ნახშირჟანგი (CO), რომელსაც არ გააჩნია არც ფერი, არც სუნი და არც გემო. ის წარმოიქმნება ნახშირბადისა და ჟანგბადის მაღალ ტემპერატურებზე არასრული წვისას. თუ გარემო ატმოსფერო შეიცავს CO -ს 0,5 %-სა და მეტს, მაშინ ადამიანის სიკვდილი შეიძლება გამოწვეული იყოს რამდენიმე წუთში.

პლაზმური ჭრისას გამდნარი ლითონი, რომელიც ძირითადად შედგება ჟანგეულებისაგან, გამოყოფს შესამჩნევ ცისფერ ორთქლსა და ბოლს. მათი მოხვედრა ადამიანის სასუნთქ ორგანოებში იწვევს ფილტვებისა და სისხლის ძლიერ მოწამვლას.

პლაზმური ჭრისას მიმდინარეობს ლითონების აეროზოლების ინტენსიური გამოყოფა. მაღალი დისპერსიულობის გამო აეროზოლები ღრმად აღწევს სასუნთქ გზებსა და ფილტვებში.

მაღალტემპერატურული რკალი ყოველთვის ხასიათდება ულტრაიისფერი გამოს-

ხივებით. თუ მომსახურე პერსონალი არ არის დაცული, მაშინ გამოსხივებას შეუძლია გამოიწვიოს კანის დაზიანება გაწითლებიდან მაღალი ხარისხის დამწვრობამდე. ყველაზე მეტად ულტრაიისფერი გამოსხივება საშიშია თვალებისათვის. არასათანადო დაცვის შემთხვევაში შეუძლია გამოიწვიოს არამარტო დაზიანება, არამედ დაბრმავებაც. ამიტომ აუცილებელია მომსახურე პერსონალი აღჭურვილი იყოს დამცავი ნიღბებითა და სპეცტანსაცმლით.

სითბური ზემოქმედება ძლიერად შეიგრძნობა დანადგარის ხანგრძლივი მუშაობისას. ამიტომ აუცილებელია ჰაერის კონდიციონერების მაღალი ხარისხი.

ჭრის პროცესი ხასითდება ხმაურით, რომლის მიზეზი შეიძლება იყოს აირის გამოდინების დიდი სიჩქარე და პლაზმატრონის რკალური განმუხტვის საკანში მდგრადი ტალღების წარმოქმნა, გარემოს წნევისა და ტემპერატურის მყისიერი ცვლილებისას წარმოქმნილი დარტყმითი ტალღები. თუ ხმაურის დონე აღემატება დასაშვებ სანიტარულ ნორმებს, ხანგრძლივი მოქმედების შედეგად შეუძლია გამოიწვიოს ისეთი დაზიანებები, რომელსაც მივეყვართ დაყრუვებამდე. ამ დროს დაზიანებული ყურის ნერვული უჯრედები აღარ აღდგება. ამიტომ, რეკომენდირებულია გამოყენებული იყოს სპეციალური ყურზე გასაკეთებელი ხმის ჩამხშობები.

მრავალ წარმოებაში, მავნე ზემოქმედების შესამცირებლად ძირითადად გამოიყენება ძვირადღირებული, მძლავრი აირგამწოვი ვენტილაცია. ვენტილაცია შეიძლება იყოს საამქროსი, ან დამონტაჟებული უშუალოდ სამუშაო ადგილას. მაგრამ პრაქტიკამ აჩვენა, რომ მავნე აირების გამოყოფა მცირდება ნაწილობრივ. ამიტომ, მსოფლიოს მრავალ წამყვან ქვეყანაში დაიწყო ძიება ამ პრობლემის გადაწყვეტისა ტექნოლოგიური გზებით.

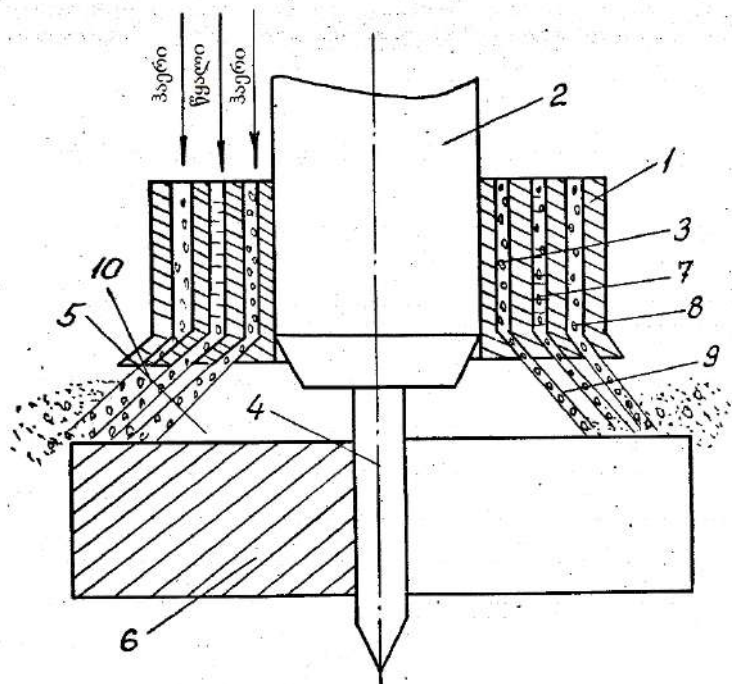
გასული საუკუნის 70-იან წლებში აშშ-ში ეკოლოგიური პრობლემების გადასაჭრელად დაიწყო წყლის გამოყენება. პლაზმატრონის საქმენში რადიალურად განლაგებული არხებიდან რკალში მიეწოდება წყლის მცირე რაოდენობა (1ლ/წთ-დან 2 ლ/წთ-მდე). წყლის ნაწილი ორთქლდება და დისოცირდება. ამ დროს წარმოქმნილი წყალბადი და ჟანგბადი დადებითად მოქმედებს რკალსა და ჭრის პროცესზე. წყლის ნაწილი კი აცივებს, რა რკალის პერიფერიულ უბნებს, ხელს უწყობს მის შეკუმშვას. ამ დროს რკალი პრაქტიკულად ანთია საკანში, რომლის კედლებს ქმნის წყალი და ეკრანირებულია გარემოდან. ჭრის დროს წარმოქმნილი მავნე აირები და ლითონის

მტვერი ნაწილობრივ იხსნება წყალში, რომელიც ჩაედინება წყლით სავსე აბაზანაში. ასევე შემუშავებული იყო მეთოდი, რომლის დროსაც პლაზმური რკალის ღია ნაწილი ლითონის ზედაპირამდე მოთავსებულია წყალში. ამ შემთხვევაში მცირდება პლაზმატრონის მუშაობის საიმედოობა. შედარებით სრულყოფილია მეთოდი, როდესაც გასაჭრელი ფურცელიც და პლაზმატრონიც ჩადირულია წყალში. ეკოლოგია უმჯობესდება, მაგრამ რთულდება პლაზმური რკალის აღზნება და უარესდება შრომის უსაფრთხოების პირობები.

გერმანიაში შემუშავდა დანადგარი, სადაც პლაზმური რკალის გარშემო იქმნება ორმაგი დამცავი ფარდა, რომელთაგან პირველი მონაწილეობს რკალის შეკუმშვაში. მაგრამ ამ მეთოდმა გამოყენება ვერ ჰპოვა, რადგან დაიწია რკალის სტაბილიზაციის პირობებმა და დანადგარის მუშაობის საიმედოობამ.

ამ მიმართულებით საქართველოშიც მიმდინარეობდა კვლევითი სამუშაოები. შემუშავდა მეთოდი, სადაც საქშენში ტანგენციალურად განლაგებული არხების საშუალებით რკალში მიეწოდება წყლის ნაკადი. საქშენის არხში გაგრიგალეული წყლისა და ჰაერის ნარევის ნაკადი კუმშავს და ასტაბილიზირებს პლაზმურ რკალს. ამ მეთოდით გარკვეულწილად გაუმჯობესდა ჭრის ზედაპირების ხარისხი, მაგრამ არა ეკოლოგიური მაჩვენებლები.

შემუშავდა მეთოდი, სადაც რკალის ღია უბნის გარშემო, დამატებითი მოწყობილობის საშუალებით, იქმნება ორმაგი დამცავი წყლის ფარდა ან სამმაგი დამცავი ფარ-და, რომელთაგან ორი იქმნება შეკუმშული ჰაერით, ხოლო მათ შორის მიეწოდება წყალი (სურ. 10.1). 1 გარსაცმიდან მიეწოდება ჰაერის შიდა ნაკადი 3, რომელიც გარს ერტყმის რკალს. ამ ნაკადის გარშემო მიეწოდება წყლის ნაკადი 7, ამ უკანასკნელის გარშემო კი გარე ჰაერის ნაკადი 8. წყლის ნაკადი ჰაერის ნაკადებთან ერთად ქმნის დამატებით დამცავ ფენებს 9 და 10. შიდა არეში 5 წარმოქმნილი ლითონის და ჟანგეულების ორთქლი გაიწოვება ჰაერის ნაკადით 3, ნაწილობრივ ცივდება და წყლის 7 ნაკადის და გარე 8 ნაკადის საშუალებით ილექება ფურცლის ზედაპირზე. ნაკადის სიჩქარეები ისეა შერჩეული, რომ წყალი ქუცმაცდება და პრაქტიკულად არ ასველებს ლითონის ზედაპირს. კვლევებმა აჩვენეს, რომ ნებისმიერ ზემოთ მოყვანილ მეთოდებში ეკოლოგიური მაჩვენებლები უმჯობესდება, მაგრამ მიუხედავად ამისა მათ ფართო გამოყენება ვერ ჰპოვეს წარმოებაში. ამის მიზეზები კი არის შემდეგი:



სურ. 10.1

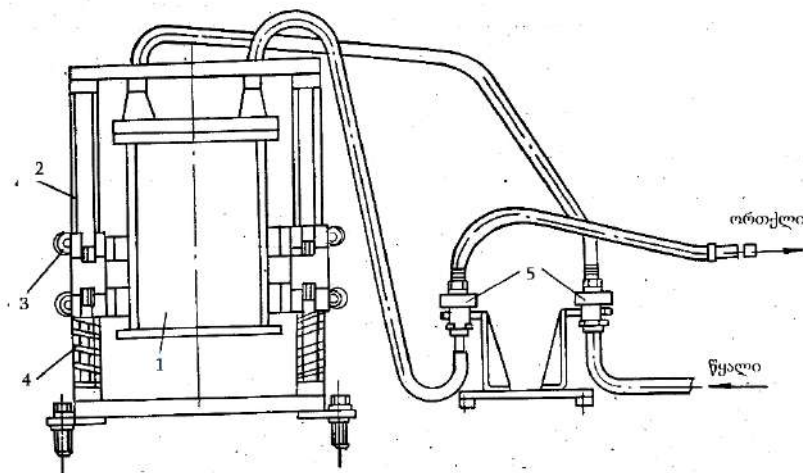
დამატებითი მოწყობილობის სქემა

1. დიდი დანახარჯები, რაც დაკავშირებულია წყლის აბაზანების დამზადებასთან. ამასთან, აბაზანის კონსტრუქცია საშუალებას უნდა იძლეოდეს მისი სწრაფად დაცლისა და შევსების საშუალებას. ეკოლოგიური მაჩვენებლების შემცირების ხარისხი დამოკიდებულია წყლის ხარჯზე, რაც თავის მხრივ ფინანსურ დანახარჯებთან არის დაკავშირებული;
2. შავი ფოლადის ჭრისას, ფურცლის წყლით დასველება შემდგომში იწვევს მის დაჟანგვას. გაჭრილი ნამზადის გასუფთავება ჟანგისაგან დაკავშირებულია დამატებით სამუშაოებთან;
3. წყლის ფარდისა და აბაზანების გამოყენება ამკაცრებს შრომის უსაფრთხოების მოთხოვნებს.

ზემოთ მოყვანილი ნაკლოვანებების გათვალისწინებით და იმისათვის, რომ წყლის გამოყენების უპირატესობანი შენარჩუნებულიყო, პლაზმური რკალის გარშემო დამცავ ფარდად გამოყენებული იქნა გადახურებული წყლის ორთქლი. მისი გამოყენება, პირველ რიგში, განპირობებულია იმით, რომ არ მოითხოვება გასაჭრელი ფურცლის ქვეშ დამატებითი წყლის ავზის დამონტაჟება, მეორე ის, რომ მისი გამოყენება

საკმაოდ ეფექტურია და მოითხოვს მინიმალური რაოდენობით წყალს. ცნობილია, რომ 1 სმ³ წყლიდან მიიღება 1700 სმ³ წყლის ორთქლი. მაგალითად 60 ლ/წთ წყლის ორთქლის ხარჯის მისაღებად საჭირო წყლის ხარჯი შეადგენს 0,036 ლ/წთ.-ში. ასევე გამორიცხულია ფურცლების დასველება, რადგან ჭრის პროცესში გახურებულ ლითონზე მისი მოხვედრისას ორთქლი არ კონდენსირდება. წყლის ორთქლის გენერატორი არ წარმოადგენს რთულ კონსტრუქციას და არ მოითხოვს დიდ ელექტროენერჯის ხარჯებს. წარმოებაში გამოიყენება ორი ტიპის წყლის ორთქლის გენერატორები: იმპულსური და უწყვეტი მოქმედების, რომელთა კონსტრუქცია არ ითვალისწინებს გენერატორში წყლის დონის შენარჩუნებას ტექნოლოგიური პროცესის განმავლობაში. წყლის სრული აორთქლების შემდეგ, ტექნოლოგიური პროცესი უნდა შეწყდეს და მოხდეს ხელახალი შევსება. ეს პროცედურა ამცირებს მწარმოებლურობას.

სტუ-ში შემუშავდა წყლის ორთქლის გენერატორები, რომლებიც უზრუნველყოფდნენ წყლის დონის მუდმივ შენარჩუნებას. სურ. 10.2-ზე ნაჩვენებია გენერატორი, რომლის კონსტრუქციაც, წყლის ავზის გადაადგილების საშუალებას იძლევა ვერტიკალურ მიმართულებებზე. ამ გადაადგილებისა და ელექტრული სქემის მუშაობის პრინციპის ერთობლიობით წყლის დონის მუდმივობა უზრუნველყოფილია. წყლისა და წყლის ორთქლის მიწოდებისა და შეწყვეტის კონტროლი ხორციელდება პნევმოელექტრო და ჰიდროელექტროსარქველების საშუალებით.

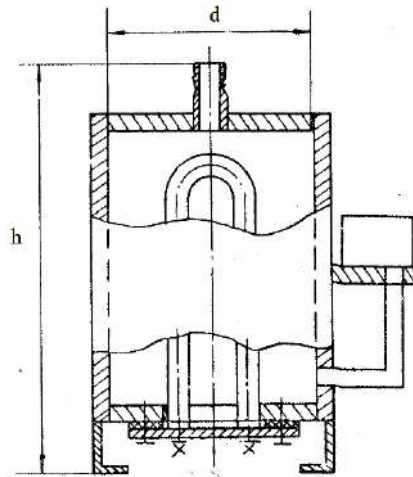


სურ. 10.2

წყლის ორთქლის გენერატორი

- 1. წყლის ავზი; 2. მიმართველები; საკისრები; 4. ზამზარები;
- 5. პნევმოელექტროსარქველი.

სურ. 10.3-ზე ნაჩვენებია მეორე ტიპის წყლის ორთქლის გენერატორი, სადაც წყლის დონის მუდმივობა ემყარება ზიარჭურჭლის პრინციპს. ის შედგება ცილინდრული ფორმის ავზისაგან, რომელთანაც ზიარჭურჭლის პრინციპით მიერთებულია მეორე ჭურჭელი, საიდანაც წყალი მიეწოდება ავზში წყლის დონისა და წნევის შემცირებისას.



