

მისეილ ოქროსაშვილი, ნინო კენჭიაშვილი

მასალათმცოდნეობა

„ტექნიკური უნივერსიტეტი“

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მისეილ ოქროსაშვილი, ნინო კენჭიაშვილი

მასალათმცოდნეობა

ლექციების კურსი



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

თბილისი
2018

სალექციო კურსში განხილულია ტექნიკაში გამოყენებული შავი და ფერადი ლითონების, არაღიოთნური და კომპოზიციური საკონსტრუქციო მასალების აგებულება, თვისებები, გამოყენების სფეროები და ნაკეთობის თვისებათა სასურველი მიმართულებით შეცვლის ხერხები და საშუალებები. ყურადღება გამახვილებულია ელექტროტექნიკასა და ენერგეტიკაში გამოყენებული სპეციალური დანიშნულების მასალებზე, მათ სტრუქტურასა და თვისებებს შორის კავშირზე.

განკუთვნილია ენერგეტიკისა და ელექტროინჟინერიის სპეციალობის ბაკალავრიატის სტუდენტებისათვის.

რეცენზენტები: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობისა და ლითონების დამუშავების დეპარტამენტის პროფესორი, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი ზურაბ ლომსაძე,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტის პროფესორი, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი თემურ ძიგრაშვილი

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2018

ISBN 978-9941-20-977-2 (PDF)

<http://www.gtu.ge>

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

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

წიგნში მოყვანილი ფაქტების სიზუსტეზე პასუხისმგებელია ავტორი/ავტორები.

ავტორის/ავტორთა პოზიციას შეიძლება არ ემთხვეოდეს საგამომცემლო სახლის პოზიციას.



ეპა
თი

შესავალი

ტექნიკის განვითარების თანამედროვე დონე მანქანათა ნაწილების, ხელსაწყოების, სხვადასხვა კონსტრუქციის ელემენტისა და მოწყობილობის დასამზადებლად განსხვავებული თვისებების მქონე მასალებს მოითხოვს: რბილსა დასაღს, მაგნიტურრბილსა და მაგნიტურსაღს, არამაგნიტურს, მხურველმდეგსა და მხურვალმტკიცეს, კარგ ელექტროგამტარსა და მაღალი ელექტრული წინააღობის მქონე მასალებს. თავის მხრივ, საკონსტრუქციო მასალების საექსპლუატაციო მახასიათებლები მჭიდრო კავშირშია ლითონის ბუნებასა და მის შინაგან აგებულებასთან.

ლითონისა და შენადნობის პრაქტიკული მიზნებისათვის სწორად შერჩევა დაფუძნებულია მათი თვისებებისა და სასურველი მიმართულებით ამ თვისებათა შეცვლის ხერხების ცოდნაზე. ნაკეთობის საბოლოო საექსპლუატაციო მახასიათებლებს, გარდა მისი შედგენილობისა და სტრუქტურისა, მექანიკური, თერმული თუ დამუშავების სხვა ხერხები განაპირობებს. აქედან გამომდინარე, მასალათმცოდნეობის, როგორც გამოყენებითი მეცნიერების, კიდევ ერთ-ერთი უმთავრესი ამოცანაა ლითონებისა და შენადნობების დამუშავების სხვადასხვა ხერხით ზემოქმედების შედეგად, სტრუქტურის ტრანსფორმაციის გზით, თვისებათა სასურველი კომპლექსის მიღება. ამდენად, მასალათმცოდნეობა არის მეცნიერება, რომელიც შეისწავლის ლითონის შედგენილობას, აგებულებას, თვისებებს, თვისებათა შეცვლის მეთოდებს და მათ შორის კავშირს.

ტექნიკის ნებისმიერი დარგის შემდგომი პროგრესის საწინდარი სწორედ მასალათმცოდნეობის წინაშე დასმული პრობლემების წარმატებით გადაჭრაა.

თავი I

ლითონების ატომურ-კრისტალური აგებულება

1.1. ლითონების კლასიფიკაცია

სამრეწველო მასალები ორ დიდ ჯგუფად შეიძლება დაიყოს: ლითონებად და არალითონებად.

ადამიანის მიერ ლითონის გამოყენებას საკმაოდ დიდი ისტორია აქვს, რომლის დასაბამი ძვ. წ. VII–VI ათასწლეულებით თარიღდება. ლითონებიდან ადამიანი თავდაპირველად სპილენძს იყენებდა, შემდეგ სპილენძის შენადნობს – ბრინჯაოს, უფრო მოგვიანებით – რკინას და მის შენადნობებს – ფოლადს და თუჯს. ლითონების გამოყენების სფეროს გაფართოებასთან ერთად, გასული საუკუნის 50-იანი წლებიდან, ტექნიკაში ფართოდ შემოიჭრა სხვადასხვა სახის არალითონური მასალა. ზოგიერთი მათგანი ლითონების საკმაოდ ხელსაყრელი შემცვლელი აღმოჩნდა, ზოგმა კი თავისი უნიკალური თვისებების წყალობით მრეწველობის ისეთ სფეროებში დაიკავა ადგილი, სადაც ლითონი სრულიად გამოუსადეგარი აღმოჩნდა.

„ლითონი არის ღია ფერის სხეული, რომლის ჭედვა შეიძლება“, წერდა ლომონოსოვი დაახლოებით 200 წლის წინ. იმ დროისათვის სავსებით მისაღები ეს განმარტება დღეს აღარ გვაკმაყოფილებს, რადგან ლომონოსოვის დროს ჩამონათვალში ლითონების მცირე რაოდენობა შედიოდა (ოქრო, ვერცხლი, სპილენძი, კალა, თუთია და რკინა) და მათი მრავალი თვისება ცნობილი არ იყო.

ლითონის ძირითადი გარეგნული ნიშანი მისი ბზინვარებაა, რაც განპირობებულია დიდი არეკვლის უნარით. ლითონისათვის დამახასიათებელია კარგი სიმტკიცე, პლასტიკურობა, აგრეთვე მაღალი ელექტრო და თბოგამტარობა, რომლებიც ტემპერატურის შემცირებისას იზრდება.

ლითონებს ელემენტების გარკვეული ჯგუფი მიეკუთვნება, რომლებიც მენდელეევის პერიოდული სისტემის მარცხენა ნაწილშია განლაგებული. გარე ელექტრონულ გარსზე მათ 1–2 ელექტრონი აქვს, არალითონებს კი 5–6. ქიმიურ რეაქციებში ლითონები გასცემს სავალენტო ელექტრონებს და დადებით იონებად გადაიქცევა.

ლითონური თვისებებით ხასიათდება სუფთა ლითონები, მაგალითად, ალუმინი, სპილენძი, რკინა და ა.შ., ასევე უფრო რთული ნივთიერებებიც, რომელთა შედ-

გენილობაში შეიძლება შედიოდეს არა მარტო რამდენიმე სუფთა ლითონი, არამედ არალითონური ელემენტების მნიშვნელოვანი რაოდენობაც. ასეთ ნივთიერებებს ლითონურ შენადნობებს უწოდებენ.

დ. მენდელეევის პერიოდული სისტემა 80-მდე ლითონური ბუნების ელემენტს ითვლის, მაგრამ მრეწველობისათვის გადამწყვეტ როლს ყველა არ ასრულებს. ამიტომ ლითონების კლასიფიკაციას, უპირველეს ყოვლისა, ტექნიკისათვის მნიშვნელოვანი თვისებებიდან გამომდინარე აწარმოებენ.

ლითონები ორ დიდ ჯგუფად იყოფა: შავ და ფერად ლითონებად.

შავი ლითონებისათვის დამახასიათებელია ნაცრისფერი შეფერილობა, მაღალი სიმკვრივე (გარდა ტუტემიწა ლითონებისა), დნობის მაღალი ტემპერატურა და შედარებით მაღალი სისაღე. ამ ჯგუფის ტიპური წარმომადგენელია რკინა.

ფერადი ლითონები დამახასიათებელი შეფერილობით გამოირჩევა (მოწითალო, ყვითელი, თეთრი) და ხასიათდება მაღალი პლასტიკურობით, შედარებით დაბალი დნობის ტემპერატურით და სისაღით. ამ ჯგუფის ტიპური ლითონია სპილენძი.

ტექნიკაში გამოყენებულ შავ ლითონებს, თავის მხრივ, ყოფენ:

- რკინის ჯგუფის ლითონებად, სადაც რკინასთან ერთად გაერთიანებულია კობალტი, ნიკელი და თვისებებით მათთან ახლოს მდგომი მანგანუმი;

- ძნელდნობად ლითონებად, რომელთა დნობის ტემპერატურა აღემატება რკინის დნობის ტემპერატურას (1539°C). მათ რიცხვს მიეკუთვნება ვოლფრამი, რენიუმი, ტანტალი, მოლიბდენი, ნიობიუმი, ჰაფნიუმი, ვანადიუმი, ქრომი და ცირკონიუმი;

- ურანის ჯგუფის ლითონებად – აქტინოიდებად, რომლებიც უპირატესად ატომურ ენერგეტიკაში გამოიყენება;

- იშვიათმიწა ლითონებად – ლანთანი, ცერიუმი, ნეოდიუმი, პრაზეოდიუმი და სხვა, რომლებიც გაერთიანებულია ლანთანოიდების სახელწოდებით. ამ ჯგუფს მიაკუთვნებენ აგრეთვე თვისებებით მათთან ახლოს მდგომ იტრიუმსა და სკანდიუმს. იშვიათი მიწა ლითონები დანამატებად გამოიყენება შენადნობებში;

- ტუტემიწა ლითონებად, რომლებიც თავისუფალი სახით არ გამოიყენება, საგანგებო შემთხვევების გარდა.

ფერად ლითონებში ასხვავებენ:

- მსუბუქ ლითონებს (მაგნიუმი, $\gamma=1,7$ გ/სმ³, ბერილიუმი $\gamma=1,8$ გ/სმ³, ალუმინი $\gamma=2,7$ გ/სმ³);

- კეთილშობილ ლითონებს, როგორცაა ოქრო, ვერცხლი და პლატინის ჯგუფის ელემენტები. მათ რიცხვს მიაკუთვნებენ აგრეთვე „ნახევრად კეთილშობილ“ ლითონს – სპილენძს. კეთილშობილი ლითონები კოროზიისადმი მაღალი მდგრადობით ხასიათდება;

- ადვილდნობად ლითონებს – თუთიას, კალას, ტყვიას, დარიშხანს, ბისმუტს, თალიუმს, ვერცხლისწყალს და შემცირებული ლითონური თვისებების მქონე ელემენტებს – გალიუმსა და გერმანიუმს;

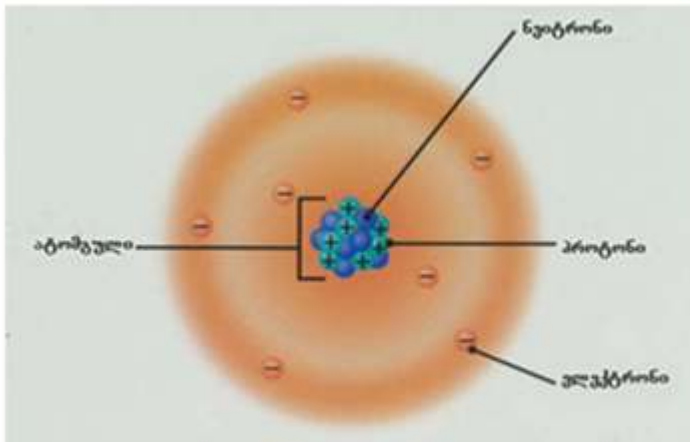
სისუფთავის მიხედვით ლითონებს პირობითად ყოფენ ტექნიკურად სუფთა, ქიმიურად სუფთა და განსაკუთრებული სისუფთავის ლითონებად. თუ ელემენტი ძირითად ლითონს 99,9%-ზე ნაკლები რაოდენობით შეიცავს (დანარჩენი მინარევებია), იგი ტექნიკურად სუფთაა; 99,9-დან 99,99%-მდე – ქიმიურად სუფთა, ხოლო 99,99%-ზე ზევით – განსაკუთრებული სისუფთავის.

1.2. ლითონისატომის აბეზულება

ლითონებისათვის დამახასიათებელი ფიზიკური და ქიმიური თვისებები, რითაც ისინი სხვა ელემენტებისგან განსხვავდება, ატომების ელექტრონული სტრუქტურით განისაზღვრება.

რეზერფორდის მოდელის თანახმად, ატომი შეიძლება წარმოვიდგინოთ დადებითად დამუხტული ბირთვის (ატომგულის) სახით, რომელიც გარშემორტყმულია უარყოფითად დამუხტული ელექტრონების ღრუბლით (სურ. 1.1). მიუხედავად იმისა, რომ ბირთვში ატომის თითქმის მთელი მასაა თავმოყრილი, მისი დიამეტრი (დაახლოებით 10^{-13} სმ) საკმაოდ მცირეა მთელი ატომის დიამეტრთან შედარებით (ატომის დიამეტრი 10^{-8} სმ რიგისაა). Z ნომრის მქონე ატომის დადებითი მუხტი, რომელიც ელექტრონის მუხტის ერთეულებშია გამოსახული ($e=4,8029 \cdot 10^{-10}$ ელ. სტატ. ერთეული), +Z-ის ტოლია. ამ მუხტის მატარებელია Z რაოდენობის პროტონი. ბუნებრივია, თითოეულს აქვს +e მუხტი და ისეთივე მასა, როგორიც წყალბადის ატომის ბირთვს (იგი 1836-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას). ატომის ბირთვი ისეთ ნაწილაკებსაც შეიცავს, რომლებიც მუხტს არ ატარებს. მათ ნეიტრონებს უწოდებენ. ნეიტრონის

მასა თითქმის პროტონის მასის თანაზომიერია. რადგან ნეიტრონებს მუხტი არ გააჩნია, ისინი ატომგულის მუხტს არ ცვლის, სამაგიეროდ, დიდი წვლილი შეაქვს ელემენტების ატომურ წონაში.



სურ. 1.1. ატომის ელექტრონული აგებულების მოდელი

ელემენტების დიდი ნაწილი ისეთი ატომებისგან შედგება, რომლებსაც ერთნაირი ატომური ნომრები აქვს, მაგრამ განსხვავდება ატომური წონით. ასეთი ატომები პროტონების თანაბარ რაოდენობას შეიცავს (რომელიც ატომური Z ნომრის ტოლია), თუმცა ნეიტრონების რიცხვი განსხვავებულია, რაც ე.წ. იზოტოპების წარმოქმნას განაპირობებს. ამგვარად, იზოტოპები ეწოდება ერთი და იგივე ქიმიური

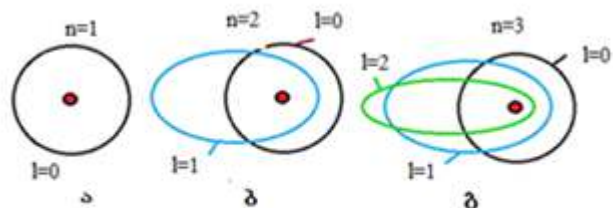
ელემენტის ატომებს, რომლებსაც სხვადასხვა ატომური წონა, მაგრამ ერთნაირი ქიმიური ბუნება აქვს. იზოტოპები ფიზიკური თვისებებით უმნიშვნელოდ განსხვავდება ერთმანეთისგან. მათ ერთი და იგივე ადგილი უკავია პერიოდულ სისტემაში.

ატომგული კიდევ ერთი ბუნების მქონე ნაწილაკებს შეიცავს, რომლებსაც მეზონები ეწოდება. ისინი შეიძლება იყოს ნეიტრალური ან როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მუხტის მატარებლები. მეზონები ნეიტრონებსა და პროტონებს შორის კავშირს ახდენს. აღსანიშნავია, რომ ატომგულში თავმოყრილი ნაწილაკების (პროტონების გარდა) გავლენა ელემენტების ქიმიურ თვისებებზე ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი.

ელექტრონულად ნეიტრალურ ატომში ატომგულის Z რაოდენობის პროტონებს იგივე რაოდენობის ორბიტალური ელექტრონები შეესაბამება. ბორის თეორიის თანახმად, ელექტრონები ატომგულიდან შეიძლება საკმაოდ შორ მანძილზე მოძრაობდეს, მაგრამ დროის დიდ მონაკვეთში გარსის მკაცრად ფიქსირებულ ზღვრებშიუნდა იმყოფებოდეს, რომელსაც n მთავარი კვანტური რიცხვი განსაზღვრავს. იდეზულობს მნიშვნელობებს: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7 და, შესაბამისად, აღინიშნება სიმბოლოებით: K; L; M; N; O; P; Q. ელექტრონულ გარსშიელექტრონების რაოდენობა

$2n^2$ -ის ტოლია. მთავარი კვანტური რიცხვი დაკავშირებულია ელექტრონების ენერგიასთან.

ელექტრონულ გარსში ელექტრონები ქვეგარსებადაა (ქვედონეებად) განლაგებული. ქვეგარსებში ელექტრონების მდგომარეობა ორბიტალურ ℓ კვანტურ რიცხვს შეესაბამება, ღებულობს ნულიდან $(n-1)$ -მდე მნიშვნელობებს. ქვეგარსებში ელექტრონების მაქსიმალური რიცხვი $2(2\ell + 1)$ -ის ტოლია. ამგვარად, $\ell=0$; 1; 2; 3 მნიშვნელობები დაკავშირებულია ქვეგარსებთან, რომლებიც s; p; d; f სიმბოლოებით აღინიშნება. ორბიტალური კვანტური რიცხვი იმ ორბიტის ფორმას განსაზღვრავს, რომელზეც ელექტრონები მოძრაობს. როდესაც $\ell = 0$, ორბიტა წრიულია (სურ. 12, ა). თუ $\ell = 1$, ორბიტის ფორმა ელიფსში გადადის (ბ). ℓ სიდიდის მნიშვნელობის შემდგომი ზრდა ელიფსის სულ უფრო და უფრო მეტ წაგრძელებას იწვევს (გ).



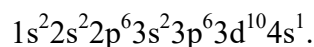
სურ. 12. ელექტრონების ორბიტის ფორმა 1 კვანტურ რიცხვზე დამოკიდებულებით

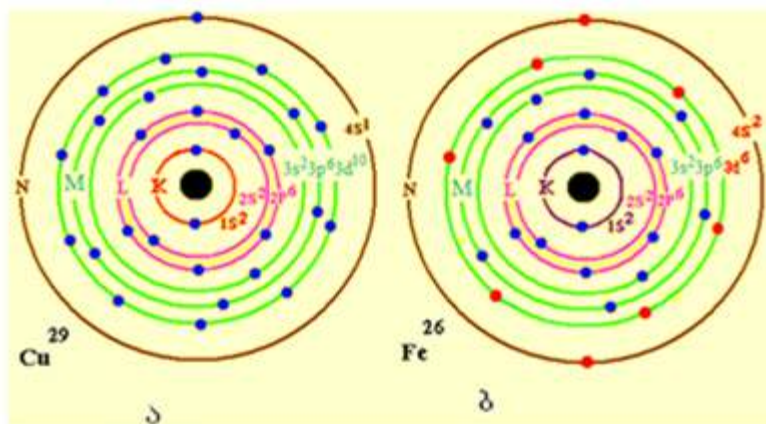
ზემოთქმულიდან გამომდინარე, K გარსი შეიძლება შეიცავდეს მხოლოდ s ტიპის ორბიტალს, L გარსი – s და p ტიპის ორბიტალებს, M გარსი – s, p და d ტიპის ორბიტალებს და ა.შ. ანუ მთავარი კვანტური რიცხვის ყოველი

ერთეულით გაზრდას ახალი ქვეგარსების გაჩენა ახლავს.

ამგვარად, მენდელეევის პერიოდული სისტემის შესაბამისად, დაბალი რიგითი ნომრის ელემენტიდან მომდევნოზე გადასვლისას ენერგეტიკული ქვედონეების ელექტრონებით თანდათანობითი შევსება მიმდინარეობს. ჯერ ივსება უმცირესი ენერგიის მქონე დონეები, შემდეგ შედარებით უფრო მაღალი ენერგიის.