სურ. 10.3

ზიარჭურჭლის ტიპის წყლის ორთქლის გენერატორი

რადგან წყლის ორთქლი, მიეკუთვნება როგორც ჟანგბადშემცველ, ისე წყალბადშემცველ გარემოს, ამიტომ ის ხასიათდება მაღალი თბოფიზიკური თვისებებით: თბოგამტარობა, თბოშემცველობა (ენტალპია), რკალის სვეტის მაღალი დამაბულობა და სხვ. ამან განაპირობა მისი გამოყენებაც პლაზმაწარმომქმნელ გარემოდ. შემუშავდა პლაზმატრონებიც და ტექნოლოგიებიც, სადაც წყლის ორთქლი გამოიყენებოდა, როგორც პლაზმაწარმომქმნელ გარემოდ, ისე დამცავი ფარდისათვის პლაზმური რკალის გარშემო. გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ამ დროს ეკოლოგიური მაჩვენებლები შემცირდა 70-75%-ით. ცხრ. 10.1 მოცემულია დასაშვები სანიტარული ნორმები, ხოლო ცხრ. 10.2-ში კვლევის შედეგები. უნდა აღინიშნოს, რომ მცირდება გამოსხივების ინტენსიურობა, რაც დაკავშირებულია სინათლის ტალღების არეკვლასა და გარდატეხასთან წყლის ორთქლის გავლისას. ორთქლის გაუმჭვირვალობა და მისი მუქი ფერი ამცირებს თვალეზზე გამოსხივების მოქმედების ინტენსიურობას. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ჭრის პროცესი ხასიათდება ხმაურით. ცხრ. 10.3-ში მოყვანილია ხმაურის დონე 16 ჰც-დან 8000 ჰც-მდე სიხშირის დიაპაზონში.

ცხრილი 10.1

მაგნეზიუმის ნივთიერებების კონცენტრაციების დასაშვები მნიშვნელობები

ნივთიერება	O_3	CO	NO_2	Mn	Cr_2O_3	მტვერი
მგ/მ ³	0,1	20,0	5,0	0,3	1,0	30,0

ცხრილი 10.2

პლაზმური ჭრის პროცესის ეკოლოგიური მაჩვენებლები

ჭრის მეთოდი	ცდა	კონცენტრაცია, მგ/მ ³					
	N	O_3	CO	NO_2	Mn	Cr_2O_3	მტვერი
ჰაერ-პლაზმური ჭრა	1	0,28	36,0	5,40	0,42	2,40	61,2
	2	0,34	38,8	5,80	0,40	2,60	60,5
	3	0,3	42,8	5,60	0,44	2,20	61,7
	4	34	39,8	5,60	0,40	2,40	60,8
	5	0,32	38,8	5,80	0,42	2,60	61,2
პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის გარემოში წყლის ორთქლის დამცავი ფარდით	1	0,15	19,2	2,62	0,20	1,16	30,8
	2	0,18	19,6	2,68	0,20	1,40	28,6
	3	0,16	20,4	2,63	0,22	1,08	29,8
	4	0,16	18,8	2,76	0,18	1,14	29,6
	5	0,15	18,6	2,74	0,19	1,14	30,2

ცხრილი 10.3

ჰაერ-პლაზმური ჭრა

სიხშირე, ჰც	16	31,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ხმაურის დონე, დბ	80	75	87	90	92	94	95	98	103

პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის დამცავი ფარდით

ხმაურის დონე, დბ	70	66	74	80	82	85	80	79	79
------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

11. ზედაპირების პლაზმური განმტკიცების ტექნოლოგიური ვარიანტები.

ზედაპირზე მიმდინარე თბური პროცესები

პლაზმური განმტკიცება ზედაპირის გადნობის გარეშე და გადნობით. ზედაპირის ტემპერატურული ველის გაანგარიშება. გაცივების სიჩქარის გათვლა. განსამტკიცებელი მასალის თბოფიზიკური თვისებების გავლენა ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების შესარჩევად

წარმოებაში ფართო გამოყენება ჰპოვა ზედაპირების პლაზმურმა განმტკიცებამ. მისი არსი მდგომარეობს ზედაპირების სწრაფი კონცენტრირებული გახურებისას მიმდინარე თერმულ, ფაზურ და სტრუქტურულ გარდაქმნებში. ზედაპირული განმტკიცებისას გამოიყენება როგორც პირდაპირი, ისე ირიბი მოქმედების პლაზმური რკალი. შესაბამისად არსებობს განმტკიცება ნამზადის ზედაპირის გადნობით და გადნობის გარეშე.

ზედაპირული განმტკიცება ზედაპირის გადნობის გარეშე ფართოდ გამოიყენება ფოლადისაგან დამზადებული დეტალებისათვის. ეს განპირობებულია იმით, რომ განმტკიცებისას შენარჩუნებულია ზედაპირის ხარისხი, რომელიც მიღებული იყო მექანიკური დამუშავებისას. დეტალის სისალე, თერმული გავლენის არის (თგა) ზომები და ექსპლუატაციის მაჩვენებლები რეგულირდება დამუშავების რეჟიმის პარამეტრებით, რომელთა ცვლილების დიაპაზონი საკმაოდ დიდია. როდესაც აუცილებელია, რომ ფოლადის დეტალს მიეცეს განსაკუთრებული საექსპლუატაციო თვისებები, მაშინ დეტალს უტარდება განმტკიცება ზედაპირის გადნობით. მაგალითად, ცხლად გაგლინვის გლინების განმტკიცება მოითხოვს მისი ზედაპირის გადნობას, რადგან მან უნდა უზრუნველყოს ლითონის საიმედო მოჭიდება და გააჩნდეს მაღალი ცვეთამედეგობა, რაც გაცილებით დიდია ზედაპირის დნობის გარეშე განმტკიცებასთან შედარებით. ამ ორი მეთოდით განმტკიცებული ზედაპირების სისალე, სტრუქტურა, ბზარმედეგობა და ფოლადების რღვევის ხასიათი საკმაოდ კარგად არის შესწავლილი. ცხრ. 11.1-ში მოყვანილია 30XГСА, ფოლადი 45 და 150XHM ფოლადების მექანიკური თვისებები ორივე ვარიანტით განმტკიცების შემდეგ. ცხრილში გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები: 1 – მასალის საწყისი მდგომარეობა; 2 – პლაზმური განმტკიცება ზედაპირის გადნობის გარეშე; 3 – პლაზმური განმტკიცება ზედაპირის გადნობით; КС – დარტყმითი სიბლან-

ტე; KC_{β} – ბზარის ჩასახვის მუშაობა; KC_{δ} – ბზარის გავრცელების მუშაობა; $v_{\text{ზ.}}$ – ბზარის გავრცელების სიჩქარე; P_{max} – რღვევის მაქსიმალური ძალა.

ცხრილი 11.1

30XГCA და 150XHM ფოლადის მექანიკური თვისებები

მასალა	ნიმუშის ტიპი	KC , მჯ/მ ²	KC_{β} , მჯ/მ ²	KC_{δ} , მჯ/მ ²	$v_{\text{ზ.}}$, მ/წმ	P_{max} , კნ
30XГCA	1	1,74	1,62	0,12	55	23,10
	2	1,37	1,28	0,09	95	20,70
	3	1,53	1,44	0,09	90	20,30
150XHM	1	0,05	0,03	0,02	270	5,90
	2	0,04	0,03	0,01	250	4,80
	3	0,03	0,02	0,01	250	4,00
45	1	2,23	1,51	0,72	35	24,50
	2	0,22	0,18	0,04	200	7,50
	3	0,18	0,15	0,03	210	8,00

ზედაპირული განმტკიცების გავლენა ბზარმედეგობაზე დამოკიდებულია მასალაზე. ფოლადი 45-ის შემთხვევაში დარტყმითი სიბლანტე ნახტომისებურად მცირდება, რაც გამოწვეულია ბზარის ჩასახვის შემცირებით. ანალოგიურად მცირდება რღვევის მაქსიმალური ძალა. 30XГCA და 150XHM ფოლადის შემთხვევაში დარტყმითი სიბლანტე მცირდება 1,25 -ჯერ, ხოლო რღვევის მაქსიმალური ძალა 1,1-2,2-ჯერ. ამ ფოლადების ზედაპირული განმტკიცების უმნიშვნელო გავლენა ბზარმედეგობაზე პირველ შემთხვევაში აიხსნება განმტკიცებული ფენის მომატებული პლასტიკურობით, ხოლო მეორე შემთხვევაში საწყის მდგომარეობაში ფოლადის მაღალი სიმყიფით.

დეტალების პლაზმური განმტკიცება ზედაპირის გადნობით, გადნობის გარეშე განმტკიცებასთან შედარებით იწვევს ბზარმედეგობის ცვლილებას. კერძოდ, ფოლადის 30XГCA დარტყმითი სიბლანტე იზრდება, ხოლო 45 და 150XHM ფოლადის შემცირდა. რღვევის მაქსიმალური ძალა 45-ის შემთხვევაში მცირედ იზრდება, სხვების კი შემცირდა. დადგენილია, რომ ზედაპირის დნობით განმტკიცებისას დარტყმითი სიბლანტის ცვლილება დაკავშირებულია გამდნარი ზონის მიკროსისალის ცვლილებასთან (ცხრ. 11.2).

30XГCA ფოლადის შემთხვევაში გამდნარის ზონის მიკროსისალის შემცირება ნაწრთობი ზონის მიკროსისალესთან შედარებით განაპირობებს დარტყმითი სიბლანტის

შემცირებას, ხოლო დანარჩენ ფოლადებში მიკროსისალის გაზრდა ამცირებს დარტყმით სიბლანტეს.

ცხრილი 11.2

პლაზმური რკალის თერმული გავლენის ცალკეული უბნების მიკროსისალე. მპა

უბანი	30X7CA	45	150XHM
გამდნარი ზონის ზედაპირი	6150-6300	9500-9650	10950-11200
ნაწრთობი ზონის ცენტრი	7400-7700	8200-8400	9600-9750
საწყისი სტრუქტურა	1950-2100	1700-1800	3400-3600

გამდნარი ზონის მარტენსიტული მიკროსტრუქტურა ხასიათდება სვეტისებრი ხასიათით. მაგრამ, მიუხედავად გაცივების დიდი სიჩქარისა, განხილული მასალებისათვის მარტენსიტის დისპერსიულობა განსახვევებულია. 30X7CA ფოლადს გააჩნია წვრილნემსა, 45 და 150XHM მსხვილნემსა მარტენსიტი. ყველა ფოლადის გამდნარი ზონა შეიცავს მომატებულ ნარჩენ აუსტენიტს (50%-მდე).

გადნობის დროს იცვლება არა მარტო მიკროსისალე და მარტენსიტის დისპერსიულობა, არამედ ფოლადის რღვევის ხასიათიც. 30X7CA ფოლადის გამდნარ ზონაში რღვევა მიმდინარეობს მიკროსიბლანტის მექანიზმით. რაც არის დარტყმითი სიბლანტის გაზრდის მიზეზი. ბლანტი რღვევა იწყება დიდი პლასტიკური დეფორმაციის შემდეგ. ის ხასიათდება ბზარების გავრცელების მცირე სიჩქარითა და დიდი ენერგოტევადობით, რღვევას იწვევს შიდა ფორების ჩასახვა, შერწყმა და გავრცელება.

გადნობის გარეშე განმტკიცებისას მიმდინარეობს მარცვალშიდა მყიფე რღვევა, რომლის დროსაც ბზარი ვრცელდება ლითონის ისეთ ზედაპირებზედ გაყოფის გზით, რომლებიც არ ემთხვევა მარცვლების კრისტალოგრაფიულ სიბრტყეებს და აქვთ პლასტიკური დეფორმაციის ნიშნები.

ფოლადების 45 და 150XHM გამდნარ ზონაში რღვევა მიმდინარეობს მარცვლების საზღვარზე კრისტალთშორისი რღვევის მექანიზმით. ეს აიხსნება გამდნარი ლითონის ძლიერი გადახურების შედეგად მარცვლის ზომების ზრდითა და კრისტალიზაციისას მარცვლების საზღვარზე მინარევების სეგრეციით, რაც, თავის მხრივ, იწვევს მარცვლის საზღვარზე რღვევის ენერგიის შემცირებას.

მაღალი ბზარმდეგობის მისაღებად, ზედაპირის დნობით პლაზმური განმტ-

კიციების გამოყენება ეფექტურია ფოლადებისათვის, რომლებშიც ნახშირბადის შემცველობა არ აღემატება 0,35%-ს. ფოლადებში, რომლებშიც ნახშირბადის შემცველობა მეტია 0,35%-ზე, ზედაპირის დნობით პლაზმური განმტკიცება შეიძლება გამოყენებული იქნას მხოლოდ იმ დეტალებისათვის, რომლებიც მუშაობს ინტენსიური ცვეთის პირობებში და არ განიცდის მნიშვნელოვან დარტყმით დატვირთვებს.

პლაზმური განმტკიცების ძირითად ფიზიკურ მახასიათებელს წარმოადგენს ტემპერატურული ველი, რომელიც გვამღევს საშუალებას განვსაზღვროთ მასალის ტემპერატურა თვა-ს ნებისმიერ წერტილში და დროის ნებისმიერ მომენტში, გახურებისა და გაცივების სიჩქარე, თვა-ს გახურებული ლითონის ცხელ მდგომარეობაში ყოფნის ხანგრძლივობის დამოკიდებულება განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრებსა და მასალის თბოფიზიკურ მახასიათებლებზე.

პლაზმური განმტკიცებისას მასალის გახურებისა და გაცივების სიჩქარეები რამდენჯერმე მეტია განმტკიცების ტრადიციულ მეთოდებთან შედარებით, რაც ხელს უწყობს მაღალი ექსპლუატაციური თვისებების მქონე განმტკიცებული ზედაპირების მიღებას.

გამოკვლევებით დადგენილია, რომ ზედაპირული შრეების გაცივების სიჩქარე, სტრუქტურა და თვისებები დამოკიდებულია დასამუშავებელ მასალაში შეყვანილი სითბოს ლოკალიზაციის ხარისხზე. მასზე ასევე დამოკიდებულია ნარჩენი დეფორმაციები და ძაბვები, მწარმოებლურობა, ეკონომიური მაჩვენებლები. ცხრ. 11.3-ში მოყვანილია ზედაპირული განმტკიცებისათვის გამოყენებული სითბოს წყაროების ძირითადი ტექნიკურ-ეკონომიური მახასიათებლები.

ცხრილი 11.3

სითბოს წყაროების ძირითადი ტექნიკურ-ეკონომიური მახასიათებლები

სითბოს წყარო	სიმძლავრე, კვტ	სიმძლავრის სიმკვრივე, კვტ/მ ²	გახურების ეფექტური მქკ %
აირის ალი	10 ⁻¹ - 10	2·10 ³ - 6·10 ³	55
ელექ. რკალი	5·10 ⁻² - 20	5·10 ³ - 4·10 ⁴	75
პლაზმური რკალი	1 - 10 ²	5·10 ² - 10 ⁶	80
ლაზერის სხივი	10 ⁻² - 25	10 ² - 10 ¹¹	5
ელექტრონული სხივი	10 ⁻¹ - 10 ²	5·10 ³ - 10 ⁸	85

ტემპერატურული ველის გასაანგარიშებლად უნდა შეირჩეს სითბოს წყაროსა და გასახურებელი სხეულის გამარტივებული მოდელი. რადგან ტექნოლოგიური პროცესი მიმდინარეობს სხეულის ზედაპირზე, ხოლო პლაზმური რკალი წარმოადგენს მძლავრ სითბოს წყაროს, ამიტომ გამარტივებული მოდელი წარმოადგენს ნახევრადშემოსაზღვრულ სხეულს, რომლის ზედაპირი ხურდება სწრაფად მოძრავი სითბოს წყაროთი. ამ შემთხვევაში სითბოს გავრცელების განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$T(y, z, t) = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda v} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{\sqrt{t(t_0 + t)}}. \quad (11.1)$$

აქ, T – გახურების ტემპერატურა, T_0 – სხეულის საწყისი ტემპერატურა, y, z – გახურების ლაქის სიგანე და სიღრმე, t – დრო, q – პლაზმის ეფექტური თბური სიმძლავრე, λ – სხეულის მასალის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტი, v – პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე, a – სხეულის მასალის ტემპერატურის გამტარებლობის კოეფიციენტი, რომელიც თავის მხრივ დამოკიდებულია მასალის სიმკვრივეზე, კუთრ სითბოტევადობასა და თბოგამტარებლობის კოეფიციენტზე.