ელემენტების ელექტრონული კონფიგურაციის ანუ კვანტური მდგომარეობის აღწერისათვის სპეციალური აღნიშვნები შემოღებული: თავდაპირველად იწერება მთავარი კვანტური რიცხვის აღმნიშვნელი ციფრი, შემდეგ – შესაბამისი ქვედონეების სიმბოლოები s; p; d; f, რომლებსაც ზედა რეგისტრში ხარისხის მაჩვენებლად მითითებული აქვს ამ ქვედონეზე ელექტრონების რაოდენობა. მაგალითად, სპილენძის ატომისათვის, რომლის რიგითი ნომერია 29, ელექტრონული კონფიგურაცია შემდეგნაირად ჩაიწერება:



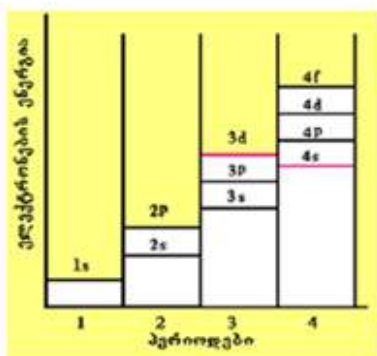


სურ. 13. სპილენძისა (ა) და რკინის (ბ) ატომების ელექტრონული აგებულების მოდელი

1.3, ა სურათზე წარმოდგენილია სპილენძის ატომის ელექტრონული აგებულების მოდელი.

მრავალ ლითონში ელექტრონული გარსის ნორმალურად შევსება შეინიშნება 3p დონემდე, შემდეგ ელექტრონებით ქვედონეების შევსების ზემოთ აღწერილი თან-

მიმდევრობა ირღვევა. ამის მიზეზი, როგორც 1.4

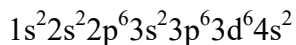


სურ. 14. ატომში ელექტრონების ელექტრონული მდგომარეობის სქემა

სურათზე წარმოდგენილ სქემაზე ჩანს, იმაში მდგომარეობს, რომ 4s ენერგეტიკული დონე უფრო ნაკლებია 3d დონესთან შედარებით. ახალი, 4s ქვეგარსის შევსება მანამიწეება, სანამ ბოლომდე შეივსება წინამდებარე. ამიტომ, ლითონების დიდ ჯგუფს, რომელშიც შედის Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co და Ni, შეუვსებელი აქვს 3d შრე, მაშინ როდესაც 4s შრეზე ერთი ან ორი ელექტრონი გააჩნია.

მაგალითად რკინა, რომლის რიგითი ნომერია 26,

3d შრეზე 10-ის ნაცვლად 6 ელექტრონს შეიცავს (სურ. 13, ბ):



შეუვსებელი ქვედონეების ელექტრონებით შევსება მხოლოდ მას შემდეგ მიმდინარეობს, როდესაც უფრო მაღალი ენერგიის 4s, 5s და 6s ქვედონეები შესაბამისად შეივსება ელექტრონებით.

n მაქსიმალური რიცხვის მქონე s და p ქვედონეების ელექტრონები სავალენტო

ელექტრონებს წარმოადგენს. თუ s ქვედონე ან s და p ქვედონეები სრულად არის შევსებული ელექტრონებით, ატომი ქიმიურად ნეიტრალურია.

გარე ელექტრონული ორბიტების (ქვედონეების) შევსების ხარისხის მიხედვით ელემენტებს ორ ჯგუფად ყოფენ. ლითონებს, რომლებსაც არ გააჩნია d ქვედონე (მცირე ატომური ნომრის ლითონები – Li, Na, K, Al და სხვა) ან აღნიშნული ქვედონე სრულად აქვს შევსებული ელექტრონებით (Cu, Zn, Cd, Ag და ა.შ.), უბრალო ლითონებს უწოდებენ, ხოლო ლითონებს, რომლებსაც ნაწილობრივ აქვს შევსებული d ქვედონე, მაშინ, როდესაც ჩამოყალიბებულია გარე s ელექტრონული ქვედონე – გარდამავალ ლითონებს.

$3d$ შევსებული შრე ლითონების მრავალ სპეციფიკურ თვისებას განაპირობებს: ცვლად ვალენტობას, პოლიმორფიზმს, პარამაგნეტიზმს, ზოგიერთი ლითონის (Fe, Ni, Co, Gd, Er, Tu, Ho) ფერომაგნეტიზმს, კრისტალებში შეჭიდულობის დიდ ძალებს, სუბლიმაციისა და დნობის მაღალ ტემპერატურას, დაბალ ელექტროგამტარობას, მიდრეკილებას კარბიდების წარმოქმნისადმი (ამ შემთხვევაში ნახშირბადის ატომის მიერ გაცემული სავალენტო ელექტრონი $3d$ შრეს ავსებს) და ა.შ. კარბიდების წარმოქმნისადმი მიდრეკილება, კარბიდების მდგრადობა, მათი სისაღე და წარმოქმნის ტემპერატურა მით უფრო მაღალია, რაც უფრო მეტია ელექტრონული ორბიტის შევსებულობის ხარისხი.

ატომის ელექტრონული მდგომარეობა კიდევ ორი – ორბიტალური მაგნიტური m_l და m_s სპინური კვანტური რიცხვებით განისაზღვრება.

ორბიტალური მაგნიტური კვანტური რიცხვი ახასიათებს ელიფსური ორბიტის ორიენტაციას და შეიძლება მიიღოს ნებისმიერი მნიშვნელობა $+l$ -დან $-l$ -მდე ნულის ჩათვლით. ამდენად, იგი ორბიტების რიცხვს ზღუდავს, p , d და f ქვეგარსებში.

ატომგულის გარშემო ელექტრონის ბრუნვა წრიულ დენს და მასთან დაკავშირებულ მაგნიტურ მომენტს წარმოქმნის. ამიტომ ელექტრონს, მიუხედავად მისი ორბიტალური მოძრაობისა, საკუთარი კუთრი მომენტიც აქვს, რომელსაც სპინურ მომენტს, ან, უბრალოდ, სპინს უწოდებენ.

მეოთხე სპინური კვანტური რიცხვი სწორედ ელექტრონის სპინის მიმართულებასთან არის დაკავშირებული. ამდენად, სპინური კვანტური რიცხვი მაგნიტური მომენტის კომპონენტია, რომელიც ელექტრონის მბრუნავი მაგნიტური მომენტით – სპინით აღიძვრება. იგი მხოლოდ ორ მნიშვნელობას ღებულობს $-m_s = \pm 1/2$. მაშასადამე, ყოველი

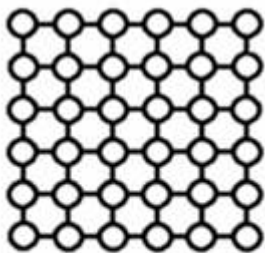
ორბიტა, რომელიც ℓ , m_ℓ და m_s კვანტური რიცხვებით განისაზღვრება, შეიძლება შეიცავდეს ორ ელექტრონს ურთიერთსაპირისპირო სპინებით $-m_s=+1/2$ და $m_s=-1/2$.

ყოველი ელექტრონული მდგომარეობა გარკვეულ ენერგიასთან არის დაკავშირებული, ამიტომ ატომის სრული ენერგია Z-ორბიტალური ელექტრონების ენერგიების შეჯამებით უნდა განისაზღვრებოდეს. პაულის აკრძალვის პრინციპის თანახმად, მოცემულ ენერგეტიკულ მდგომარეობაში, რომელიც n , ℓ , m_ℓ და m_s ოთხი კვანტური რიცხვით განისაზღვრება, არ შეიძლება არსებობდეს ერთზე მეტი ელექტრონი. ამიტომ, ნებისმიერი ელემენტის ატომში Z ელექტრონები ისეთნაირად გადანაწილდება ნებადართულ მდგომარეობაში, რომ ატომის საერთო ენერგია მინიმალური აღმოჩნდეს.

1.3. ლითონის კრისტალური აგებულება

1.3.1. კრისტალური გისოსის ტიპები კრისტალებში

დადგენილია, რომ ყველა ლითონი კრისტალური აგებულებით ხასიათდება. კრისტალურ ნივთიერებებში, ამორფულისაგან განსხვავებით, ატომები სივრცეში განლაგებულია არა ნებისმიერად, არამედ მოწესრიგებულად, გარკვეული კანონზომიერებით.



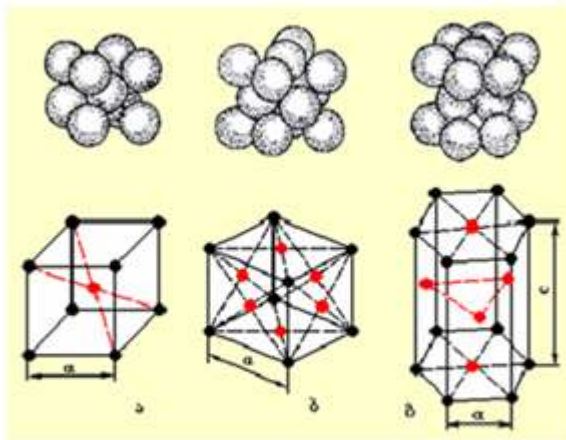
სურ. 1.5. სივრცითი გისოსის კრისტალოგრაფიული სიბრტყე

ასეთი მოწესრიგებული, კანონზომიერი განლაგების შედეგად ატომები წარმოქმნის წარმოსახვით სივრცით კრისტალურ გისოსს, რომლის კვანძებში თვითონაა განლაგებული. 1.5. სურათზე წარმოდგენილია სივრცითი გისოსის ერთ-ერთი კრისტალოგრაფიული სიბრტყე.

კრისტალური გისოსი რაიმე სწორი გეომეტრიული ნაკვთის მრავალჯერადი განმეორებაა სივრცეში. გისოსის ელემენტარულ ნაწილს, რომელიც მრავალჯერ მეორდება სივრცეში, კრისტალური გისოსის ელემენტარული უჯრედი ეწოდება.