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

გაცივების მყისი სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$W = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (11.2)$$

ცხრ. 11.3 -ში მოყვანილია (11.1) და (11.2) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შედეგები ფოლადი 45-ის ზედაპირული განმტკიცებისათვის ირიბი მოქმედების პლაზმური რკალით. შედეგები გამოთვლილია გახურებული ზედაპირიდან 1 და 3 მმ მანძილზე. ცხრილში მოყვანილი შედეგებიდან ჩანს, რომ თერმული ციკლის მახასიათებლების რეგულირება შესაძლებელია ფართო დიაპაზონში. გახურების ტემპერატურის რეგულირების დიაპაზონია საწყისი ტემპერატურიდან დნობის ტემპერატურამდე, გაცივების სიჩქარის კი 10^4 -დან 10^{60} C/წმ -მდე, რაც შეესაბამება მაღალკონცენტრირებული სითბოს წყაროებით დამუშავების პირობებს. მრავალი ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ ტემპერატურისა და გაცივების სიჩქარეების თეორიულად გათვლილ და ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგებს შორის განსხვავება მერყეობს 2-დან 15%-მდე, რაც სავსებით დასაშვებია. გახურების თერმული ციკლისა და გაცივების სიჩქარის მნიშვნელობების ვარირება შესაძლებელია ისეთი პარამეტრებით, როგორცაა დენის ძალა და პლაზმატრონის

ცხრილი 11.3

ფოლადი 45-ის ზედაპირული განმტკიცებისას ზედაპირის ტემპერატურისა და გაცივების სიჩქარის გამოთვლის შედეგები

საქმენის არხის დიამეტრი	დენის ძალა, ა	პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე, მ/სთ	ზედაპირის ტემპერატურა, °C	გაცივების სიჩქარე, °C/წმ·10 ⁵
6	300	20 50	949 ; 297 858; 146	5,08; 0,18 4,51; 0,13
6	400	20 50	1566; 999 1436; 498	8,69; 0,29 7,54; 0,29
4	300	20 50	861; 123 756; 126	3,52; 0,12 3,17; 0,05
4	400	20 50	1428; 372 1245; 209	5,85; 0,19 5,25; 0,14

გადაადგილების სიჩქარე, იმ პირობით, რომ დანარჩენი პარამეტრები (პლაზმაწარმოქმნელი აირის ხარჯი და წნევა, მანძილი პლაზმატრონსა და დეტალს შორის) იქნება უცვლელი.

განსამტკიცებელი მასალის თბოფიზიკური თვისებები, რომლებიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია ქიმიურ შემადგენლობაზე, განაპირობებს ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების შერჩევას. პლაზმური რკალის სიმძლავრე, პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე, განსამტკიცებელი მასალის თბოგამტარებლობისა და ტემპერატურის გამტარებლობის კოეფიციენტები განსაზღვრავენ ზედაპირის გახურების ტემპერატურას და ასევე განმტკიცების ეფექტურობის ერთ-ერთ ძირითად მაჩვენებელს - განმტკიცებული უბნის სიღრმეს. გაცივების სიჩქარეც, რომლის დროს სითბო გაედინება დეტალის შიდა (ღრმა) ფენებისაკენ, დამოკიდებულია მასალაზე, მაგალითად, დაბალნახშირბადიანი ფოლადების განმტკიცებისას გახურებისა და გაცივების დიდი სიჩქარეები იწვევს სტრუქტურულ ცვლილებებს, ახალი ფაზების წარმოქმნას, დისლოკაციების სიმკვრივის ზრდას, კრისტალურ გისოსში ძაბვების ზრდას. დაბალნახშირბადიან ფოლადებში მიიღება მარტენსიტი სისალით 32 -38 HRC. გახურებისას 727°C–910°C ტემპერატურათა ინტერვალში, ცალკეულ უბნებს გააჩნიათ მაღალნახშირბადიანი ფოლადის სტრუქტურა-მარტენსიტი და ნარჩენი აუსტენიტი სისალით 750...820 HV. ასეთი კომბინირებული სტრუქტურა (ფერიტი, პერლიტი, მარტენსიტი და ნარჩენი

აუსტენიტი) ხასიათდება მაღალი ცვეთამდეგობითა და პლასტიკურობით, რაც აფართოებს დაბალნახშირბადიანი ფოლადების გამოყენების სფეროს.

განმტკიცებისას დიდი მნიშვნელობა აქვს თეა-ის გეომეტრიულ ზომებს, რაც დამოკიდებულია რეჟიმის პარამეტრებისა და მასალის თბოფიზიკური მახასიათებლების თანაფარდობაზე.

წარმოებაში, პლაზმური განმტკიცება გამოიყენება გაცვეთილი დეტალების დადუღებით აღდგენის შემდეგ. განმტკიცების რეჟიმის შერჩევას, დიდი მნიშვნელობა ენიჭება დადუღებული ფოლადის შემადგენლობას. დადუღებული ფოლადების ნომენკლატურა საკმაოდ ფართოა, და მათი თვისებები განისაზღვრება მალეგირებელი ელემენტებითა და მათი რაოდენობით.

პლაზმური განმტკიცების რეჟიმების შერჩევას ასევე გათვალისწინებული უნდა იყოს დეტალების გეომეტრიული ზომები, რადგან ისინი განსაზღვრავს სითბოს გავრცელების პროცესს.

ამგვარად, პლაზმური განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრების შერჩევას, უნდა:

- გავითვალისწინოთ დასამუშავებელი დეტალის ან დადუღებული მასალის ქიმიური შემადგენლება;
- დავადგინოთ თბოგამტარებლობისა და ტემპერატურა გამტარებლობის კოეფიციენტი;
- განმტკიცებული ზედაპირისადმი წარდგენილი მოთხოვნის (სისალე, ცვეთამდეგობა, ბზარმდეგობა) მიხედვით განვსაზღვროთ გახურების ტემპერატურა;
- წინასწარ დადგენილი ზედაპირის გახურების ტემპერატურის მიხედვით გამოვთვალოთ პლაზმური რკალის საორიენტაციო სიმძლავრე და გაცივების სიჩქარე;
- პლაზმური სიმძლავრის მიხედვით შევარჩიოთ დენის ძალა და ძაბვა.

განვიხილოთ მაგალითი. ვთქვათ, უნდა ვაწარმოოთ დაბალნახშირბადიანი ფოლადის ზედაპირული წრთობა დნობის გარეშე. დავუშვათ, რომ ზედაპირის მაქსიმალური ტემპერატურა $z=0$ წერტილში 10 წმ-ში უნდა იყოს 900 °C. ვისარგებლოთ ცხრ. 5.1 -ით. მასალის თბოგამტარებლობის კოეფიციენტია $\lambda = 71 \text{ჯ/მ} \cdot \text{წმ}^{\circ}\text{C.}$, კუთრი

სითბოტევადობა $c=458\text{ჯ/კგ}^{\circ}\text{C}$. ხოლო სიმკვრივე $\rho=7870\text{კგ/მ}^3$, ვიანგარიშოთ ტემპერატურა გამტარებლობის კოეფიციენტი:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{71}{458 \times 7870} = 1,94 \cdot 10^{-5}$$

სხეულის საწყისი ტემპერატურა მივიღოთ 15°C -ის, ხოლო დროის საწყისი მომენტი 0-ის ტოლად. პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე კი $36 \text{ მ/სთ}=0,01 \text{ მ/წმ}$ მონაცემები შევიტანოთ (11.1) ფორმულაში:

$$900^{\circ}\text{C} = 15 + \frac{q \cdot \exp\left(-\frac{0}{4 \cdot 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot 10}\right)}{2\pi \cdot 71 \cdot 0,01 \cdot 10},$$

საიდანაც მივიღებთ, რომ $q \approx 39,5$ კვტ-ს. დანადგარის ელექტრული მონაცემების მიხედვით შევარჩევთ დენის ძალის სიდიდეს. მაგალითად, თუ გვაქვს კვების წყარო, რომლის უქმი სვლის ძაბვაა 500 ვ, ხოლო დენის ძალა რეგულირდება 100 – 250 ა-მდე, და ვიცით მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი, მაშინ დენის ძალა 4 მმ დიამეტრის არხის მქონე საქშენისათვის შეიძლება იყოს 220-230 ა, რომლის დროსაც ძაბვა რკალზე შეადგენს 168-170-ვ-ს. სიმძლავრის დადგენის შემდეგ შეგვიძლია ვიანგარიშოთ ტემპერატურები $z=1 \text{ მმ}; 2 \text{ მმ}; 3 \text{ მმ}$ და სხვა მანძილებზე.

$$T_1 = 15 + \frac{39500 \cdot \exp\left(-\frac{1 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot 10}\right)}{2\pi \cdot 71 \cdot 0,01 \cdot 10} \approx 898^{\circ}\text{C},$$

$$T_2 = 15 + \frac{39500 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot 10}\right)}{2\pi \cdot 71 \cdot 0,01 \cdot 10} \approx 896^{\circ}\text{C},$$

$$T_3 = 15 + \frac{39500 \cdot \exp\left(-\frac{9 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,95 \cdot 10^{-5} \cdot 10}\right)}{2\pi \cdot 71 \cdot 0,01 \cdot 10} \approx 890^{\circ}\text{C}.$$

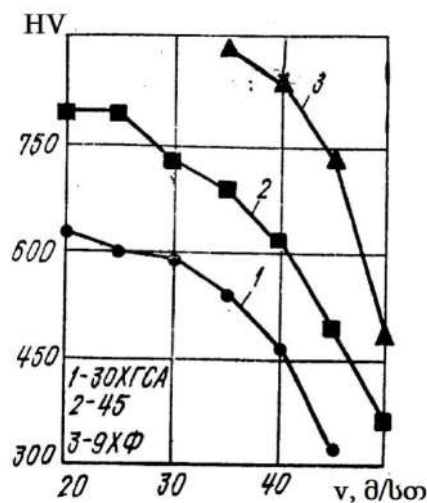
12. პლაზმური განმტკიცების რეჟიმის გავლენა განმტკიცებული არის სტრუქტურასა და მექანიკურ თვისებებზე

პლაზმური რკალის დენის ძალის გავლენა სისალესა და თგა -ის ზომებზე.

პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარის გავლენა სისალეზე, განმტკიცების ხარისხსა და განმტკიცების სიღრმეზე

შევისწავლოთ პლაზმური განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრების გავლენა განმტკიცებული ზედაპირის ისეთ მახასიათებლებზე როგორცაა განმტკიცების სიღრმე, სისალე, მიკროსისალე, ბზარმედეგობა, ნარჩენი ძაბვები და სხვ.

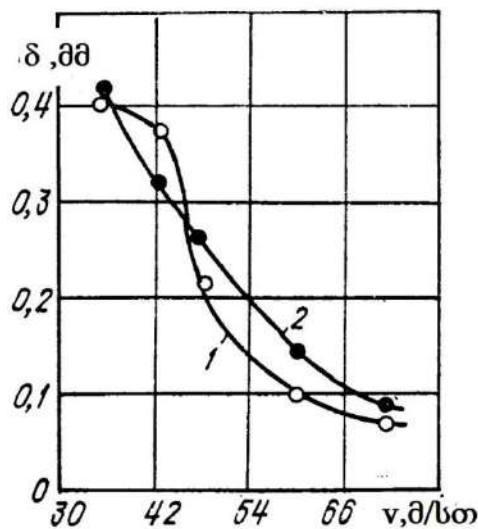
განმტკიცებული ზედაპირის სისალეზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე. დადგენილია, რომ ნებისმიერი მასალისათვის სიჩქარის შემცირება გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობაზე ქვემოთ, იწვევს დასამუშავებელი ზედაპირის დნობას. ფოლადებისათვის სიჩქარის მინიმალური ზღვრული მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნახშირბადის შემცველობაზე და იზრდება მისი პროცენტული შემცველობის ზრდასთან ერთად. ეს უკანასკნელი კი განაპირობებს განმტკიცებული ზედაპირის სისალის მაქსიმალური მნიშვნელობის მატებას. სურ. 12. 1-ზე მოცემულია ფოლადების 30XГСА, 45 და 9ХФ განმტკიცებული ზედაპირის სისალის დამოკიდებულება სიჩქარეზე. ყველა შემთხვევაში დენის ძალა იყო 400 ა, პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს ხარჯი 0,64 ლ/წმ, ხოლო მანძილი პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირს შორის 5 მმ.



სურ. 12.1

ზედაპირების სისალის დამოკიდებულება პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე

როგორც წარმოდგენილი გრაფიკიდან ჩანს სისაღე სიჩქარის მატებასთან ერთად კლებულობს, რაც აიხსნება ზედაპირის გახურების მაქსიმალური ტემპერატურის და აუსტენიტურ უბანში გახურებული მოცულობის ყოფნის დროის შემცირებით. ცხადია, რომ სიჩქარის გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობამდე შემცირება იწვევს სისაღის მომატებას, მაგრამ ზღვრულ მნიშვნელობაზე ქვემოთ შემცირებისას დაიწყება დასამუშავებელი ზედაპირის დნობა. სიჩქარის ზღვრული მნიშვნელობის სიდიდე დამოკიდებულია ფოლადში ნახშირბადის შემცველობაზე. რაც მეტია ნახშირბადის პროცენტული შემცველობა, მით უფრო მაღალია სიჩქარის ზღვრული მნიშვნელობა. ამავე დროს იზრდება განმტკიცებული უბნის სისაღის მაქსიმალური მნიშვნელობა. პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარე ასევე მოქმედებს განმტკიცებული უბნის სიღრმეზე. (სურ. 12.2). გრაფიკზე ნაჩვენებია 45 ფოლადის მიკროპლაზმური განმტკიცებისას, როგორც თეორიულად გათვლილი, ისე ექსპერიმენტით მიღებული შედეგები.



სურ. 12.2

განმტკიცების სიღრმის დამოკიდებულება პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარეზე

დენის ძალის ზრდა, საწინააღმდეგოდ პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარისა, იწვევს განმტკიცებული ზედაპირის სისაღისა და განმტკიცების სიღრმის ზრდას. დენის ძალის გავლენის მექანიზმი განვიხილოთ ფოლადების 20, 45, Y8, Y10 მაგალითზე, ზედაპირის დნობის გარეშე განმტკიცების შემთხვევაში. ქვევებექტოიდური ფოლადების საწყისი სტრუქტურა წარმოადგენილია ფერიტით და პერლიტით (30÷50%), ხოლო ევტექტოიდური Y8 ფოლადის სტრუქტურაში გარდა პერლი-

ტისა არის ჭარბი ცემენტიტი, რომელიც პერლიტთან ერთად წარმოქმნის ზევეტექტოიდური ფოლადის Y10 სტრუქტურულ ფუძეს. საწყისი სტრუქტურის არაერთგვაროვნება პლაზმური დამუშავების მერეც შენარჩუნებულია. პლაზმური გახურების პროცესში პერლიტის უბნებში წარმოიქმნება ნახშირბადიანი აუსტენიტი, რომლის შემადგენლობა უახლოვდება ქვევეტექტოიდურს. ზედაპირულ შრეში, სადაც გახურების ტემპერატურა და ხანგრძლივობა მაქსიმალურია, მიმდინარეობს ნახშირბადის კონცენტრაციის დიფუზიური გათანაბრება. სრული გათანაბრების შედეგად დამუშავებული ზედაპირის თხელ შრეზე (~10 მკმ) ფორმირდება მარტენსიტულ-აუსტენიტური სტრუქტურა, სადაც ნარჩენის აუსტენიტის შემცველობა დამოკიდებულია დამუშავების რეჟიმზე და ფოლადის შემადგენლობაზე. ექსპერიმენტებით დადგინდა, რომ მინიმალური დენის ძალისათვის, როდესაც მცირეა ლითონზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, ქვევეტექტოიდური ფოლადების ზედაპირულ შრეში მიიღება მარტენსიტი ნარჩენი აუსტენიტის მაღალი შემცველობით (30 ÷ 50 %) (სურ. 12.3; 12.4). ზედაპირული შრის სისალე შეადგენს 20 ÷ 80 HR-30N-ს, ხოლო განმტკიცების სიღრმე ყველა ფოლადისათვის შეადგენს 0,3 ÷ 0,8 მმ-ს. ზედაპირული განმტკიცებისას მაღალ დენებზე და მცირე სიჩქარეებზე, როდესაც იზრდება ლითონზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, ზედაპირზე ფორმირდება მარტენსიტული სტრუქტურა სისალით 73 ÷ 83 HR-30N, ხოლო განმტკიცების სიღრმე შეადგენს 0,8 ÷ 1,3 მმ-ს.

ცხრ. 12.2-ში მოცემულია მარტენსიტის გისოსის პარამეტრის ($a(211)$), ნარჩენის აუსტენიტის მოცულობითი შემცველობის ($\gamma_{\text{ნარჩ}}$) და ზედაპირის სისალის (HR-30N) მნიშვნელობების დამოკიდებულება განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრებზე.

მოცემული ქიმიური შემადგენლობის ფოლადისათვის ნარჩენი აუსტენიტის რაოდენობა განმტკიცებულ ზედაპირში განისაზღვრება გახურების პირობებით, ტემპერატურით, გაცივების პირობითა და მარტენსიტის მრუდის მდებარეობით. დეტალის ზედაპირის გახურებისას უწყვეტად მოქმედი პლაზმური რკალით, თერმული ციკლის ძირითადი მახასიათებლები დამოკიდებულია პროცესის რეჟიმის პარამეტრებზე და ურთიერთგადაბმულია. მაგალითად, მხოლოდ პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარის გაზრდისას, მცირდება ციკლის მაქსიმალური ტემპერატურა, გახურებული მოცულობის აუსტენიტურ უბანში ყოფნის დრო და იზრდება გაცივების

ცხრილი 12.2

მარტენსიტის გისოსის პარამეტრის, ნარჩენის აუსტენიტის მოცულობითი შემცველობისა და ზედაპირის სისალის მნიშვნელობების დამოკიდებულება განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრებზე.

რეჟიმის პარამეტრები		34XH1M			35XH2Φ			38XГH		
I,ა	ν,მ/სთ	a(211)ო A	γ _{ნარჩ} %	HR-30N	a(211)ო A	γ _{ნარჩ} %	HR-30N	a(211)ო A	γ _{ნარჩ} %	HR-30N
165	45	2,8737	37	66,0	2,8742	45	70,6	2,8740	39	70,0
250	144	2,8729	<5	77,0	2,8740	25	76,7	2,8695	<5	73,5
275	144	-	<5	75,4	2,8730	<5	77,8	2,8720	<5	76,0
300	144	-	-	-	2,8736	<5	76,4	2,8716	<5	75,0

სიჩქარე. რკალის სიმძლავრის მატებისას კი, იზრდება მაქსიმალური ტემპერატურა, გახურების სიღრმე, გახურებული მოცულობის აუსტენიტის არსებობის ტემპერატურათა ინტერვალში ყოფნის დრო, მაგრამ, ამავე დროს იზრდება აუსტენიტის მარცვლის ზომა. შესაძლებელია გაცივების სიჩქარის შემცირება. ზეევტექტოიდურ ფოლადებში კარბიდული ფაზების გახსნისას მიმდინარეობს γ -ფაზაში ნახშირბადის კონცენტრაციის ლოკალური ზრდა, რაც იწვევს აუსტენიტის სტაბილიზაციას. ფერიტო-პერლიტური ფოლადების დიდი სიჩქარით განმტკიცებისას, აუსტენიტის მარცვლის მოცულობაში ნახშირბადის კონცენტრაციის დიფუზიური გათანაბრების პროცესი ვერ ესწრება, რის გამოც ფოლადის სტრუქტურაში გვხვდება აუსტენიტის უბნები ნახშირბადის მაღალი კონცენტრაციით. ნახშირბადის მაღალი შემცველობა იწვევს მარტენსიტის M_H წერტილის შემცირებას და გაცივებისას მარტენსიტის შემდგომ ფიქსაციას. პლაზმური გახურების პროცესში თერმული გავლენის არის სიღრმის გასწვრივ ადგილი აქვს აუსტენიზაციის სხვადასხვა სტადიას.

მაღალ ტემპერატურამდე გახურებულ ზედაპირულ შრეებში მიმდინარეობს ჭარბი ფერიტის გარდაქმნა აუსტენიტში და ფერიტული უბნების გაჯერება ნახშირბადით. ფოლად 45-ში შეიმჩნევა ამ პროცესის დაუსრულებლობის ნიშნები, განსაკუთრებით კი მცირე დენებით დამუშავებისას.

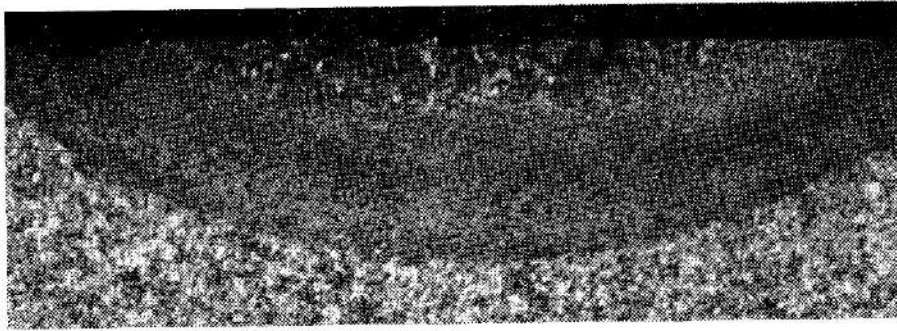
პლაზმური განმტკიცებისას, როდესაც ზედაპირები სწრაფად ხურდება, პერლი-

ტური კოლონია გადადის აუსტენიტურ მდგომარეობაში ნახშირბადის კონცენტრაციით, რომელიც ახლოსაა ევტექტოიდურთან. შემდეგ ეტაპზე ნახშირბადი დიფუნდირებს სტრუქტურულად თავისუფალი ფერიტის მარცვლის საზღვრებში, რაც წარმოადგენს მისი აუსტენიტში სრული გარდაქმნის პირობას. ნახშირბადის გადანაწილების პროცესის დასრულების ხარისხი განისაზღვრება გახურების თერმული ციკლის პარამეტრებითა და ფოლადის საწყისი სტრუქტურით, კერძოდ კი, მარცვლის ზომებით. განუწყვეტელი გახურება-გაცივების პირობებში, როდესაც ლითონი მცირე დროის განმავლობაში იმყოფება მაღალ ტემპერატურაზე, ნახშირბადის მიხედვით აუსტენიტის გათანაბრება არ მიიღწევა, სწორედ ამიტომ დამუშავებული ზედაპირების შესწავლისას გამოვლინდა ნახშირბადის სხვადასხვა შემცველობებით აუსტენიტისა და მარტენსიტის არსებობა.

ქვეევტექტოიდურ და ზეევტექტოიდურ ფოლადებში პლაზმური განმტკიცების რეჟიმის პარამეტრების გავლენა ნარჩენი აუსტენიტის კონცენტრაციაზე დიამეტრულად განსხვავდება. ზეევტექტოიდურ ფოლადებში დენის ძალის გაზრდისას ან პლაზმატრონის გადაადგილების სიჩქარის შემცირებისას იზრდება ჭარბი ცემენტიტის ხსნადობის ხარისხი, აუსტენიტი ჯერდება ნახშირბადით და გაცივებისას წარმოიქმნება ნარჩენი აუსტენიტის რაოდენობა მაღალი სისალის ნახშირბადიანი ტეტრაგონალურ მარტენსიტთან ერთად. ქვეევტექტოიდურ ფოლადებში დენის ძალის გაზრდისას იზრდება ნახშირბადის საშუალო კონცენტრაცია აუსტენიტში და მცირდება აუსტენიტის მდგრადობა. ამავე დროს დაბალნახშირბადიანი მარტენსიტის რაოდენობა იზრდება, ხოლო ნარჩენი აუსტენიტის მცირდება. შესაბამისად, ნარჩენი აუსტენიტის ყველაზე დიდი რაოდენობა ფიქსირდება დენის ძალის მცირე და სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობის დროს.

ლითონის პლაზმური დამუშავებისას შესწავლის ინტერესს წარმოადგენს თერმული გავლენის არე (თგა), რომელიც წარმოადგენს ძირითადი ლითონის იმ უბანს, რომელიც არ დნება, მაგრამ მისი სტრუქტურა გახურების შედეგად განიცდის ცვლილებას. თგა-ს ზომები დამოკიდებულია ლითონის გვარობაზე, დენის ძალასა და სიჩქარეზე. პლაზმური დამუშავებისას თგა-ს აქვს სეგმენტის ფორმა (სურ. 12. 3).

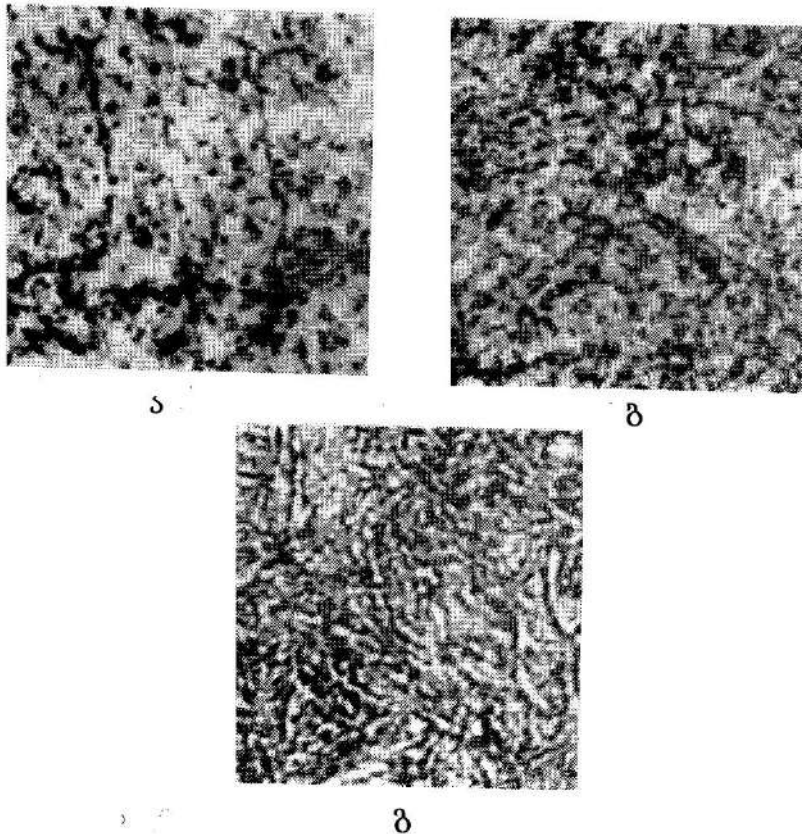
განმტკიცებისას ზედაპირის გაღნობის გარეშე თგა შედგება ნაწოთობი უბნისაგან, რომელშიც მიმდინარეობს მარტენსიტული და სასაზღვრო გარდაქმნები. დნობით განმ-



სურ.12.3

თერმული გავლენის არის მიკროსტრუქტურა

ტკიცებისას წარმოიქმნება დნობის დამატებითი ზედაპირული უბანი (წრთობა თხევადი მდგომარეობიდან). ნაწრთობი უბნის მიკროსტრუქტურა (სურ. 12.4) შედგება მაღალ-დისპერსიული მარტენსიტისაგან, ნარჩენი აუსტენიტისა და კარბიდებისაგან.



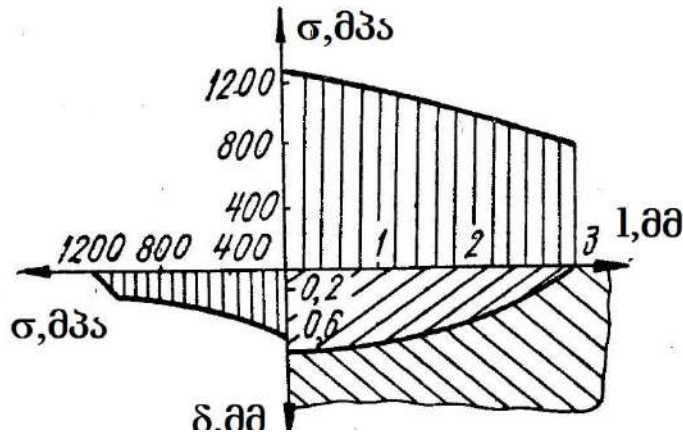
სურ. 12.4

დადუღებული ლითონის მიკროსტრუქტურა პლაზმური განმტკიცების მერე

ა. განმტკიცებული უბანი; ბ. განმტკიცებული უბანი 530 °C-ზე მოშვების შემდეგ;

გ. განმტკიცებული უბანი 650 °C-ზე მოშვების შემდეგ;

თგა-ს სიღრმეში ნარჩენი აუსტენიტის რაოდენობა მცირდება. ამ უბანში მაღალი სისალე ასევე გამოწვეულია ნარჩენი თერმული და სტრუქტურული ძაბვების არსებობით, რომლებიც ნაწილდება თგა-ს სიღრმისა და სიგანის გასწვრივ სურ.12.5.



სურ.12.5

თგა-ს განივ კვეთში ნარჩენი ძაბვების ეპიურები

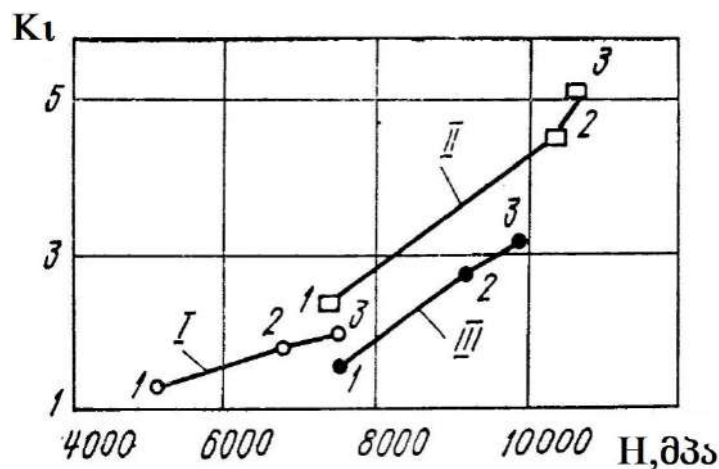
(1 და 2 მანძილებია თგა-ს ცენტრიდან და ზედაპირიდან)

თგა-ს ზედაპირზე კი წარმოიქმნება კუმშვის ძაბვები, რომელთა მნიშვნელობა აღწევს 1320 მგპა-ს. ნაწრთობი უბნის საზღვრებს გარეთ კუმშვის ძაბვები გადადის ჭიმვის ძაბვებში. უბნის საზღვრიდან 1 მმ მანძილზე ის ტოლია 115 მგპა-ის. თგა-ს გადაფარვით განმტკიცებისას გადაფარვის არეში წარმოიქმნება ჭიმვის ძაბვები, რომელთა მნიშვნელობაა $30 \div 80$ მგპა. დიდი სიდიდის კუმშვის ძაბვების არსებობა, მაჩვენებელია განმტკიცებული დეტალების მუშაუნარიანობის. საზაღვრო უბნის მიკროსტრუქტურა დამოკიდებულია მასალის საწყის სტრუქტურაზე. ქვევეტექტოიდური და ზეევეტქტოიდური ფოლადების სასაზღვრო უბნებში გვხვდება ჭარბი ფაზების უბნები, შესაბამისად ფერიტი და ცემენტიტი. ამ ფაზების დისპერსიულობა მცირდება სიღრმის გასწვრივ. ევეტექტოიდურ ფოლადებში სასაზღვრო უბანი გაცილებით მცირეა და ჭარბი ფაზები პრაქტიკულად არ არსებობს.

განმტკიცებული ზედაპირის სტრუქტურა ახდენს გავლენას განმტკიცებული დეტალის საექსპლუატაციო მაჩვენებლებზე: ცვეთამდედგობა, პლასტიკურობა, კოროზიამდედგობა და სხვ.