ლითონებში ყველაზე მეტად სამი სახის კრისტალური გისოსია გავრცელებული: სივრცით დაცენტრებული კუბი (სურ. 1.6, ა), წახნაგდაცენტრებული კუბი (ბ) და ჰექსაგონური პრიზმა (გ).

კრისტალური გისოსი, გარდა გეომეტრიული ფორმისა, ხასიათდება პარამეტრებით ანუ პერიოდებით. პარამეტრი ეწოდება ატომთა შორის მანძილს სამი სხვა-



სურ. 1.6. კრისტალური გისოსის ელემენტარული უჯრედის სქემა:
 ა) სივრცით დაცენტრებული კუბი; ბ) წახნაგდაცენტრებული
 კუბი; გ) მკვსაგონალური პრიზმა

დასხვა მიმართულებით. იგი აღინიშნება a , b და c ასოებით და იზომება ანგსტრემებით ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ სმ}$) ან ნანომეტრებით ($1 \text{ ნმ} = 10^{-9} \text{ სმ}$).
 ჰექსაგონურ პრიზმაში თუ შიგასამი ატომი ზედა და ქვედა წახნაგების ატომებსეხება, პარამეტრების შეფარდება $c/a = 1,633$. ასეთ გისოსს მჭიდრო გისოსი ეწოდება.

კრისტალური გისოსის სიმჭიდროვეს ახასიათებს მოცემული ატომიდან ტოლ და უმოკლეს მან-

ძილზე დაშორებული ატომების რიცხვი, რომელსაც საკოორდინაციო რიცხვი ეწოდება. უბრალო კუბური გისოსისათვის იგი ტოლია 6-ის, სივრცით დაცენტრებული კუბისათვის – 8, ხოლო წახნაგდაცენტრებული კუბისა და მჭიდრო ჰექსაგონური პრიზმისათვის – 12. კრისტალური გისოსის შემოკლებულიაღნიშნისათვის მისი საკოორდინაციო რიცხვითსარგებლობენ:

უბრალო კუბური	კ	კ 6
კუბური სივრცით- დაცენტრებული	სდკ	კ 8
კუბური წახნაგ- დაცენტრებული	წდკ	კ 12
მჭიდრო ჰექსაგონური	მჰ	კ 12

1.3.2. კრისტალური აღნაგობის დეფექტები

ჩვენ მიერ ზემოთ განხილული კრისტალები გარკვეულად იდეალიზებულია. კრისტალური გისოსი წარმოდგენილი იყო, როგორც ელემენტარული უჯრედის მრავალჯერადი განმეორება, სადაც ყველა გეომეტრიული კვანძი სათანადო ლითონის ატომებით იყო დაკავებული. რეალური კრისტალები მოკლებულია ასეთ აბსოლუტურ სისწორეს და ყოველთვის დამახინჯებულია. რეალურ კრისტალებში გვხვდება წერტილოვანი, ხაზოვანი და სტრუქტურული დეფექტები.

წერტილოვან დეფექტებს მიეკუთვნება ვაკანსია, კვანძებს შორის (დისლოცირებული) ატომი და უცხო ატომი.

ვაკანსია თავისუფალი ადგილია კრისტალურ გისოსში (სურ.1.7, ა). იგი წარმოიქმნება გისოსის კვანძებიდან ატომის მოწყვეტით და გადასვლით კრისტალის ზედაპირზე ან სრული აორთქლებით. თუ რეგულარული მდგომარეობიდან ამოვარდნილი ატომი დაიკავეს ადგილს გისოსის კვანძებს შორის, მას კვანძებს შორის ატომი ეწოდება (ბ).

ოთახის ტემპერატურაზე ვაკანსიების რიცხვი მეტად მცირეა ატომების საერთო რიცხვთან შედარებით – 1 ვაკანსია მოდის 10^{18} ატომზე. ტემპერატურის გაზრდა, რადიოაქტიური ნაწილაკებით დასხივება, ზედაპირული ხახუნი და ა.შ. იწვევს ვაკანსიების რაოდენობის ზრდას ანუ ლითონის გაფაშრებას. ექსტრემალურ შემთხვევაში 100 ატომზე შეიძლება 1–3 ვაკანსიამოდოდეს.



სურ. 1.7. წერტილოვანი დეფექტების სქემა.
ა – ვაკანსია; ბ – კვანძებს შორის ატომი; გ – უცხო ატომი

უცხო ანუ მინარევის ატომი, რომელიც ლითონში სხვადასხვა მიზეზით შეიძლება მოხვდეს, ადგილს იკავებს კრისტალური გისოსის კვანძებში, სადაც ცვლის ძირითადი ლითონის ატომებს ან კვანძებს შორის ჩაინერგება

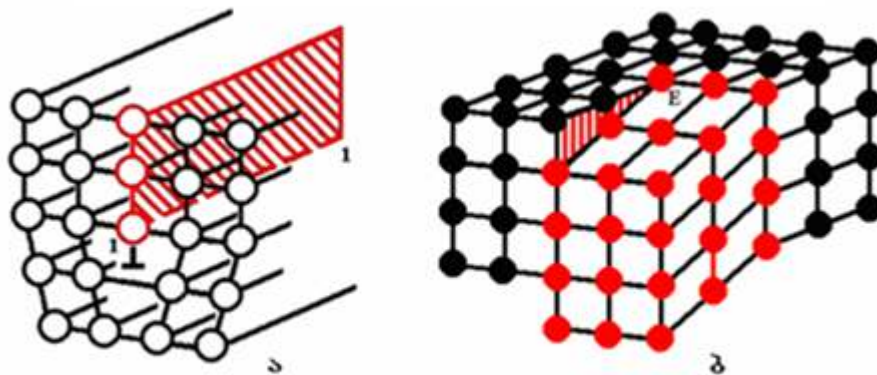
(სურ.1.7, გ). უცხო ატომი მინარევის სახით ყოველთვის არსებობს როგორც ტექნიკურად სუფთა, ისე საკმაოდ მაღალი სისუფთავის ლითონებში.

აღნიშნული დეფექტები ამახინჯებს კრისტალური გისოსის სწორ გეომეტრიულ ფორმას, რაც იწვევს ლითონის ფიზიკური და მექანიკური თვისებების შეცვლას. კერძოდ, ელექტროწინააღობისა და სიმტკიცის მახასიათებლები ზრდება, პლასტიკურობა კი მცირდება.

ბევრ ნახევარგამტარში მინარევების რაოდენობა არ უნდა აღემატებოდეს ერთ მემილიარდედ პროცენტს, ხოლო მათი კრისტალური აგებულება იდეალურს უნდა უახლოვდებოდეს.

ხაზოვან დეფექტებს დისლოკაცია მიეკუთვნება. იგი არის გისოსის ლოკალური დამახინჯება, რაც გამოწვეულია კრისტალში „ზედმეტი“ ატომური ნახევარსიბრტყისე.წ. ექსტრასიბრტყის გაჩენით (სურ. 1.8, ა). ექსტრასიბრტყის 1-1 კიდე ე.წ. კი-

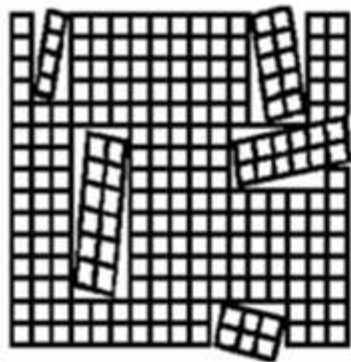
დურა დისლოკაციასწარმოქმნის. დისლოკაცია სივრცეში შეიძლება გისოსის რამდენიმე ათას პარამეტრზეგაგრძელდეს, შეიძლება იყოს სწორი ან გაიღუნოს და ბოლოს, დაეხვეს და მიიღოს სპირალის ფორმა. ამ უკანასკნელს ხრახნული დისლოკაცია ეწოდება (ბ). კრისტალში შეიძლება წარმოიქმნას 1,8, ა სურათზე წარმოდგენილი დისლოკაციისაგან განსხვავებული შებრუნებული დისლოკაცია, როდესაც ზედმეტი ატომური ნახევარსიბრტყე „ჩასოლილი“ აღმოჩნდება არა ზემოდან, არამედ ქვემოდან. პირველს დადებით, ხოლო მეორეს – უარყოფით დისლოკაციას უწოდებენ. დადებითი დისლოკაცია აღინიშნება $\perp$ სიმბოლოთი, ხოლო უარყოფითი – $\top$. ერთი და იგივე ნიშნის დისლოკაციები ერთმანეთისგან განიზიდება, ხოლო საწინააღმდეგო ნიშნისა – მიიზიდება.



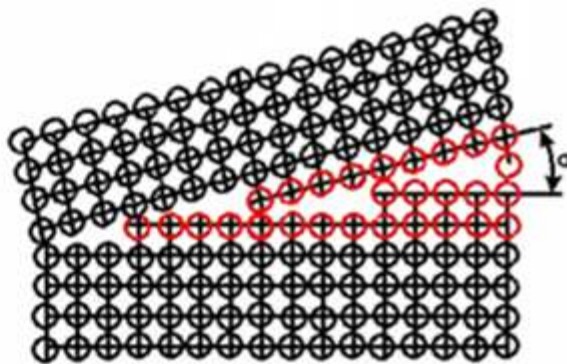
სურ. 1.8. კიდურა (ა) და ხრახნული (ბ) დისლოკაციების სქემა

ერთ-ერთ სტრუქტურულ დეფექტს მოზაიკური სტრუქტურა მიეკუთვნება. მარცვალნი არ არის ისეთი მონოლითური კრისტალი, რომელიც შედგენილი იქნება მკაცრად პარალელური კრისტალოგრაფიული სიბრტყეებისაგან. სინამდვილეში, ელემენტარული უჯრედების ყველა ჯგუფი ერთმანეთის მიმართ შემობრუნებულია მცირე კუთხით ($\theta=0,3-4^\circ$). ასეთი დამახინჯებით მიღებულ სტრუქტურას მოზაიკურს უწოდებენ (სურ. 1.9), ხოლო მის შემადგენელ ბლოკებს – მოზაიკის ბლოკებს. ბლოკების ურთიერთშეუღლება დისლოკაციებით ხორციელდება (სურ. 1.10).