საექსპლუატაციო მაჩვენებლების ცვლილების ხასიათი განისაზღვრება როგორც ფაზური და სტრუქტურული ცვლილებებით, ისე განმტკიცების გარკვეული მექანიზ-

მების ერთობლივი რეალიზაციით. ცნობილია, რომ წრთობისას მიმდინარეობს მასალის კომპლექსური განმტკიცება, რომელიც განისაზღვრება კრისტალური გისოსის დეფექტებით (დისლოკაციები, ვაკანსიები და მათი კომპლექსები), მარტენსიტული გარდაქმნებითა და დისპერსიული ფაზების ჩანართებით. მნიშვნელოვან საექსპლუატაციო და განმტკიცების ხარისხის მაჩვენებელს წარმოადგენს დეტალის ცვეთამდეგობა. განვიხილოთ ცვეთამდეგობა იმ ფოლადებისა (30XГCA, 9XΦ, 150XHM), რომლებიც გამოიყენება მეტალურგიული დანადგარების დეტალების დასამზადებლად. დეტალების ზედაპირების ცვეთამდეგობაზე გამოცდა მიმდინარეობს მაგალითად, 100, 200, 300 მგპა დატვირთვაზე. ცვეთის სიდიდე ისაზღვრება ნიმუშების აწონით გამოცდამდე და გამოცდის შემდეგ. ცვეთამდეგობა ფასდება კოეფიციენტით K_t , რომელიც იზომება დაკარგული მასების შეფარდებით განმტკიცებამდე და განმტკიცების შემდეგ ცვეთის იდენტურ პირობებში. სურ. 12.6-ზე მოყვნილია ამ სიდიდის დამოკიდებულება განმტკიცებული ზედაპირების მიკროსისალეზე. როგორც მოსალოდნელი იყო ცვეთამდეგობის კოეფიციენტსა და მიკროსისალეს შორის არის პირდა-



სურ. 12.6

ცვეთამდეგობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება განმტკიცებული ზედაპირის მიკროსისალეზე

I. 30XГCA II. 9XΦ III. 150XHM 1. მოცულობითი წრთობა, 2. პლაზმური განმტკიცება თვა-ს 30%-იანი გადაფარვით, 3. პლაზმური განმტკიცება გადაფარვის გარეშე.

პირპროპორციული დამოკიდებულება. ერთი და იმავე მიკროსისალეზე მასალების ცვეთამდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები და ზრდის ხასიათი დამოკიდებულია მათ ცვეთამდეგობაზე განმტკიცებამდე.

13. პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირს შორის მანძილის

გავლენა განმტკიცებული ზედაპირის მექანიკურ თვისებებზე

განმტკიცებული ზედაპირის სტრუქტურა. განმტკიცებით მიღებული ზედაპირების ბზარმდეგობის გაზრდის გზები

პლაზმური განმტკიცებისას განმტკიცებული ზედაპირის მექანიკურ თვისებები ასევე დამოკიდებულია მანძილზე პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირს შორის. ცხადია, მანძილი უნდა იყოს არანაკლებ იმ მინიმალური მნიშვნელობისა, რომელზეც იქმნება ორმაგი რკალის წარმოქმნის საშიშროება. ეს მნიშვნელობა დამოკიდებულია პლაზმატრონის კონსტრუქციასა და პლაზმური რკალის სიმძლავრეზე. ირიბი მოქმედების პლაზმური რკალის ტემპერატურა საქმენიდან მანძილის ზრდასთან ერთად იკლებს, რაც გავლენას ახდენს ზედაპირის გახურების ტემპერატურაზე, ხოლო პირდაპირი მოქმედების პლაზმური რკალით დამუშავებისას, მანძილის გაზრდით მცირდება რკალის ლითონში ჩაძირვის სიღრმე. აქედან გამომდინარე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ პლაზმატრონსა და ზედაპირს შორის მანძილის გაზრდა იწვევს როგორც განმტკიცების სიღრმის, ისე სისალის შემცირებასაც. ცხრ. 13.1-ში მოყვანილია ფოლადისათვის 40X ექსპერიმენტებით მიღებული შედეგები.

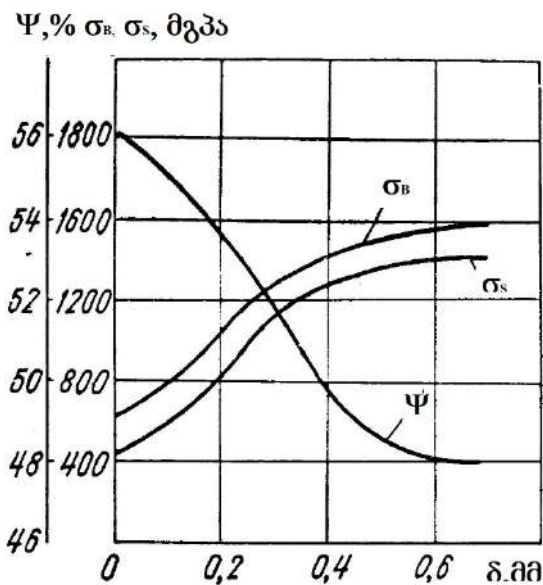
ცხრილი 13.1

ფოლადი 40X განმტკიცების სიღრმისა და მიკროსისალის დამოკიდებულება პლაზმატრონსა და ზედაპირს შორის მანძილზე

მანძილი პლაზმატრონსა და ზედაპირს შორის, მმ	განმტკიცების სიღრმე, მმ	მიკროსისალე, მგპა
3	2,5	5500
5	2,0	6500
7	0,7	5000

განვიხილოთ მაღალკონცენტრირებული ზედაპირული განმტკიცების გავლენა ზედაპირის ისეთ მექანიკურ თვისებებზე, როგორცაა σ_B – სიმტკიცის ზღვარი, σ_S – დენადობის ზღვარი, ψ – ფარდობითი შევიწროება, KC – დარტყმითი სიბლანტე, KC_B – ბზარის ჩასახვის მუშაობა, KC_g – ბზარის გავრცელების მუშაობა, $\nu_{\text{ზ.}}$ – ბზარის გავრცელების სიჩქარე, P_{max} – რღვევის მაქსიმალური ძალა.

ლიტერატურული მონაცემებიდან ცნობილია ფოლად 45-ის, რომლის საწყისი სისალეა 2400 მგპა, მექანიკური თვისებების კვლევების შედეგები. მისი ზედაპირის დამუშავება წარმოებდა პირდაპირი მოქმედების პლაზმური რკალით ზედაპირის დნობის გარეშე. რეჟიმის პარამეტრები იცვლებოდა შემდეგ დიაპაზონებში: $I = 80 - 112$ ა, $v = 60 - 186$ მ/სთ, $d_b = 6$ მმ, $G = 1$ ლ/წმ, $l = 5 - 10$ მმ. მექანიკური თვისებები (σ_B – სიმტკიცის ზღვარი, σ_s – დენადობის ზღვარი, ψ – ფარდობითი შევიწროება) იზომებოდა ინდენტორის ჩაწნევის მეთოდით. გამოიყენებოდა ნაწრთობი ფოლადის IIIX15 5 მმ დიამეტრის ბურთულა სისალით HRC 62-66. მექანიკური თვისებები იზომებოდა განმტკიცებული ზედაპირის სიღრმის მიხედვით. სურ.13.1-ზე ამ თვისებების ცვლილება სიღრმის მიხედვით.



სურ. 13.1

მექანიკური თვისებების ცვლილება განმტკიცებული სიღრმის მიხედვით

მრუდების ხასიათი აიხსნება განსხვავებული მიკროსისალის მიკროსტრუქტურების განლაგებით შრეების მიხედვით. განმტკიცებული უბნის ზედაპირზე მცირდება სიმტკიცის მახასიათებლები, ხოლო პლასტიკურობის – იზრდება. ეს ხელს უწყობს ცვეთამდეგობის რამდენჯერმე გაზრდას. როგორც ვიცით, მანძილის გაზრდა პლაზმატრონსა და დასამუშავებელ ზედაპირს შორის იწვევს განმტკიცების სიღრმის შემცირებას, რაც დაკავშირებულია ლითონში გადაცემული სითბოს რაოდენობის შემცირებასთან, შესაბამისად მცირდება სისალეც, აქედან გამომდინარე კი, მცირდება სიმტკიცის მახასიათებლებიც.

პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ბზარმედეგობის შესწავლას. დეტალების წყობიდან გამოსვლის მიზეზები შეიძლება იყოს, როგორც ზედაპირების ცვეთა ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობაზე მეტად, ისე ბზარების ინტენსიური წარმოქმნა. დეტალის ცხელ ლითონთან პერიოდული კონტაქტისას და იძულებითი გაცივებისას, ზედაპირულ მიკრომოცულებებში წარმოიქმნება თერმომექანიკური ძაბვები. მათი ციკლური ზემოქმედება განაპირობებს მუშა ზედაპირზე თერმომექანიკური დაღლილობის ბზარების წარმოქმნას, რომლებიც საწყის სტადიაზე ორიენტირებულები არიან ნებისმიერი მიმართულებით. შემდგომი ექსპლუატაციის პირობებში შეიმჩნევა ბზარების ზრდა გარე დატვირთვის მიმართულებით. გარკვეულ პირობებში ეს ბზარები შეიძლება გადაიზარდოს მაგისტრალურში და გამოიწვიოს დეტალის სრული რღვევა. ამიტომ მნიშვნელოვანია, რომ განმტკიცებისას გაიზარდოს არამარტო ცვეთამედეგობა, არამედ მდგრადობა ბზრის ჩასახვისა და გავრცელების საწინააღმდეგოდ. ბზარმედეგობის შეფასებისათვის გამოკვლეული უნდა იყოს: K_C – დარტყმითი სიბლანტე, $K_{C\beta}$ – ბზარის ჩასახვის მუშაობა, $K_{C\gamma}$ – ბზარის გავრცელების მუშაობა, ν_{β} – ბზარის გავრცელების სიჩქარე, P_{max} – რღვევის მაქსიმალური ძალა, $K_H = H_{განმ} / H_{საწ}$ – სისალის ამაღლების კოეფიციენტი, K_{Ic}^A ძაბვის ინტენსიურობის კოეფიციენტი. პლაზმური განმტკიცებისას სისალის ამაღლების კოეფიციენტის გაზრდისას მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე დარტყმითი სიბლანტე მცირდება, რაც აიხსნება ნაწრთობი ზედაპირის მაღალი სიმყიფით და შესაბამისად ბზარის ჩასახვის მუშაობის მკვეთრი შემცირებით. პლაზმური განმტკიცებისას, სხვა ტრადიციულ მეთოდებთან შედარებით, მაღალი სისალის სტრუქტურების მიღება აიხსნება მაღალი სტრუქტურული მიკროძაბვების არსებობით. არაერთგვაროვანი (ლოკალური და მეორე რიგის) სტრუქტურული მიკროძაბვები განაპირობებენ ფოლადების მიდრეკილებას მყიფე რღვევისადმი. განმტკიცების შემდეგ რღვევის მაქსიმალური ძალა და ძაბვების ინტენსიურობის კოეფიციენტიც მცირდება, მაგრამ მნიშვნელოვნად მცირედ. ეს მიუთითებს ბზარმედეგობის ძალური კრიტერიუმების, დაბალ მგრძნობელობაზე ენერგეტიკულ კრიტერიუმებთან შედარებით. ცხრ. 13. 2-ში მოყვანილია ლიტერატურიდან ცნობილი ბზარმედეგობაზე ჩატარებული კვლევის შედეგები ფოლადებისათვის 30X1CA, 9XΦ, 150XHM.

განმტკიცებული ფოლადებისა და ჩვეულებრივ მდგომარეობაში ფოლადის რღვევის ხასიათი განსხვავებულია ერთმანეთისაგან. ჩვეულებრივ ფოლადის რღვევა

მიმდინარეობს ორ სტადიად: ბზარის ჩასახვა და მისი გავრცელება სრულ რღვევამდე. განმტკიცებული ფოლადების რღვევა მიმდინარეობს რამდენიმე სტადიად – სუბ-მიკროსკოპული ბზარის ჩასახვა და ზრდა განმტკიცებულ შრეში, ძირითად ლითონთან საზღვარზე კი ზრდა ჩერდება. ბზარის შემდგომი გავრცელებისათვის აუცილებელია გაცილებით დიდი ძალა, ვიდრე განმტკიცებულ შრეში ჩასახვის ძალა. ამ ეტაპზე ბზარის ჩასახვის მუშაობაში (KC_{β}) იგულისხმება მაგისტრალური ბზარის ჩასახვისათვის საჭირო ენერგია. ქვევსტექტოიდურ და ევტექტოიდურ ფოლადებში (45, 50XH, 65X3MΦ, M76, 9XΦ) რღვევას აქვს მარცვალშიდა მყიფე ბზარის ხასიათი. 30XГCA დადუღებულ ფოლადში, სადაც ფერიტულ-პერლიტურ სტრუქტურაში პერლიტის მცი-

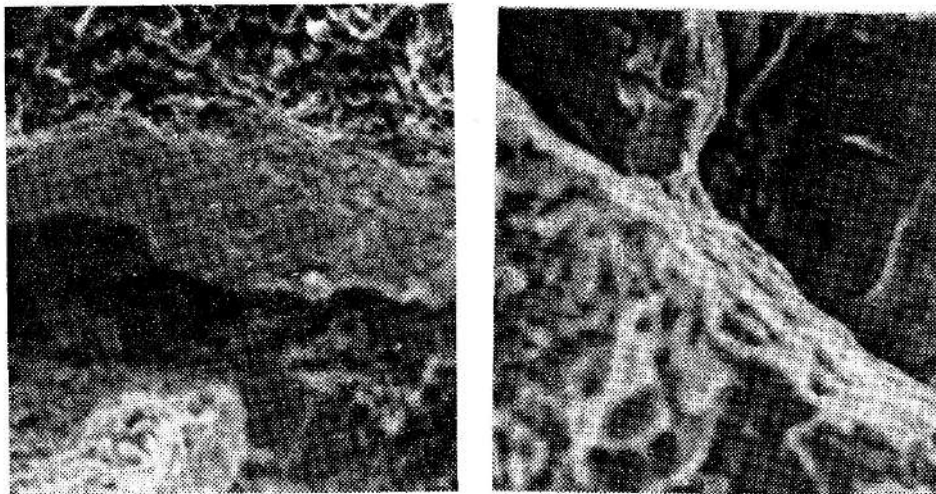
ცხრილი 13.2

ბზარმდეგობაზე ჩატარებული კვლევის შედეგები

ფოლადი	K_H	KC_{α} , მგჯ/მ ²	KC_{β} , მგჯ/მ ²	KC_{γ} , მგჯ/მ ²	$\nu_{\text{ზ.}}$, მ/წმ	P_{max} , კნ	K_{Ic}^I , მგპა· $\sqrt{\text{მ}}$
30XГCA	1,0	0,18	0,14	0,04	250	10,20	23,3
	2,0	0,13	0,10	0,03	240	9,39	20,6
	3,5	0,11	0,07	0,04	240	8,75	18,9
9XΦ	1,0	0,11	0,09	0,02	270	6,50	14,6
	1,7	0,08	0,06	0,02	300	5,10	10,7
	3,8	0,07	0,05	0,02	300	4,40	9,3
150XHM.	1,0	0,02	0,01	0,01	250	4,10	8,1
	1,7	0,02	0,01	0,01	240	4,00	8,0
	3,1	0,02	0,01	0,01	250	4,10	7,8

რე შემცველობაა, შერწყმულია მარცვალშიდა მყიფე ბზარისა და მიკრობლანტური ფიალისებური რღვევის ხასიათი. პლაზმური განმტკიცებისას იცვლება რღვევის მიკრომექანიზმი. განმტკიცებული უბანი ხასიათდება მეტი დისპერსიულობით საწყის სტრუქტურასთან შედარებით. ტეხილის მიკრორელიეფი წარმოადგენს კვაზიანახლექს, რომელიც ხასიათდება ძნელად განსხვავებული ანახლექის სიბრტყეებით, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია მცირე სიღრმის ფოსოებით. ნახშირბადის შემცველობის ზრდით, და შესაბამისად, განმტკიცებული უბნის მარტენსიტის დისპერსიულობის ხარისხისა, კვაზი ანახლექის სიბრტყეების დისპერსიულობაც იზრდება.

განმტკიცებულ უბანსა და ლითონის საწყის სტრუქტურაში რღვევის მიკრომექანიზმებს შორის დიდი განსხვავება მეტყველებს იმაზე, რომ პლასტური რკალით განმტკიცებული ფოლადები შეიძლება ჩაითვალოს კომპოზიციურ მასალებად, რომლებსაც აქვს სალი და მყიფე ზედაპირული შრეები, ხოლო შიდა შრეები შედარებით რბილია და პლასტიკური. 30XГCA, 45, 50XH, 65X3MΦ, M76 და 9XΦ ფოლადის პლასტით განმტკიცებული ნიმუშების ტეხილების განმტკიცებული და საწყისი სტრუქტურის საზღვრის უბანზე შეიმჩნევა სპეციფიკური საფეხურები, სადაც ტრაექტორიის გამრუდების მექანიზმით ადგილი აქვს ბზარის დამუხრუჭებას (სურ. 13.2).



ა

ბ

სურ. 13.2

ტეხილის უბნების ელექტრონული მიკროგრაფტოგრაფა

ა. 30XГCA

ბ. 50XH

ეს აიხსნება, ერთი მხრივ, ამ ფოლადების საწყისი სტრუქტურის მაღალი პლასტიკურობით, და მეორე მხრივ კი, განმტკიცებული უბნის საზღვარზე ნარჩენი ძაბვების გადასვლით კუმშვადიდან გამჭიმავში, რომელიც ცდილობს შეცვალოს ბზარის გავრცელების მიმართულება.

ფოლადში, სადაც ნახშირბადის შემცველობა 0,9%-მდეა, ბზარის დამუხრუჭება ხელს არ უწყობს ბზარმედეგობის ზრდას, ვინაიდან ზედაპირულ მყიფე შრეში ძლიერ მცირდება ბზარის ჩასახვის მუშაობა და არასაკმარისად მაღალი ბლანტი რღვევა საწყის მდგომარეობაში. ბზარმედეგობის გასასზრდელად აუცილებელია დამატებითი ტექნოლოგიური ზომების მიღება. ბზარმედეგობის გაზრდისისათვის მიზანშეწონილია

მათ ზედაპირზე დადუღება ისეთი ფოლადით, რომელსაც აქვს მაღალი ბლანტი რღვევა. მაღალი შედეგის მიღებისათვის უმჯობესია, თუ გამოვიყენებთ ისეთი დადუღების ტექნოლოგიას, რომელიც მოგვცემს საშუალებას მონაცვლეობით დავადუღოთ მტკიცე და რბილი, ბლანტი შრეები, რომლებიც ბზარის წვეროში დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლილების ხარჯზე ამუხრუჭებენ ბზარის გავრცელებას, განსხვავებული ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე შრეების საზღვარზე ბზარის წვეროს რადიუსის მყისიერად იზრდება, რაც ხდება ბზარის შეჩერების მიზეზი. რღვევის შემდგომი განვითარებისათვის უნდა წარმოიქმნას ახალი ბზარი, რასაც სჭირდება ენერჯის დამატებითი ხარჯი. ზემოთქმულის გარდა, ბზარმედეგობის გაზრდას ხელს უნდა უწყობდეს პლასტიკური შრის რღვევის მაღალი სიბლანტე. შრეების საზღვარზე ბზარის დამუხრუჭების ეფექტურობა დამოკიდებულია იმ თვისებების გრადიენტზე, რომლებზეც გავლენას ახდენს არამარტო ძირითად და დადუღებულ მასალას შორის შემადგენლობის განსხვავება, ასევე მოქმედებს მათი ურთიერთშერევის ხარისხი.

ასეთი კომპოზიციური მასალის რღვევისას, როდესაც ბზარი გადადის პირველიდან მეორე შრეში, ძაბვების ინტენსიურობის კოეფიციენტი იცვლება ნახტომისებურად:

$$K_i = \sigma_2 \pi l \frac{E_1}{E_2}.$$

აქ, σ_2 – მეორე შრეში ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობა, l – ბზარის სიგრძე, E_1, E_2 – მასალების პირველი და მეორე შრეების დრეკადობის მოდულები.

მოყვანილი გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ K_i დამოკიდებულია დრეკადობის მოდულების ფარდობაზე. კერძოდ კი, რაც უფრო მეტად მტკიცე და მაღალი დრეკადობის მოდული ექნება მასალის პირველ შრეს, ხოლო მეორე შრეს კი რაც შეიძლება რბილი და პლასტიკური, მით უფრო გაიზრდება ინტენსიურობის კოეფიციენტი.

იმ ბზარის ზრდა პლასტიკური შრის საზღვრამდე, რომლის ჩასახვა და გავრცელება მოხდა სალ შრეში განსაზღვრავს კომპოზიციური სტრუქტურების რღვევის მაღალი სიბლანტეს. საზღვარზე ბზარის გავრცელება მოითხოვს გაცილებით მეტ ძალას, ვიდრე მისი ჩასახვა სალ შრეში. ამიტომ ჰეტეროგენული მაკროსტრუქტურიანი შრეებიანი მასალებით ერთშრიანი დადუღება პერსპექტიულია იმ ფოლადისათვის, რომე-

ლიც განიცდის დარტყმით რღვევას. ამ მეთოდით დადუღებული დეტალების ცვეთა-მედეგობა იზრდება პლაზმური განმტკიცების გზით. ჰეტეროგენური სტრუქტურის მქონე ლითონში ბზარის გავრცელების გზაზე იქმნება მაკროსკოპული ბარიერები, განსხვავებული ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე შრეების საზღვრების სახით.

ცხრ. 13.4-ში მოყვანილია ბზარმედეგობის მახასიათებლები შრეების მონაცვლეობით დადუღებული ნიმუშებისა პლაზმური განმტკიცების შემდეგ. ცხრილში მოყვანილია ნიმუშების ოთხ ტიპზე ჩატარებული კვლევის შედეგები.

ცხრილი 13.4

შრეების მონაცვლეობით დადუღებული ნიმუშების ბზარმედეგობის მახასიათებლები, პლაზმური განმტკიცების შემდეგ

ნიმუშის ტიპი	K,	KC, მგჯ/მ ²	KC _β , მგჯ/მ ²	KC _δ , მგჯ/მ ²	ν _{ბ.ზ.} , მ/წმ	P _{max} , კნ	K _{IC} ^D , მგპა√მ ^{3/2}
I	1,0	0,25	0,20	0,05	240	12,00	-
	2,0	0,2	0,14	0,06	250	10,90	-
	3,5	0,17	0,12	0,05	240	9,90	-
Ia	1,0	0,18	0,14	0,04	250	10,20	-
	2,0	0,13	0,10	0,03	240	9,39	-
	3,5	0,11	0,07	0,04	240	8,75	-
II	1,0	0,28	0,26	0,02	250	13,00	-
	2,0	0,25	0,23	0,02	260	10,40	-
	3,5	0,23	0,21	0,02	260	10,20	-
III	1,0	0,48	0,25	0,23	25	8,00	58,7
	2,0	0,40	0,22	0,18	22	7,80	57,1
	3,5	0,36	0,18	0,18	21	7,50	55,9
IIIa	1,0	0,42	0,31	0,11	20	7,90	33,5
	2,0	0,35	0,23	0,12	18	7,65	31,2
	3,5	0,32	0,20	0,12	12	7,20	30,3
IV	1,0	0,36	0,28	0,08	150	7,50	55,2
	2,0	0,30	0,22	0,08	150	7,45	54,6
	3,5	0,28	0,20	0,08	150	7,38	53,9

I ტიპი წარმოადგენდა 30XГCA+9XΦ-ის კომპოზიციას, შრეების სისქით 8 და 2 მმ; 4 და 6 მმ, II ტიპი – 30XГCA; III ტიპი – 30XГCA+12X18H10T+9XΦ კომპოზიციას, შრეების სისქით 4, 3, 3 მმ და 2, 3, 5 მმ. IV ტიპი კი 30XГCA+CT15+9XΦ კომპოზიციას, შრეების სისქით 4, 3 და 3 მმ. ცხრილში K არის განმტკიცების ხარისხი. ცხრილიდან ჩანს, რომ 9XΦ ფოლადზე რღვევის მაღალი სიბლანტის მქონე 30XГCA ფოლადის დადუღებისას, ბზარმედეგობა იზრდება 1,5 – 2,5-ჯერ. III და IV ტიპის კომპოზიციების

შემთხვევაში ბზარმედეგობა გაცილებით მაღალია, რადგან, ამ ფოლადებს გარდა მაღალი რღვევის სიბლანტისა, ახასიათებთ ფოლადების გამყოფ საზღვარზე განშრევების წარმოქმნა, რაც აიხსნება მრავალშრიან დადუღებულ ლითონში შიდა ბლანტი შრეების არსებობით.

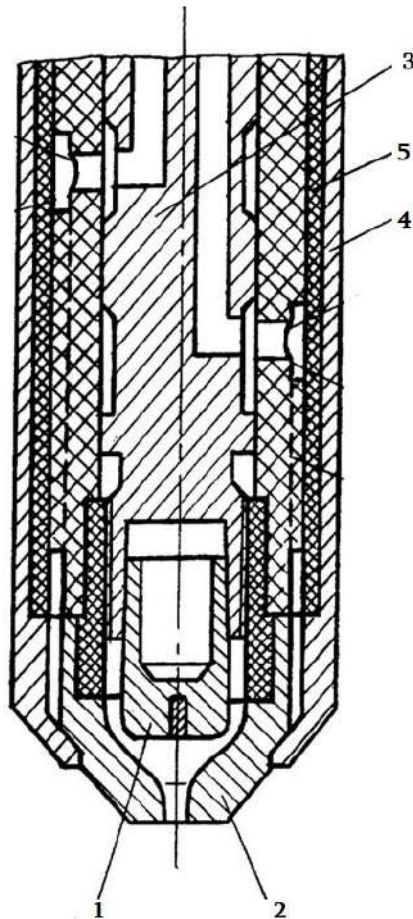
დადუღებული ფოლადების (18X6ГМФ, 30X2M2HФ, 15X3MФ, 25X5ФMC, 32X4Г2MФC) ცვეთამედეგობა პლაზმური განმტკიცების შემდეგ იზრდება 2,5-3-ჯერ, რაც გამოწვეულია მაღალი სისალითა და მარტენსიტულ-კარბიდული სტრუქტურის დისპერსიულობით.

პლაზმური განმტკიცება ზედაპირის დნობის გარეშე გამოიყენება, მზადეტალების ზედაპირის განმტკიცებისათვის, რაც ზრდის მათი მუშაობის რესურსს.

გაცვეთილი დეტალების აღდგენა და განმტკიცების ერთ-ერთი საუკეთესო ვარიანტია მრავალშრიანი დადუღებისა და პლაზმური განმტკიცების კომპლექსური ტექნოლოგიების გამოყენება, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის აღდგენილი ზედაპირების მექანიკურ თვისებებს, ამცირებს ბზარების წარმოქმნის საშიშროებას, იზრდება ცვეთამედეგობა, შესაბამისად დეტალების ექსპლუატაციის ხანგრძლივობა, რაც, თავის მხრივ, მნიშვნელოვნად ამცირებს საწარმოს ხარჯებს დაკავშირებულს ახალი დეტალების შექმნასთან და იძლევა მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ეფექტს.

14. პლაზმური რკალის გენერატორები – პლაზმატრონები

პირდაპირი და ირიბი მოქმედების პლაზმატრონების ძირითადი კონსტრუქციული კვანძები. კათოდები, მათი დანიშნულება, მასალები, ძირითადი გეომეტრიული ზომები. საქშენები, მათი დანიშნულება, ძირითადი გეომეტრიული ზომები მოწყობილობას, რომელშიც გენერირდება პლაზმური რკალი ეწოდება პლაზმატრონი. პლაზმატრონის (სურ. 14. 1) ძირითადი კვანძს წარმოადგენს განმუხტვის საკანი, სადაც მიმდინარეობს რკალური განმუხტვის შედეგად აღზნებული პლაზმის ფორმირება და სტაბილიზაცია. განმუხტვის საკნის ძირითადი დეტალებია კათოდი და საქშენი. მნიშვნელოვანია კათოდისა და საქშენში გამაცივებელი გარემოს მიწოდების სისტემა, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს მათი ინტენსიური გაცივება. ასევე, ერთ-ერთ მთავარ კვანძს წარმოადგენს პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს მიწოდ-



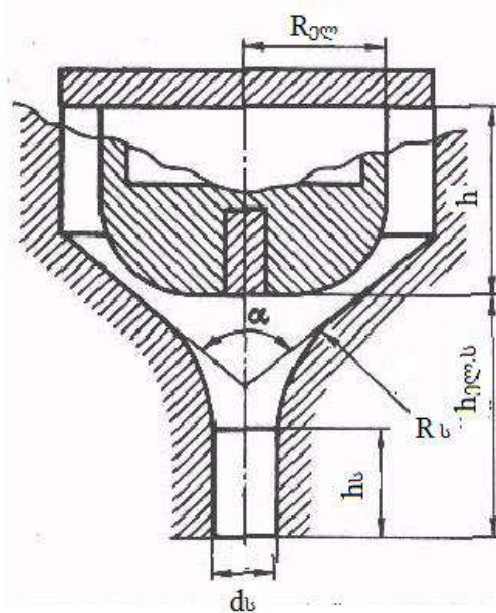
სურ. 14. 1

პლაზმატრონი

1. კათოდი; 2. საქშენი; 3. ელექტროდდამჭერი;
4. სპილენძის კორპუსი; 5. იზოლაციური კორპუსი.

დების სისტემა. პლაზმატრონის კონსტრუქციაში იზოლაციური კორპუსი, რეზინის სადებები გათვალისწინებულია პლაზმატრონის საიმედო ჰერმეტიზაციისა და ძაბვის ქვეშ მყოფი დეტალების ელექტროიზოლაციისათვის.

რკალური განმუხტვის საკნის ძირითადი კვანძების კონსტრუქცია და მასალები განსაზღვრავს პლაზმატრონის საექსპლუატაციო მახასიათებლებს: დეტალების მდგრადობა, პლაზმური რკალის სტაბილურობა და გადნობისუნარიანობა, პროცესის წარმადობა და ჭრის ზედაპირების ხარისხი. რკალური განმუხტვის საკნის ძირითადი დეტალებია კათოდი და საქშენი, რომლებიც ერთმანეთისაგან ელექტრულად იზოლირებულია. დადებითი შედეგი მიიღწევა თუ კათოდისა და საქშენის პარამეტრები ურთიერთკავშირშია და ქმნიან ერთობლივ სისტემას. პლაზმატრონის თითოეული კონსტრუქციისათვის არსებობს სავსებით განსაზღვრული განმუხტვის საკნის გეომეტრია, რომელიც იძლევა საუკეთესო შედეგებს. სურ. 14.2-ზე მოცემულია საკნის სქემატური ნახაზი და ის ძირითადი პარამეტრები რომლებიც გასათვალისწინებელია თეორიული ანგარიშების დროს.



სურ. 14.2

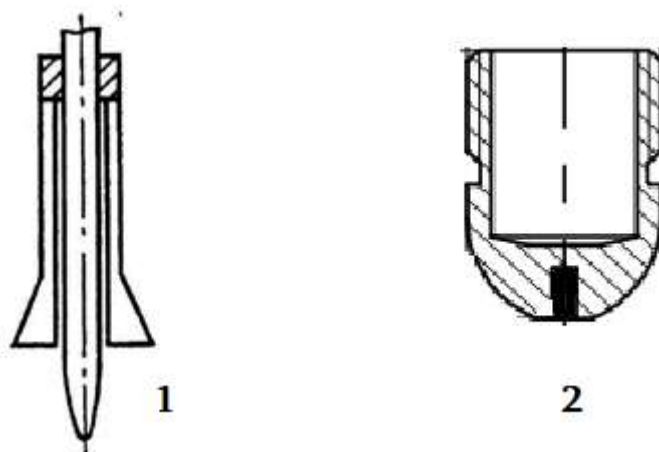
რკალური განმუხტვის საკნის კონსტრუქციული პარამეტრები

h_b – საქშენის არხის სიმაღლე; $h_{ელ,ს}$ – მანძილი საქშენის ქვედა კვეთიდან კათოდის მუშა ზედაპირამდე; h – მანძილი კათოდის მუშა ზედაპირიდან გამგრიგალებამდე; $R_{ელ}$ – ელექტროდის რადიუსი; d_b – საქშენის არხის დიამეტრი; R_b – საქშენის არხის კონუსორობიდან გადასვლის რადიუსი; α – საქშენში კონუსური ნაწილის გაშლის კუთხე.

პლაზმატრონის ფუნქციონირებისათვის მუშა მახასიათებლების შეუცვლელად, აუცილებელია, რომ პარამეტრები $h_{ელს}$, h_s , და d_s არ იცვლებოდეს დროის განმავლობაში.