ხშირად ბლოკები უფრო მსხვილ აგრეგატებად – ფრაგმენტებად ერთიანდება, რომლებიც ერთმანეთის მიმართ რამდენიმე გრადუსითაა ($\theta=5-10^\circ$) შემობრუნებული. დასასრულ, ფრაგმენტები ერთიანდება მარცვალში. მარცვლები ერთმანეთის მიმართ რამდენიმე ათეული გრადუსითაა დეზორიენტირებული.



სურ. 1.9. მოზაიკური სტრუქტურის სქემა



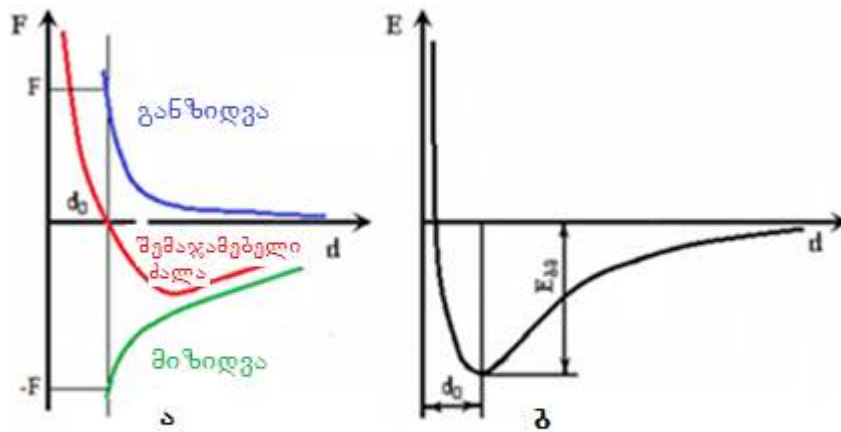
სურ. 1.10. ბლოკებს შორის საზღვრის სქემა

14. ატომთა შორის კავშირის ტიპები კრისტალებში

1.4.1. ზოგადი მიმოხილვა

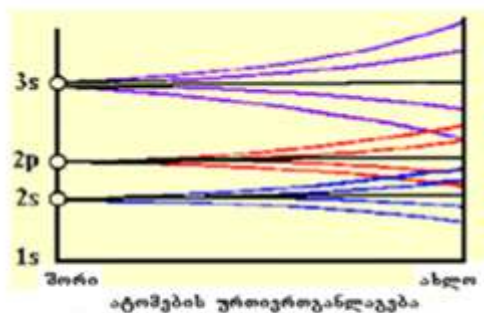
კრისტალში ელემენტარულ ნაწილაკებს შორის კავშირის ტიპს ურთიერთქმედებაში მყოფი ატომების ელექტრონული აგებულება განსაზღვრავს. ელემენტარული ნაწილაკები ერთმანეთს გარკვეულმანძილზე უახლოვდება, რაც კრისტალს გაზრდილ თერმოდინამიკურ სტაბილურობას ანიჭებს. ნაწილაკებს შორის მანძილს იმ მოქმედი ძალების ბუნება და სიდიდე განსაზღვრავს, რომლებიც იონებს, ატომებსა თუ მოლეკულებს კრისტალური გისოსის კვანძებში აკავებს. მიზიდვის ძალები ელექტრონებისა და დადებითად დამუხტული ატომის ბირთვებთან ურთიერთქმედების შედეგად აღიძვრება, ხოლო განზიდვისა – დადებითად დამუხტული მეზობელი ატომგულების ურთიერთქმედებით გარკვეულ მანძილზე მათი მიახლოებისას. ატომების მიახლოებასთან ერთად განზიდვის ძალები უფრო და უფრო მეტი ინტენსიურობით იზრდება მიზიდვის ძალებთან შედარებით (სურ. 1.11). ძალების გაწონასწორება ელემენტარული ნაწილაკების რაღაც დიმანძილზე მიახლოებისას ხდება, რომელსაც ენერგიის მინიმუმი შეესაბამება და კრისტალი თერმოდინამიკურად სტაბილურ მდგომარეობაში გადადის. მას ბმის ენერგიას ($E_{\text{ბმ}}$) უწოდებენ. სწორედ ბმის ენერგია განსაზღვრავს ისეთ ფიზიკურ თვისებებს, როგორიცაა დნობისა და აორთქლების ტემპერატურა, დრეკადობის მოდული, წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი და ა.შ.

ლითონებში ატომები იმდენად ახლო მანძილზეა განლაგებული, რომერთმანეთის ელექტრომაგნიტური ველის ძლიერ ზემოქმედებას განიცდიან, რაც მათი ენერგეტიკული მდგომარეობის შეცვლას იწვევს – ქვედონეები იხლიჩება და ენერგეტიკულ ზო-



სურ. 1.11. ურთიერთქმედების ძალისა (ა) და ბმის ენერგიის (ბ) ცვლილების ხასიათი კრისტალში ატომების მიახლოებისას

ნებად გარდაიქმნება (სურ. 1.12). ენერგეტიკული ზონების გადაფარვა სავალენტო ელექტრონების მიმოცვლისა და გაერთიანების შესაძლებლობას იძლევა. სავალენტო ზონების



სურ. 1.12. ენერგეტიკული ზონების წარმოქმნის სქემა

ელექტრონებით შევსების ხარისხს ელექტრული და თბური თვისებები განსაზღვრავს.

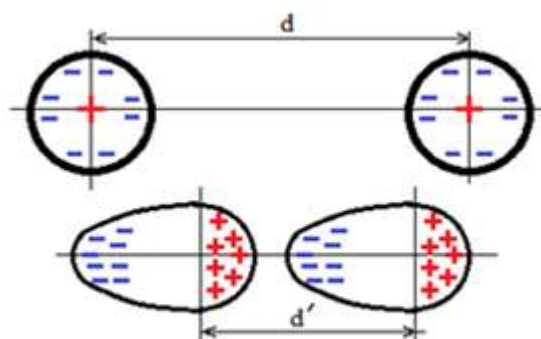
მყარ სხეულებში ნაწილაკებს შორის კავშირი ელექტრული ხასიათისაა, მაგრამ იგი სხვადასხვა კრისტალში სხვადასხვაგვარად მუდგენდება. ბმის უპირატესი ხასიათის მიხედვით კრისტალები იყოფა მოლეკულურ, კოვალენტურ, იონურ და ლითონურ კრისტალებად. თუმცა ასეთი დაყოფა პირობითია, რადგან ზოგიერთ შემთხვევაში

კრისტალებში შეიძლება არა ერთი, არამედ რამდენიმე ტიპის ბმის ძალები მოქმედებდეს.

1.4.2. მოლეკულური კავშირი

მოლეკულურ კრისტალებში ატომებს შორის კავშირი უპირატესად ვან-დერ-ვაალსის ძალებითაა განპირობებული. ასეთი კავშირი აღიძვრება ნებისმიერ ელემენტარულ ნაწილაკებს (იონებს, ატომებს, მოლეკულებს) შორის, თუმცა კრისტალების უმრავლესობისათვის იგი მცირე სიდიდისაა სხვა, უფრო მნიშვნელოვან ძალებთან შედარებით. მიუხედავად ამისა, ვან-დერ-ვაალსის ძალები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მდგომარეობაში ინერტულიდა ორატომიანი აირების სტრუქტურის ჩამოყალიბებაში, აგრეთვე ზოგიერთ ანიზოტროპულ კრისტალებში, მაგალითად, სე-

ლენში, სადაც ვან-დერ-ვაალსის კავშირები გარკვეულ კრისტალოგრაფიულ მიმართულებებში წარმოებს.



სურ. 1.13. დიპოლების წარმოქმნა არგონის ატომების მიახლოებისას

ინერტული აირის კრისტალებში ვან-დერ-ვაალსის კავშირი ერთადერთია და, ამდენად, სწორედ იგი განსაზღვრავს კრისტალების სტრუქტურასა და თვისებებს.

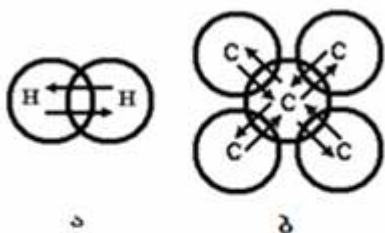
ინერტული აირის ატომებს ელექტრონული დონეები შეესებულებოდა აქვს, ამიტომ ატომების მიახლოებისას ელექტრონების მიმოცვლა შეუძლებელია. ასეთ შემთხვევა

ი ატომთა შორის მიზიდვის ძალების აღძვრას ატომების მყის პოლარიზაციას უკავშირებენ (სურ. 1.13).

ამგვარად, ვან-დერ-ვაალსის კავშირის ძალები მეტად სუსტია, ამიტომ მოლეკულური კრისტალები დაბალი დნობისა და აორთქლების ტემპერატურით ხასიათდება და მრავალი მათგანი ნორმალურ პირობებში აირად მდგომარეობაში იმყოფება. ასეთი კრისტალები დიელექტრიკებია. ამასთან, მათი ელექტრული თვისებები ცალკეული ატომების ან მოლეკულების თვისებებით განისაზღვრება და უმნიშვნელოდ იცვლება მყარი მდგომარეობიდან თხევად ან აირად მდგომარეობაში გადასვლის დროს.

1.4.3. კოვალენტური კავშირი

კოვალენტური კავშირი ხორციელდება ერთი და იგივე ან რამდენიმე ქიმიურ ელემენტს შორის, რომლის გარე გარსის ელექტრონებით შევსების ხარისხი ნახევარი ან ნახევარზე რამდენადმე მეტია.