ცნობილია, რომ მუდმივი დენის პლაზმური რკალის აღზნება მიმდინარეობს უარყოფით და დადებით ელექტროდებს შორის მაღალი სიხშირისა და ძაბვის იმპულსის მიწოდებით ან მათი მოკლე ჩართვის საშუალებით. უარყოფით ელექტროდს ეწოდება კათოდი. მეტალურგიულ პროცესებში, კერძოდ კი, შედუღებაში გამოიყენება ორი ტიპის ელექტროდები: დნადი და უდნობი ელექტროდები. პირველი გამოიყენება რკალური შედუღებაში, რომელიც გარდა რკალის ანთების ფუნქციისა ასრულებს ნაკერის ლითონით შევსების, ლეგირებისა და სხვა ფუნქციებსაც. უდნობი ელექტროდები კი გამოიყენება მხოლოდ რკალის ანთებისა და ნათების სტაბილურობის შენარჩუნებით. ვინაიდან რკალში მაღალი ტემპერატურებია 3000°C -იდან დაახლოებით 30000°C -მდე და ზოგ შემთხვევებში უფრო მაღლაც, ამიტომ აუცილებელია მათი ინტენსიური გაცივება. მიუხედავად ამისა, მათი მუშაობის რესურსი მცირეა.

გამოყენების სფეროს მიხედვით კათოდები მზადდება სხდასხვა მასალისაგან და განსხვავებული კონსტრუქციებით (სურ. 14.3)



სურ. 14.3

პლაზმატრონის კათოდი

1. ვოლფრამის ღერო ცანგით;
2. თერმოქიმიური სადგმით სპილენძის გარსაცმში.

პლაზმურ ტექნოლოგიებში კათოდის მასალის შერჩევა, პირველ რიგში, დამოკიდებულია პლაზმაწარმოქმნელი გარემოს ქიმიურ თვისებებზე. აირები შეიძლება იყოს ინერტული, ქიმიურად აქტიური და ნეიტრალური. პლაზმურ შედუღებაში გამოიყენება ინერტული აირები, როგორცაა არგონი. არგონში გამოიყენება ვოლფრამის ღერო-

ები, რომლებიც მაგრდება ცანგაში (სურ. 14.3. 1) ჰაერ-პლაზმურ ჭრამი გამოიყენება თერმოქიმიური მასალები, როგორცაა ჰაფნიუმი და ცირკონიუმი. მათგან დამზადებული სადგმები იწნეხება სპილენძის გარსაცმში (სურ.14.3. 2).

კათოდის მასალის შერჩევასა მთავარი ყურადღება ექცევა მის ემისიურ თვისებებსა და დნობის ტემპერატურას. ცხადია, რომ დნობის ტემპერატურა უნდა იყოს მაღალი. ვოლფრამის დნობის ტემპერატურა შეადგენს 3395°C -ს, ცირკონიუმისა – 1860°C -ს და ჰაფნიუმისა – 2233°C -ს. საუკეთესო თბოგამტარებლობით გამოირჩევა ვოლფრამი, რომლის თბოგამტარობა დაახლოებით 4-ჯერ აღემატება ჰაფნიუმისას. მისი გამოყენება შეკუმშული ჰაერის გარემოში შეზღუდულია, ვინაიდან ჟანგბადმემცველი გარემოს პლაზმაში განიცდის ეროზიას და ინტენსიურად იწვის. ამიტომ, პლაზმური ჭრის პლაზმატრონებში გამოიყენება ცირკონიუმი და ჰაფნიუმი, რომლებიც მიეკუთვნება დ.ი. მენდელეევის პერიოდული სისტემის მე-4 ჯგუფს. როგორც აღვნიშნეთ, მნიშვნელოვანია კათოდის მასალის ემისიური თვისებები (ემისია ეწოდება მყარი ტანის ზედაპირიდან ელექტრონების ამოტყორცნის პროცესს), კერძოდ კი პლაზმური რკალის აღზნებისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გამოსვლის მუშაობას, რომელიც უნდა იყოს მცირე. ცირკონიუმის გამოსვლის მუშაობა ტოლია 3,96 ევ, ჰაფნიუმის კი 3,53 ევ.

პლაზმატრონი მუშაობისას უზრუნველყოფილი უნდა იყოს კათოდის ინტენსიური გაცივება. გამოიყენება ე.წ. ირიბი გაცივების მეთოდი. ჰაფნიუმის აქტიური სადგმი იწნეხება მაღალი თბოგამტარებლობის მქონე სპილენძის გარსაცმში, რაც განაპირობებს სადგმსა და გარსაცმის კედლებს შორის მჭიდრო თბურ- და ელექტრო- კონტაქტს. სადგმიდან თბოგამტარებლობით სითბო გადაეცემა გარსაცმს, რომელიც ცივდება წყლით, ხელით ჰაერ-პლაზმური ჭრის დროს კი ჰაერით. თბოგადაცემის პროცესის გაუმჯობესებისათვის, სადგმსა და გარსაცმს შორის ამატებენ ალუმინის შუალედურ ფენას. პრაქტიკამ აჩვენა, რომ წყლით გაცივებისას კათოდის მუშაობის რესურსი ეწყვეტი მუშაობის რეჟიმში შეადგენს 2,5-3 სთ-ს, ხოლო ჰაერ გაცივებისას 1-1,5 სთ-ს.

კათოდის აქტიური სადგმისა და გარსაცმის დიამეტრები დამოკიდებულია პლაზმური რკალის დენის ძალაზე, რომელიც, თავის მხრივ, განსაზღვრავს თბური ნაკადების სიდიდეს. ვიცით, რომ კათოდის მუშა ნაწილზე თბური დატვირთვები განპირობებულია მასში გამავალი დენის მიერ გამოყოფილი ჯოულის სითბოთი და

რკალთან თბოცვლის პროცესით. თბური დატვირთვების შემცირების ერთ-ერთი გზაა აქტიური სადგმის ისეთი დიამეტრის შერჩევა, რომელიც მისი დასაშვები მნიშვნელობებიდან იქნება უდიდესი. დენის ძალის მოცემული მნიშვნელობისათვის დიდი დიამეტრის კათოდში მცირდება დენის ძალის სიმკვრივე, რაც შეამცირებს დენის გავლის დროს მასში გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას. მეორე გზაა დენის ძალის შემცირება, რაც შეამცირებს რკალის ეფექტურ თბურ სიმძლავრეს, რაც უარყოფითად აისახება ჭრის წარმადობაზე. ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ კათოდის მუშაობის მაქსიმალური რესურსის უზრუნველსაყოფად სპილენძის გარსაცმის დიამეტრი, დენის ძალის მოცემული მნიშვნელობისათვის, არ უნდა იყოს გარკვეულ მნიშვნელობაზე ნაკლები. ეს აიხსნება იმით, რომ თბური ნაკადის დასაშვები მნიშვნელობა, რომელიც გაედინება აქტიური სადგმის მასალიდან დამოკიდებულია გარსაცმის რადიუსზე. მართლაც, თუ გავიხსენებთ თბოგამტარებლობის დიფერენციულ განტოლებას:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T.$$

თუ ჰაფნიუმს ჩავთვლით უწყვეტად მოქმედ და უძრავ l სიგრძის წრფივ სითბოს წყაროდ, მაშინ ტემპერატურა გარსაცმის ნებისმიერ წერტილში გამოითვლება ფორმულით:

$$T(R) = \frac{q_{\text{ფ}}}{2\pi\lambda l} K_0(R\sqrt{b/a}).$$

აქ, R — მანძილია გარსაცმის ნებისმიერ წერტილამდე, $K_0(R\sqrt{b/a})$ მეორე რიგის ბესელის ფუნქციაა. აქედან, ვხედავთ, რომ რაც უფრო მცირე იქნება გარსაცმის რადიუსი, მით მეტი იქნება ტემპერატურა მის ნებისმიერ წერტილში, ამიტომ გარსაცმის რადიუსი ისე უნდა შეირჩეს, რომ თავიდან ავიცილოთ მისი წყობიდან გამოყვანა.

შეკუმშული ჰაერის გარემოში ცირკონიუმისა და ჰაფნიუმის ზედაპირზე წარმოიქმნება ძნელადდნობადი ჟანგეულები, რომლებიც ხასიათდება დაბალი გამოსვლის მუშაობითა და მდგრადობით მაღალ ტემპერატურაზე.

საქმენში მიმდინარეობს რკალის შეკუმშვა, ფორმირება და სტაბილიზაცია. მისი არხის სიმაღლე და დიამეტრი განსაზღვრავს პლაზმატრონის ტექნოლოგიურ შესაძლებლობებს. მათი მნიშვნელობა დამოკიდებულია დენის ძალაზე, პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს გვარობასა და ხარჯზე. პლაზმატრონის ტექნოლოგიურ შესაძლებლობებზე დადებით გავლენას ახდენს საქმენის არხის დიამეტრის შემცირება და სიმაღლის

გაზრდა. კერძოდ კი, სიჩქარეზე, ჭრის სიგანეზე, ჭრის ზედაპირების ვერტიკალობაზე და სხვ. მეორე მხრივ, კი, ეს ცვლილებები უარყოფით გავლენას ახდენს საქშენის მდგრადობაზე, რთულდება რკალის ანთება. ამიტომ, დიამეტრსა და სიმაღლეს შორის უნდა არსებობდეს გარკვეული თანაფარდობა. საქშენის დიამეტრის დასადგენად განიხილავენ დენის ძალისა და დიამეტრის შეფარდებას I/d . ამ შეფარდებაზეა დამოკიდებული პალზმური ჭრის სიჩქარე და მისი პირდაპირპროპორციულია. ამ დამოკიდებულების სიზუსტე დამოკიდებულია პლაზმური რკალის თბური სიმძლავრის შეფარდებაზე გასაჭრელი ფურცლის სისქეზე. რაც უფრო მეტია ეს შეფარდება, მით უფრო ზუსტია დამოკიდებულება $v = f(I/d)$. ამავე დროს, I/d მნიშვნელობის გაზრდისას მცირდება პლაზმატრონის მუშაობის საიმედოობა. არსებობს მისი ისეთი მნიშვნელობა, რომლის ზემოთ მუშაობა შეუძლებელია. დადგენილია, რომ I/d არ უნდა აღემატებოდეს 1400-ს.

საქშენის არხის სიმაღლე რაც მეტია, მით მეტია სიჩქარე და იზრდება ჭრის ზედაპირების ხარისხი, მაგრამ მცირდება პლაზმატრონის მუშაობის რესურსი. ოპტიმალური შედეგი მიიღწევა საქშენის დიამეტრისა და სიმაღლის ტოლობისას. სიმაღლის შემდგომ გადიდებას მივყევართ ორმაგი რკალის წარმოქმნის ალბათობის ზრდასთან.

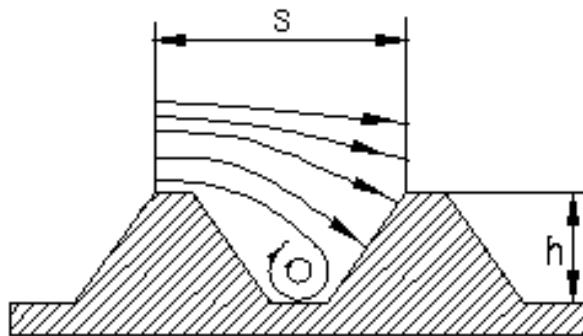
საუკეთესო მასალა საქშენის დამზადებისათვის არის სპილენძი, რაც გამოწვეულია მისი მაღალი ელექტროგამტარებლობისა და თბოგამტარებლობის გამო.

პლაზმატრონის მუშაობის რესურსს განსაზღვრავს კათოდისა და საქშენის მუშაობის რესურსი, რადგან ორივე განიცდის დიდ თბურ დატვირთვებს. მიუხედავად მათი გაცივებისა წყლით, რესურსი შეზღუდულია და შემოიფარგლება რამდენიმე საათით უწყვეტი მუშაობის რეჟიმში. საქშენის მუშაობის რესურსის გასაზრდელად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს კონსტრუქციული გადაწყვეტილებების მიღება. განვიხილოთ ერთ-ერთი შემოთავაზებული მეთოდი, რომელიც შემუშავდა სტუ-ში.

ჩვეულებრივი გაცივებისას წყალსა და საქშენის კედელს შორის თბოცვლის პროცესის ინტენსიურობა დამოკიდებულია სასაზღვრო შრეში მოძრაობის ხასიათით. ტურბულენტურ სასაზღვრო შრეში სითბოს გადატანას ზღუდავს საქშენის კედელზე ლამინარული ქვეშრის წარმოქმნა. ტურბულენტურობის გაზრდა ამცირებს ამ ქვეშრის სისქეს, რაც, თავის მხრივ, ამცირებს მის თერმულ წინაღობას და თბოცვლის პროცესი

ძლიერდება. სიჩქარის ზედმეტად გაზრდა, ამავე დროს ზრდის გამაცივებელი ტრაქტის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობას.

თბოცვლის პროცესის გაძლიერებისათვის, მიზანშეწონილია შეიქმნას ნაკადის ხელოვნური ტურბულენტობა, რისთვისაც სასაზღვრო შრეში უნდა შეიქმნას სპეციალური ტურბოლიზატორები. ამისათვის, საქმენის გარე კედელი, რომელზეც მიეწოდება გამაცივებელი წყალი, უნდა დამზადდეს ხორკლიანი, ანუ კედელზე უნდა შევქმნათ სხდასხვა ფორმის მცირე სიმაღლის გამონაშვებები. მათი გარშემოვლისას იქმნება ადგილობრივი დინებები გრიგალური უბნების წარმოქმნით. ეს იწვევს სასაზღვრო შრის ძლიერ ტურბულენტობას, რომელიც ანგრევს ლამინარულ ქვეშრეს, მცირდება თერმული წინააღმდეგობა და ინტენსიურდება თბოცვლის პროცესი. ამ პროცესის სქემატური ნახაზი მოცემულია სურ. 14. 4-ზე.



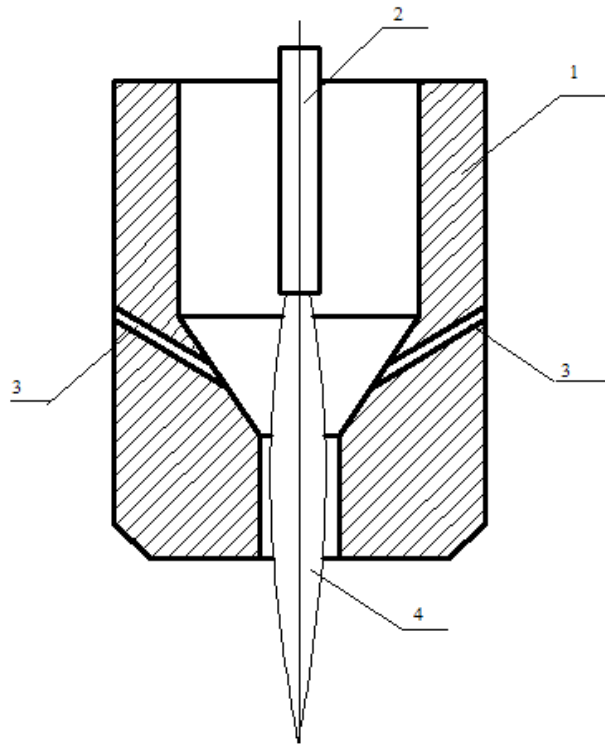
სურ. 14.4

გამაცივებელი ნაკადის მიერ ხორკლიანი ზედაპირის გარშემოვლის სქემატური ნახაზი

სურ. 14. 4-ზე s არის მანძილი გამონაშვებებს შორის, h – კი სიმაღლე. s/h სიდიდის ოპტიმალური მნიშვნელობად შეიძლება ჩაითვალოს 12 – 14. ამ დროს თბოცვლის პროცესი შეიძლება გაიზარდოს 2 -2,5-ჯერ.

ამ მეთოდის გარდა კარგი იქნება საქმენის შიდა კედელზე გამოვიყენოთ ზედაპირის აფსკური გაცივება (სურ, 14.5). საქმენზე დატანებული არხებიდან მის შიდა კედელზე მიეწოდება წყალი მცირე რაოდენობით, ისე, რომ წარმოიქმნება წყლის აფსკი. რკალსა და აფსკს შორის თბოცვლის შედეგად მიმდინარეობს წყლის გახურება და აორთქლება. გარდა საქმენის დამატებითი გაცივებისა, აორთქლებული წყალი ხვდება პლაზმურ რკალში, სადაც იონიზირდება და წყალბადის არსებობის გამო დადებით

გავლენას ახდენს პროცესის ტექნოლოგიურ მაჩვენებლებსა და ჭრის ზედაპირების ხარისხზე.



სურ. 14.5

საქმენი

1. საქმენი; 2. კათოდი; 3. წყლის მიწოდების არხები; 4. პლაზმური რკალი.

15. პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს მიწოდების ხერხები (ლამინარული და გრიგალური)

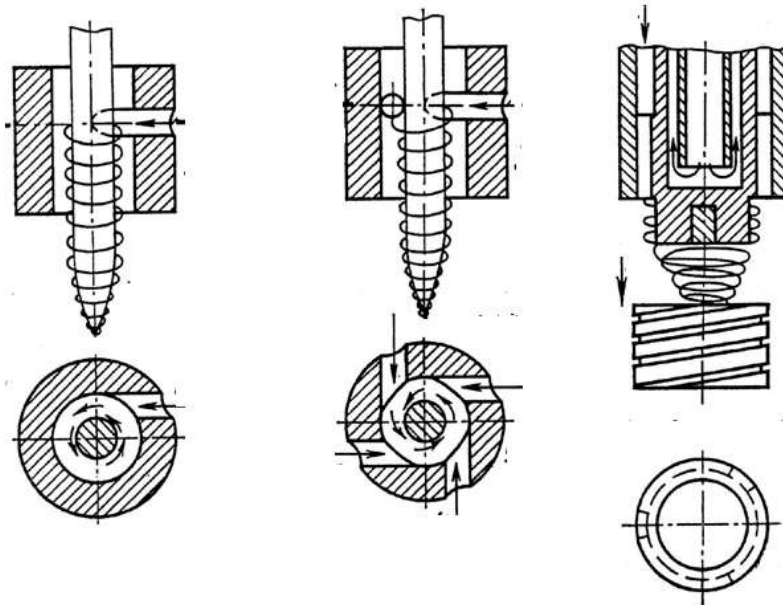
გრიგალური მიწოდების (გამაგრიგალელებელი) დანიშნულება და კონსტრუქციული ვარიანტები. პლაზმატრონის გაცივების მეთოდები და ანგარიში

პლაზმური ჭრის ტექნიკაში გამოიყენება პლაზმაწარმომქმნელი გარემოს მიწოდების ორი მეთოდი: აქსიალური და ტანგენციალური. აქსიალური მიწოდება გამოიყენება პლაზმურ შედუღებაში და მცირე ხარჯით, რაც უზრუნველყოფს აირის ლამინარულ დინებას. ლამინარული დინების პლაზმაწარმომქმნელ გარემოში ანთებული პლაზმური რკალით შედუღება უზრუნველყოფს ხარისხიანი ნაკერის მიღებას. პლაზმურ ჭრაში უპირატესობა ენიჭება ნაკადის ტურბულენტურ დინებას, რომლის დროსაც ძლიერდება რკალის რადიალური კუმშვის ხარისხი, იზრდება რკალის ძალური ზემოქმედება დასამუშავებელ ზედაპირზე, მისი გადნობისუნარიანობა, რაც აუცილებელია ჭრის პროცესისათვის.

ტანგენციალური მიწოდების დროს აირი მიეწოდება რკალური განმუხტვის საკნის განივი კვეთის მხებების გასწვრივ. აირის მოძრაობის ტრაექტორია წარმოადგენს სპირალს, მოძრაობისას ის გრიგალური ნაკადით გარს ერტყმის პლაზმურ რკალს. ამ დროს კათოდიური ლაქა და რკალის სვეტი ავტომატურად ფოკუსირდება საქმენის არხის ღერძისა და კათოდის ზედაპირის გადაკვეთის წერტილში, რაც იძლევა საშუალებას, რომ გამოვიყენოთ ბრტყელზედაპირიანი კათოდები. აირის გაგრიგალება ხელს უწყობს პლაზმური რკალის გარშემო აირის ნაკადის სისქის ზრდას, რაც დადებითად მოქმედებს საქმენის მდგრადობაზე.

ნახ. 15.1 - ზე ნაჩვენებია ტანგენციალური მიწოდების ტექნიკური ვარიანტები. პირველ და მეორე ვარიანტში პლაზმაწარმომქმნელი აირი მიეწოდება კათოდის მართობულად განმუხტვის საკანზე არსებული ერთი არხის ან რამდენიმე არხის საშუალებით. მაგრამ, ამ ვარიანტებმა პრაქტიკაში დიდი გამოყენება ვერ ჰპოვეს. დღეს გამოიყენება მესამე ვარიანტი. კერძოდ კი, პლაზმაწარმომქმნელი აირი მიეწოდება ე.წ. გამაგრიგალელების საშუალებით. გამაგრიგალელებელი მზადდება ელექტროდდამჭერზე, რომელშიც ჯდება კათოდი. ელექტროდდამჭერის ქვედა ნაწილში, უშუალოდ კათოდთან, კეთდება სამი და მეტიც ერთნაირი კუთხით დახრილი სპირალურად განლაგე-

ბული არხები. არხების ძირითადი პარამეტრებია მათი საერთო ფართობი და დახრის კუთხე, რომელიც განსაზღვრავს აირის აჩქარების ტანგენციალურ მდგენელს.



ნახ. 15. 1

პლაზმაწარმოქმნელი აირის ტანგენციალური მიწოდების ტექნიკური ხერხები

არხების საერთო კვეთის ფართობი აუცილებლად ნაკლები უნდა იყოს საქშენის არხის განივი კვეთის ფართობზე, რაც ხელს უწყობს აირის კარგ გაგრიგალებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი აქვს საქშენის არხში აირის ნატბორის წარმოქმნას, რომელიც ასუსტებს გრიგალს და ზრდის ხიწვების წარმოქმნის ალბათობას. არხების ფართობის საშუალებით, ასევე შესაძლებელია პლაზმაწარმოქმნელი აირის წნევის რეგულირება. დადგენილია, რომ პლაზმური რკალის სტაბილიზაციაზე გავლენას ახდენს არხების რაოდენობა. სერიულ პლაზმატრონებში ძირითად გამოიყენება სამ-არხიანი გამაგრიგალებლები, მაგრამ უკანასკნელ წლებში დაიწყეს ექვსარხიანი გამაგრიგალებლიანი პლაზმატრონების გამოშვებაც.

პლაზმატრონი შეიცავს გამაცივებელ სისტემას. მექანიზირებული პლაზმატრონები ცივდება გამდინარე წყლით, ხოლო ხელით პლაზმური ჭრის პლაზმატრონები წყლითაც და ჰაერითაც. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საქშენისა და კათოდის ინტენსიური გაცივება. წარმოებაში პლაზმატრონების გამოყენების ეფექტურობა დამოკიდებულია სწორედ მათი მუშაობის რესურსზე. შემუშავებულია საქშენის გაცივებისა და მუშაობის რესურსის თეორიული გათვლის ზოგადი პრინ-

ციპები. ეს პრინციპები განვიხილოთ კერძო მაგალითის სახით ირიბი მოქმედების პლაზმატრონის საქშენისათვის. თეორიული გათვლების ჩასატარებლად შევირჩიოთ საწყისი მონაცემები:

- პლაზმაწარმომქმნელი გარემო – შეკუმშული ჰაერი;
- ჰაერის საწყისი ტემპერატურა – 300^0K ;
- პლაზმაწარმომქმნელი ჰაერის ხარჯი – $G = 3 \times 10^{-3}$ კგ/წმ;
- ჰაერის წნევა პლაზმატრონის გამოსასვლელზე – 44×10^5 პა;
- პლაზმური რკალის ძაბვა – $U=200$ ვ;
- პლაზმური რკალის დენის ძალა – $I=100$ ა;
- პლაზმური რკალის ეფექტური მ.ქ.კ.– $\eta=40\%$;
- საქშენის მასალა – სპილენძი;
- საქშენის არხის დიამეტრი – $d=13$ მმ;
- საქშენის არხის სიმაღლე – $h= 53$ მმ;

პლაზმური რკალის თბური სიმძლავრე საქშენში გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = UI(1 - \eta) = 200 \times 100 \times (1 - 0,4) = 1,2 \times 10^4. \quad (15.1)$$

კუთრი თბური ნაკადი საქშენის კედელში გამოითვლება ფორმულით:

$$q = \frac{Q - 4,6 \times 10^{-5} I^{1,6} p h}{\pi d^2}. \quad (15.2)$$

$$q = \frac{1,2 \times 10^4 - 4,6 \times 10^{-5} \times 100^{1,6} \times 4 \times 10^5 \times 53}{3,14 \times 169} = 20 \times 10^6 \frac{ვტ}{მ^2}.$$

შემდგომი ანგარიშისათვის საქშენის გამაცივებელი კედლის ტემპერატურა მივიღოთ წყლის დუდილის ტემპერატურის ტოლად. თუ წყალს მივაწვდით წნევით 5×10^5 პა-ით, მაშინ $t_{ღ} = 149^0C$ განვსაზღვროთ ტემპერატურის მაქსიმალური ცვლილება სპილენძის საქშენის კედელზე:

$$\Delta t_{max} = t_{ღწ} - t_{ღ} = 1083 - 149 = 934^0C.$$

კედლის მაქსიმალურად დასაშვები სისქე ვიანგარიშოთ შემდეგი ფორმულით:

$$\delta = 0,5d[\exp(2\lambda\Delta t_{max}/qd) - 1]. \quad (15.3)$$

$$\delta = 0,5 \times 0,013[\exp(2 \times 4 \times 10^2 \times 934/20 \times 10^6 \times 0,013) - 1] = 0,012 \text{ მ.}$$

თუ გავითვალისწინებთ მასალის სიმტკიცისა და რესურსის მარაგს, მაშინ კედლის სისქედ შეიძლება შევირჩიოთ 5 მმ. მოცემული სისქისათვის ტემპერატურის ცვლილება იქნება:

$$\Delta t = \frac{qd}{2\lambda} \times \ln \frac{d+2\delta}{d}. \quad (15.4)$$

$$\Delta t = \frac{20 \times 10^6 \times 0,013}{2 \times 4 \times 10^2} \ln \frac{0,013 + 0,01}{0,013} \approx 185^\circ\text{C}.$$

საქშენის გარე დიამეტრი იქნება $D = d + 2\delta = 0,023$ მმ საქშენის კედელში მაქსიმალური თბური ნაკადი გამოითვლება ფორმულით:

$$q_1 = \frac{dq}{D} = \frac{0,013}{0,023} \times 20 \times 10^6 \approx 11 \times 10^6 \text{ ვტ/მ}^2.$$

კრიტიკული თბური ნაკადი კი გამოითვლება ფორმულით:

$$q_{kr} = Kq_1 = 5 \times 11 \times 10^6 = 55 \times 10^6.$$

მნიშვნელოვანია საქშენსა და ქანჩს შორის არსებული არის ზომა, სადაც მიეწოდება გამაცივებელი წყალი. ის უნდა კრიტიკულზე მეტი:

$$\delta_{წყ} > \delta_{წყ,კრ}.$$

$$\delta_{წყ,კრ} = G/\rho v \pi D = 1,7 \times 10^{-4} \text{ მ.}$$

აქ, G – წყლის ხარჯია; ρ – წყლის სიმკვრივეა; v – წყლის მიწოდების სიჩქარეა. აქედან გამომდინარე $\delta_{წყ,კრ}$ შეგვიძლია მივიღოთ 2×10^{-4} მ-ის ტოლად. ამრიგად, ზემოთ ჩატარებული გათვლების საფუძველზე დავადგინეთ, რომ მოცემული საწყისი მონაცემების მიხედვით საქშენის კედლის სისქე განმუხტვის არეში უნდა შეადგენდეს 5 მმ-ს, გარე დიამეტრი 23 მმ-ს, გამაცივებელი წყლის არის ზომა კი შეადგენს 0,2 მმ-ს.

გამოვთვალოთ საქშენის მუშაობის რესურსი. დავუშვათ, რომ საქშენის კედლის ეროზიის სიღრმე შეადგენს სისქის 50%-ს. $h_{ერ} = 2,5$ მმ. დაკარგული სპილენძის მასა შეადგენს:

$$m_{სპ} = 1/2\pi h_{ერ} \times h(1+2/3h) \times \rho_{სპ} = 4,867 \times 10^{-3} \text{ კგ.}$$

საქშენის მუშაობის რესურსი გამოითვლება შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$\tau = m_{სპ}/3600G_{სპ}I = 127 \text{ სთ.}$$

აქ $G_{სპ} = 5 \times 10^{-10}$ კგ/კ – სპილენძის კუთრი ეროზიაა.

ამგვარად, წარმოდგენილი საქშენის გაცივებისა და მუშაობის რესურსის გათვლის მეთოდის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნებისმიერი სიმძლავრის ირიბი მოქმედების პლაზმატრონებისათვის.

ნებისმიერი პლაზმატრონის გაცივების სისტემაში საიმედოდ უნდა იყოს დაცული ჰერმეტიზაცია.

ლიტერატურა

1. Быховский Д.Г. Плазменная резка. Ленинград. «Машиностроение». 1972 г.
2. Кличенко Г.Л., Ляпин А.А. Конструкции электродуговых плазмотронов. Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010 г. Ст. 56
3. Лашенко Г. И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев. «Экотехнология» 2003 г. Ст. 64 CD-4224
4. Лещинский Л. К., Самогутин С.С., и др. Плазменное поверхностное упрочнение. Киев. «Техника» 1990 г. Ст. 109. 681/523
5. Основы расчета плазмотронов линейной схемы /М.Ф. Жуков, А.С.Аньшаков. Новосибирск, 1979, 146 с.
6. Сабашвили З.В., Тавхелидзе Д.Д., Мchedlishvili З.Т., Водяной пар, как плазмообразующая среда// “Проблемы механики” Международный научный журнал N4(21)/2005 г.
7. Сабашвили З.В., Мамукашвили В.А., Цхведадзе Т.А., Тепловые характеристики плазменной дуги водяного пара//ю Сборник докладов IV Республиканской научно-технической конференции “Развитие процессов и технологии сварки в народном хозяйстве Грузии” .г. Батуми, 1992 г. ст. 42-49
8. Сабашвили З.В., Тавхелидзе Д.Д., Мchedlishvili З.Т. Возможности интенсификации охлаждения сопла плазматрона საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები. N1 (487). 2013 წ. გვ. 71-74
9. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка Ленинград. «Машиностроение». 1987 г. Ст. 192
10. საბაშვილი ზ., ხურციძე გ., მამუკაშვილი ვ. პლაზმური ჭრა წყლის ორთქლის გარემოში// III რესპუბლიკური სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებათა კრებული „შედულების პრობლემები საქართველოს სახალხო მეურნეობაში“. ქ. ქუთაისი. 1991 წ. 78-83 გვ.
11. საბაშვილი ზ., ხურციძე გ., მამუკაშვილი ვ. წყლის ორთქლის პლაზმური რკალის ელექტრული მახასიათებლები//III რესპუბლიკური სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებათა კრებული „შედულების პრობლემები საქართველოს სახალხო მეურნეობაში“ ქ. ქუთაისი. 1991 წ. 84-92 გვ.

12. საბაშვილი ზ., ხურციძე გ., სიამაშვილი ზ. პლაზმური რკალის პარამეტრებზე პლაზმატრონის შესასვლელზე წყლის ორთქლის ტემპერატურის გავლენის გამოკვლევა// სტუ-ს შრომები 5 (416). 1997 წ.
13. საბაშვილი ზ., თადუმაძე ზ., სულამანიძე ა., კოდუა ნ., მჭედლიშვილი ზ. არამიდების ბოჭკოვანი მაღალმტკიცე კომპოზიტების პლაზმური ჭრის ტექნოლოგია. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. N1 (65) 2013 წ. გვ. 110-113

რედაქტორი ვ. მალრაძე

გადაეცა წარმოებას 05.07.2018. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 19.09.2018. ქალაქის ზომა 60X84 1/8. პირობითი ნაბეჭდი თაბახი 8,5.

საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, კოსტავას 77



Verba volant,
scripta manent