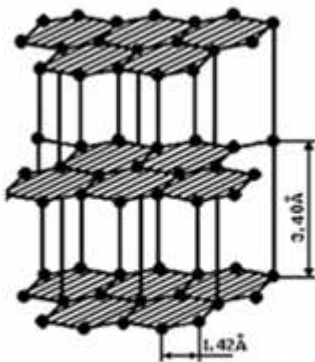


სურ. 1.14. კოვალენტური კავშირის სქემა წყალბადსა (ა) და ალმასში (ბ)

კოვალენტური კავშირი განიხილება, როგორც ორი ატომის ელექტრონების მიმოცვლითი ურთიერთქმედება, რომლის შედეგად რეზონანსული ეფექტი აღიძვრება ანუ ელექტრონები ნაწილობრივ ორივე ატომის კუთვნილება ხდება, მაგრამ არც ერთზემდებულები არ არის. ამგვარად, კოვალენტური კავშირის განხორციელებისას მეზობელი ატომების გარე შრის ელექტრონები ერთიანდება და წარმოქმნის ელექტრონების წყვილს ურთიერთსაპირისპირო მიმართულების მაგნიტური მომენტებით.

მაგალითად, წყალბადის მოლეკულის შემთხვევაში კოვალენტური ბმა ორი ურთიერთ-საპირისპირო სპინის მქონე ელექტრონით ხორციელდება (სურ.1.14, ა). მოლეკულის ორივე ელექტრონი წყალბადის ორივე ატომს ეკუთვნის და მუდმივად „ქანაობს“ ერთი ატომიდან მეორეზე, რა დროსაც მიმოცვლითი კოვალენტური ძალები წარმოიქმნება. მაშასადამე, ჩნდება იმის ტენდენცია, რომ ორივე ურთიერთმოქმედი ატომის გარსი გაჯერდეს ელექტრონებით.

შედარებით უფრო რთულია კოვალენტური კავშირი მრავალელექტრონიან ატომებში, თუმცა ხარისხობრივად სურათი ისეთივეა, როგორიც ზემოთ განვიხილეთ. მაგალითად, ალმასში, რომელიც $1s^2 2s^2 2p^2$ ელექტრონული კონფიგურაციის მქონენაპირბადის ატომებისგან შედგება, მეზობელ ატომებს შორის კოვალენტური კავშირი იმ სავალენტო ელექტრონების წყვილებით ხდება, რომლებიც მათ საერთო შემაკავშირებელ ორბიტალზე განთავსებული. ამდენად, ოთხ მეზობელ ატომს შორის ბმა ოთხი მიმართულებით ოთხი სავალენტო ელექტრონით წარმოებს (სურ. 1.14, ბ).



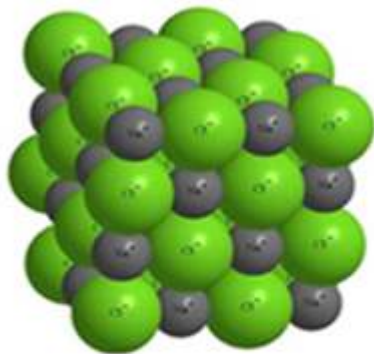
სურ. 1.15. ატომების წყობა გრაფიტში

გრაფიტის რთული ჰექსაგონური გისოსის (სურ. 1.15) ფუძის სიბრტყეებში სამ ატომს შორის მოქმედებს ბმის კოვალენტური ძალები, ხოლო ფუძეებს შორის კავშირი ვან-დერ-ვაალსის სუსტი ძალებით ხდება. ამიტომ, გრაფიტის დეფორმაციის დროს, უპირველეს ყოვლისა, ფუძეებს შორის სუსტი კავშირი წყდება, რითაც შეიძლება აიხსნას გრაფიტის დაბალი სისაღე. წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად მაღალია ვან-დერ-ვაალსის ძალების მოქმედების მიმართულებით.

კოვალენტური კავშირი უპირატესად მყარდება სხვადასხვა ბუნების ატომს შორის ისეთ ქიმიურ ნაერთებში, როგორიცაა კარბიდები (Fe_3C , SiC) და ნიტრიდები (AlN). კოვალენტური ბმის მაღალი ენერგია განაპირობებს დნობისა და აორთქლების ასევე მაღალ ტემპერატურებს (ალმასისათვის დნობის ტემპერატურა 5000°C შეადგენს).

14.4. იონური კავშირი

იონური კავშირი სხვადასხვა ვალენტობის ელემენტს შორის ხორციელდება. ატომების მიახლოებისა და სავალენტო ზონების გადაფარვის შედეგად მიმდინარეობს ელექტრონების გადანაწილება: ელექტროდადებითი ელემენტი კარგავს სავალენტო ელექტრონს და დადებით იონად გადაიქცევა, ხოლო ელექტროუარყოფითი – იერთებს ამ ელექტრონს და სავალენტო ზონას მდგრად კონფიგურაციამდე (როგორც ინერტულ აირებს აქვს) ავსებს. ამგვარად, იონური კავშირი დადებითად და უარყოფითად დამუხ-

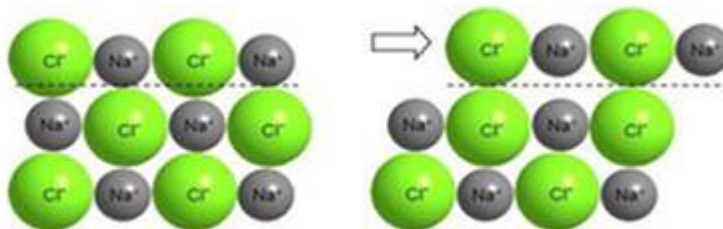


სურ. 1.16. იონური კავშირის მოდელი
Na-Cl-ის კრისტალში

ტულ იონებს შორის წარმოებს ელექტროსტატიკური მიზიდვის ძალებით. იონური კავშირი მრავალ არაორგანულ დიელექტრიკს ახასიათებს, როგორიცაა, მაგალითად, Al_2O_3 . ამ ჯგუფის ტიპური წარმომადგენელია NaCl , რომლის იონებს შორის კავშირის მოდელი 1.16 სურათზეა წარმოდგენილი. ქლორის უარყოფითად დამუხტული იონი თავის გარშემო არა მარტო „საკუთარ“, მხოლოდ ერთ Na^+ -ის იონს იზიდავს, არამედ სხვა იონებსაც. ამდენად, ნებისმიერი იონის მახლობლობაში აღმოჩნდება არა მარტო საწინააღმდეგო ნიშნის მქონე ერთი იონი, არამედ რამდენიმე. ფაქტობრივად ქლორის ყოველი იონი გარშემორტყმული აღმოჩნდება ნატრიუმის ექვსი იონით, ხოლო ნატრიუმის ყოველი იონი – ქლორის ასევე ექვსი იონით. ასეთი მოწესრიგებული განლაგების კრისტალს იონურ კრისტალს უწოდებენ. არალითონური იონის რადიუსი ლითონური იონის რადიუსზე მეტია, ამიტომ ლითონის იონები ავსებს ფორებს არალითონური იონების მიერ ჩამოყალიბებულ კრისტალურ გი-სოსში.

იონური კავშირის სიმტკიცე ანუ ბმის ენერგიამუხტის სიდიდეზე, იონების ზომებსა და სივრცეში მათ ურთიერთგანლაგებაზეა დამოკიდებული. რაც უფრო მცირეა იონების ზომები და რაც უფრო მჭიდროდაა ერთმანეთის მიმართ სივრცეში განლაგებული, მით უფრო მეტია ბმის ენერგია.

იონური კრისტალები თითქმის ყოველთვის გაზრდილი სიმყიფით გამოირჩევა და ადვილად იპოვა გარკვეულ კრისტალოგრაფიულ სიბრტყეებზე. სავალენტო ელექტრონები მტკიცეა და კავშირებული ატომის ბირთვთან. იონების ერთი შრის დაძვრა მეორის მიმართ განაპირობებს ერთნაირი მუხტის მქონე იონების მიახლოებას (სურ. 1.17),

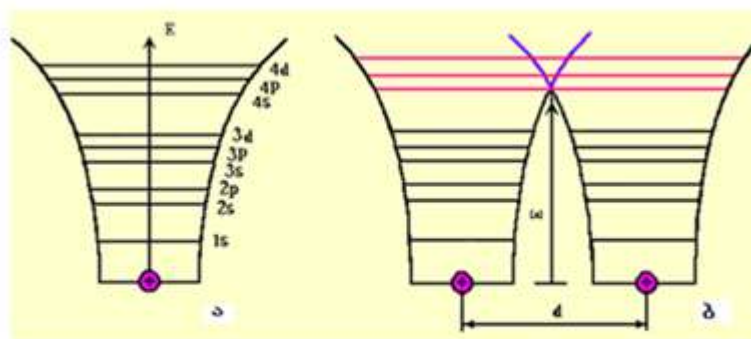


სურ. 1.17. ფენების ძერის მოდელი იონურ კრისტალებში

რაც იწვევს მათ ძლიერ ურთიერთუკუგდებას და კრისტალის ნგრევას. რადგან იონური კრისტალების სავალენტო ზონები სრულად არის შევსებული ელექტრონებით, მყარ მდგომარეობაში ისინი ნახევარგამტარული ან დიელექტრიკული თვისებებით ხასიათდება. თხევად მდგომარეობაში კრისტალები იონური გამტარებია.

1.4.5. ლითონური კავშირი

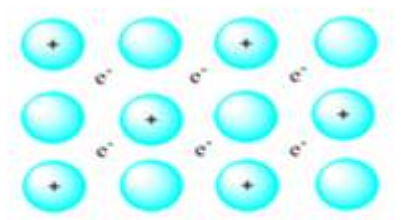
ერთი და იგივე ან რამდენიმე ელემენტის ატომებს შორის კავშირი ხორციელდება ლითონებში, რომელთა გარე ელექტრონული შრე ნახევრამდე არ არის შევსებული. მყარ მდგომარეობაში ლითონის ატომები იმდენად ახლოსაა ერთმანეთთან განლაგებული, რომ ხდება გარე ელექტრონული ორბიტების ურთიერთგადაფარვა, რა დროსაც საერთო ზონა წარმოიქმნება თავისუფალი ქვედონეებით (სურ. 1.18). შედეგად, აირის ატომების მსგავსად, სავალენტო ელექტრონები ადვილად სცილდება საკუთარ ატომს, თავისუფლად მოძრაობს ატომიდან ატომზე აღნიშნული საერთო



სურ. 1.18. იზოლირებული (ა) და ორი ახლოს მდებარე (ბ) ატომების ენერგეტიკული დონეების სქემა

ზონის ფარგლებში და თითოეული მათგანისთვის საერთო, კოლექტიური ხდება, ანუ მიმდინარეობს სავალენტო ელექტრონების გაერთიანება კრისტალის მთელ მოცულობაში (აქედან წარმოიშვა ტერმინები „ელექტრონული ღრუბელი“, „ელექტრონული აირი“).

თუ არ არსებობს გარე ზემოქმედება, ელექტროსტატიკური ძალების ზეგავლენით უარყოფითი მუხტის მატარებელი ნაწილაკები ერთმანეთს უკუაგდებს, რის შედეგადაც თავისუფალი ელექტრონების განაწილება კრისტალის მოელ მოცულობაში სტატისტიკურად ერთგვაროვანი ხდება. ელექტრონები „ამჭიდროვებს“ დადებით იონებს, რომლებიც, თავის მხრივ, ერთმანეთისგან განიზიდება გარკვეულ მანძილზე მიახლოებისას. იონები კანონზომიერად ღაგდება სივრცეში ერთმანეთის მიმართ ისე, რომ მიზიდვისა და განზიდვის ძალები გაწონასწორებულია (სურ.1.19). ატომთა შორის



სურ. 1.19. ლითონური კრისტალის ელექტრონული აგებულების გამარტივებული მოდელი

ასეთ კავშირს ლითონურს უწოდებენ.

ამგვარად, ლითონური კავშირი წარმოიქმნება დადებითად დამუხტული იონებისგან ფორმირებულ კრისტალურ გისოსსა და მათ ირგვლივ გარშემორტყმულ „თავისუფალ“ ელექტრონებს შორის აღძრულ მიზიდვის ძალებით. კრისტალში ელემენტარული ნაწილაკების ასეთი ურთიერთგანლაგების

ხასიათი მაქსიმალურ თერმოდინამიკურ სტაბილურობას უზრუნველყოფს.

სხვა ტიპის კავშირებისგან განსხვავებით, ლითონური კავშირი არ არის მიმართულებითი, ამიტომ მეზობელი ატომები ერთმანეთის მიმართ რაც შეიძლება ახლოს განლაგდება. ამის პირდაპირი შედეგია ლითონების კრისტალური სტრუქტურების მაღალი საკოორდინაციო რიცხვი და კომპაქტურობა. ლითონების უმრავლესობაში ასეთი ტიპის კავშირის ჩამოყალიბებაში მონაწილეობს ყოველი ატომის თითო ელექტრონი. მაღალი საკოორდინაციო რიცხვით ხასიათდება წახნაგდაცენტრებული კუბური და მჭიდრო ჰექსაგონური გისოსები.

ზოგიერთი ელემენტი ხასიათდება კავშირების შერეული ტიპით. მაგალითად, ბისმუტის, სელენისა და დარიშხანის ატომები რიგში ერთიანდება კოვალენტური კავშირით, ხოლო რიგებს შორის განხორციელებულია ლითონური ტიპის კავშირი ამიტომ ასეთ ელემენტებს ნაკლებად გამოხატული ლითონური თვისებები აქვს.

15. ლითონური კავშირით განპირობებული ზოგიერთი ფიზიკური თვისება

ლითონური კავშირის განხილვიდან გამომდინარე, ლითონის მდგრადობა, რომელიც იონურ-ელექტრონულ სისტემასგულისხმობს, დადებითად დამუხტულ იონებსა და კოლექტივიზებულ ელექტრონებს შორის ურთიერთქმედებით განისაზღვრება. ამდენად, ცნება „ლითონი“ ატომების ისეთ აგრეგატს განსაზღვრავს, სადაც ელექტრონები თავისუფლად გადაადგილდება თუნდაც მეტად მცირე ელექტრული ველის მოდების შემთხვევაშიც კი. ლითონური კავშირი ლითონების შემდეგ დამახასიათებელ თვისებებს განაპირობებს:

ა) მაღალი სითბო და ელექტროგამტარობა

ლითონების მაღალი სითბოგამტარობა, უპირველეს ყოვლისა, განპირობებულია თავისუფალი ელექტრონების დიდი ძვრადობით და ნაკლები ხარისხით – იონების რხევითი მოძრაობით, რის გამოც ლითონის მთელ მასაში სწრაფად მიმდინარეობს ტემპერატურის გათანაბრება.

მაღალი ელექტროგამტარობა უნდა აიხსნას ასევე თავისუფალი ელექტრონების არსებობით, რომლებიც ადვილად გადაადგილდება გისოსის პოტენციალურ ველში. ტემპერატურის გაზრდით იზრდება იონების (ატომების) რხევითი მოძრაობა, წარმოიქმნება ვაკანსიები და ირღვევა პოტენციალური ველის სწორი პერიოდულობა, რაც ელექტრონების გადაადგილების უნარს აძნელებს. შედეგად ლითონის ელექტროგამტარობა მცირდება.

პირიქით, დაბალ ტემპერატურებზე მკვეთრად მცირდება იონების (ატომების) რხევითი მოძრაობა, რაც ელექტროგამტარობის ზრდას განაპირობებს. უფრო მეტიც, ზოგიერთ ლითონში, ელექტრონების აირის წარმოქმნისა და მათი მოწესრიგებული მოძრაობის გამო, მეტად დაბალ ტემპერატურაზე ($<20\text{K}$) ელექტროგამტარობა უსასრულოდ იზრდება, რასაც სუპერგამტარობის მოვლენას უწოდებენ.

ბ) ელექტროწინააღობის ტემპერატურული კოეფიციენტის დადებითი მნიშვნელობა

ტემპერატურის გაზრდით სუფთა ლითონების ელექტროწინააღობა იზრდება. ლითონური მდგომარეობის მთავარ ფიზიკურ კრიტერიუმად მყარი ტანის თეორია სწორედ $\rho(T)$ ელექტროწინააღობის ტემპერატურულ ცვლილებას მიიჩნევს: ლითონები-

სათვის, როცა $T \rightarrow 0$, $\rho \rightarrow 0$, არალითონებისათვის, ე.ი. ნახევარგამტარებისა და დიელექტრიკებისათვის (იზოლატორებისათვის) როცა $T \rightarrow 0, \rho \rightarrow \infty$.

ლითონების უმრავლესობა (~ 30) ზეგამტარობით ხასიათდება. აღნიშნულ ლითონებში აბსოლუტური ნულის მახლობლობაში ელექტროწინაღობა ნახტომისებრად ეცემა პრაქტიკულად ნულამდე.

გ) თერმოელექტრული ემისია

თერმოელექტრული ემისია არის ლითონის უნარი, ამოაფრქვიოს ელექტრონები გახურებისას. გარე ელექტრონების კავშირი ატომთან ხასიათდება იონიზაციის პოტენციალით ანუ იზოლირებული ატომიდან ელექტრონების მოწყვეტაზე დახარჯული მუშაობით. ლითონებისათვის იონიზაციის პოტენციალი 4–9 ევ-ს შეადგენს, არალითონებისათვის კი ეს მახასიათებელი 10 ევ-ს აღემატება ერთი და იგივე იონიზაციის ხარისხის (ერთი ელექტრონის მოწყვეტის) შემთხვევაში. აქედანაც ნათლად სჩანს, რომ ლითონებში გარე ელექტრონები ბევრად უფრო სუსტად არიან დაკავშირებული ატომთან და უფრო ადვილად წარმოქმნის ელექტრონულ აირს.

დ) კარგი არეკვლის უნარი

ლითონები გაუმჭვირი მასალებია და ლითონური ბზინვარება ახასიათებს, რაც კარგი არეკვლის უნართაა განპირობებული.

ე) პლასტიკური დეფორმაციისადმი გაზრდილი მიდრეკილება

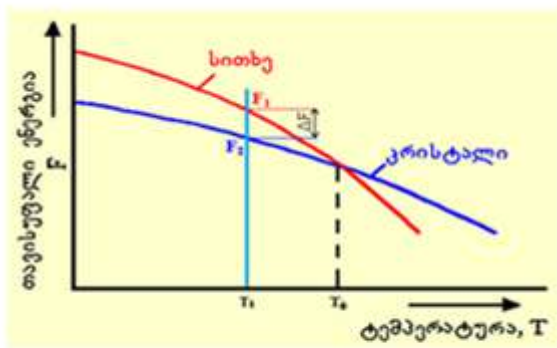
მაღალი პლასტიკურობა აიხსნება ლითონის ატომური სტრუქტურის პერიოდულობით და ლითონური კავშირის არამიმართულებითი ხასიათით. ელექტრონული აირი, რომლითაც ატომებია გარშემორტყმული, არ არის ხისტი და შეიძლება შეიცვალოს როგორც ზომები, ისე ფორმა. ამიტომ, პლასტიკური დეფორმაციის პროცესში (ჭედვა, გლინვა, და ა.შ.), ე.ი. ლითონის ერთი მოცულობის მეორის მიმართ გადაადგილებისას, იონებს (ატომებს) შორის კავშირი არ ირღვევა და დეფორმირებული ლითონი მთლიანობას ინარჩუნებს.

თავი II

სუფთა ლითონების კრისტალიზაცია

2.1. კრისტალიზაციის პროცესის ზოგადი მიმოხილვა

პირველადი კრისტალიზაციის შედეგად ჩამოყალიბებული სტრუქტურა ნაკეთობის მრავალ თვისებას განსაზღვრავს. ლითონის გაცივების დროს კრისტალიზაციის პროცესი თვითნებურად მიმდინარეობს, რაც გამომდინარეობს თერმოდინამიკის ზოგადი კანონებიდან, რომლის თანახმადაც, სისტემა ყოველთვის ცდილობს დაიკავოს ისეთი მდგომარეობა, სადაც მას მინიმალური თავისუფალი ენერგია ექნება.



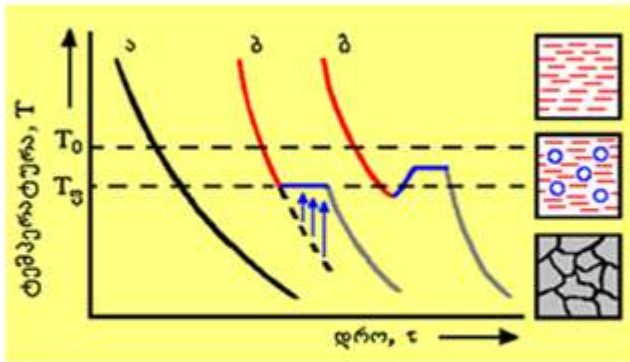
სურ. 2.1. თხევადი და მყარი მდგომარეობების თავისუფალი ენერგიების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ტემპერატურის შეცვლით თხევადი და მყარი მდგომარეობების თავისუფალი ენერგიები სხვადასხვა კანონზომიერებით იცვლება და მრუდები გარკვეულ T_0 წერტილში იკვეთება (სურ. 2.1). T_0 ტემპერატურა დნობის (გამყარების) თეორიულ ტემპერატურაა, თუმცა ამ წერტილში კრისტალიზაცია არ შეიძლება მიმდინარეობდეს, რადგან თხევადი და მყარი ფა-

ზების თავისუფალი ენერგიები ტოლია: $F_L = F_C$. T_0 წერტილის მარჯვნივ, ე. ი. მაღალ ტემპერატურაზე, სისტემისათვის უფრო ხელსაყრელია თხევადი მდგომარეობა, რადგან ეს უკანასკნელი ნაკლები თავისუფალი ენერგიით ხასიათდება, მარცხნივ კი – კრისტალური მდგომარეობა. ამიტომ, თუ გამდნარ ლითონს T_0 წერტილის ქვემოთ რაღაც T_1 ტემპერატურამდე გადავაცივებთ, დაიწყება კრისტალიზაციის პროცესი, რომლის მამოძრავებელ ძალას არსებითად თხევად დამყარ მდგომარეობებს შორის თავისუფალი ენერგიების სხვაობა ($\Delta F = F_1 - F_2$) წარმოადგენს (სურ. 2.1). ტემპერატურას, რომელზეც რეალურად იწყება კრისტალიზაციის პროცესი, კრისტალიზაციის ფაქტიური ტემპერატურა ეწოდება, ხოლო თეორიულ და ფაქტიურ კრისტალიზაციის ტემპერატურებს შორის სხვაობას ($T_0 - T_{ფ}$) – გაცივების ხარისხი.

სუფთა ლითონის გაცივების პროცესი შეიძლება გამოისახოს მრუდით კოორდინატებში: ტემპერატურა – დრო (სურ. 2.2). თხევადი ფაზის გაცივებისას სისტემის

ტემპერატურა ჯერ მდოვრედ მცირდება (1–2 უბანი ბ მრუდზე), რადგან ამ დროს სითხეში არავითარი ხარისხობრივი ცვლილება არ ხდება. ამორფულ ნივთიერებებში, სადაც გამყარება კრისტალების წარმოქმნის ანუ კრისტალიზაციისგარეშე მიმდინარეობს, ტემპერატურის ცვლილების ასეთი მდოვრე ხასიათი შენარჩუნებულია გაცივების მთელ ინტერვალში (სურ. 2.2, ა). ლითონებში კი, როდესაც სისტემის



სურ. 2.2. ამორფული (ა) და კრისტალური (ბ, ბ') ნივთიერებების გაცივების მრუდები

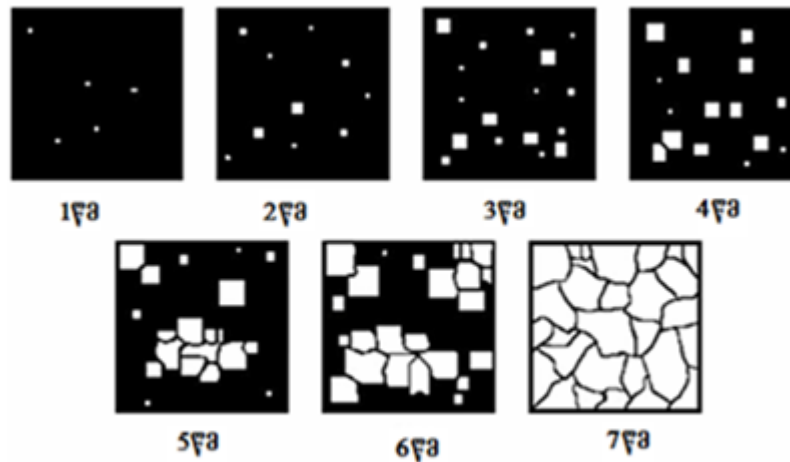
ტემპერატურა კრისტალიზაციის ფაქტობრივ ტემპერატურას მიაღწევს, მრუდზე პორიზონტალური ბაქანი (2–2') წარმოიქმნება. ეს იმის მაჩვენებელია, რომ კრისტალიზაციის პროცესი სუფთა ლითონებში მუდმივ ტემპერატურაზე ხოთერმულად მიმდინარეობს, რადგან ატმოსფეროში გაცემული სითბო კომპენსირდება კრისტა-

ლიზაციის ფარული სითბოს გამოყოფით (ვერტიკალური ისრები დიაგრამაზე, ბ მრუდი). ძლიერი გადაცივების შემთხვევაში ინტენსიურად გამოყოფილი ფარული სითბოს ხარჯზე ტემპერატურამ შეიძლება ინტენსიურად აიწიოს (გ) და დნობის წერტილსაც კი მიუახლოვდეს. თუ არ მოხდა სითბოს ატმოსფეროში გაცემა, გამყარების პროცესი შეიძლება შეწყდეს კიდევ. სითხის უკანასკნელი წვეთის გამოკრისტალების შემდეგ სისტემის ტემპერატურა კვლავ მდოვრედ ვარდნას იწყებს.

2.2. კრისტალიზაციის პროცესის მემანიზმი

კრისტალიზაცია განიხილება, როგორც ატომების გადასვლა თხევადი მდგომარეობისათვის დამახასიათებელი მოუწესრიგებელი მდგომარეობიდან მოწესრიგებულში. პროცესი ორი თანამიმდევრული ელემენტარული აქტით მიმდინარეობს. პირველი კრისტალის უწერილესი ნაწილაკების ე.წ. კრისტალიზაციის ცენტრების ჩასახვაში მდგომარეობს, ხოლო მეორე – ამ წარმონაქმნიდან კრისტალების ზრდაში. ამ ორი ელემენტარული საფეხურის გათვალისწინებით, კრისტალიზაციის პროცესი შეიძლება შემდეგი სქემით წარმოვიდგინოთ: დავუშვათ, 2.3 სურათზე გამოსახულ ფართობში ყოველ წამში ხუთი კრისტალიზაციის ცენტრი ჩაისახება.

ჩასახული ცენტრებიდან მომდევნო წამში კრისტალები გარკვეულ ზომამდე გაიზრდება. ერთდროულად კვლავ ხუთი კრისტალიზაციის ცენტრი ჩაისახება და ა.შ.



სურ. 2.3. კრისტალიზაციის პროცესის მოდელი

ცენტრების ამგვარი ჩასახვითა და მათი ზრდით მიმდინარეობს კრისტალიზაცია, რომელიც მოცემული სქემის მიხედვით მეშვიდე წამში მთავრდება.

თუ თხევადი ლითონი აბსოლუტურად სუფთაა და არც ჭურჭლის კედლები, რომელშიც ლითონი მყარდება და არც რაიმე გარეშე მინარევები გავლენას არ ახდენს ჩანასახის წარმოქმნაზე, მას ჰომოგენური ჩანასახი (ჰომოგენური კრისტალიზაცია) ეწოდება. ასეთ შემთხვევაში როგორც კრისტალიზაციის ცენტრთა რიცხვი, ისე კრისტალების ზრდის სიჩქარე სისტემის გადაცივების ხარისხზეა დამოკიდებული. რაც უფრო მეტია გადაცივების ხარისხი, მით უფრო მეტი კრისტალიზაციის ცენტრია მდგრადი და მით უფრო წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა ჩამოყალიბდება.

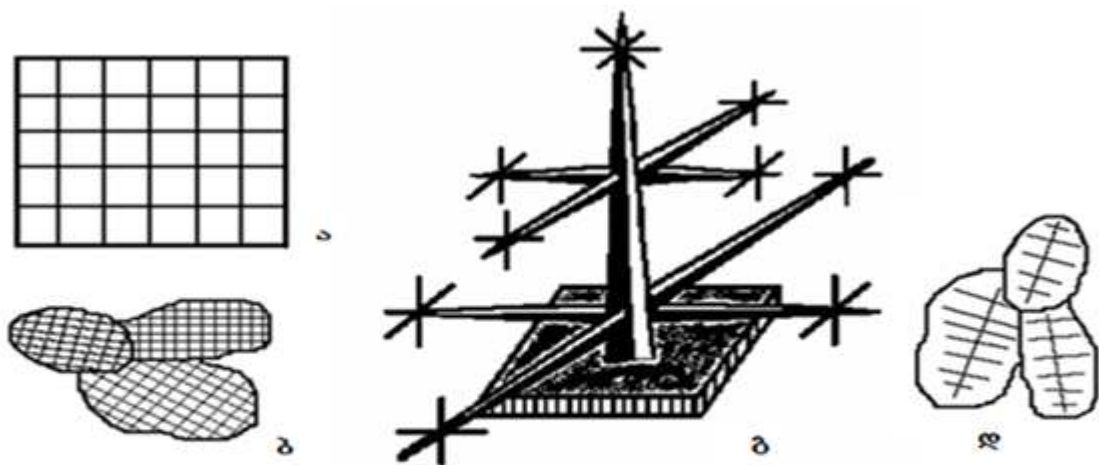
ტექნიკურ ლითონებში ყოველთვის არსებობს არაღიოთნური ჩანართები, რომლებიც მზა კრისტალიზაციის ცენტრების როლს ასრულებს. მათ ზედაპირზეინტენსიურად მიმდინარეობს თხევადი ფაზიდან ლითონის ატომების დაშენება უმნიშვნელო გადაცივების პირობებშიც კი. მაგალითად, სპილენძის გარკვეული მოცულობის სითხე კრისტალდება 5°C -მდე გადაცივების შემთხვევაში, ხოლო მისი უმცირესი მოცულობის წვეთი, რომელიც პრაქტიკულად არ შეიცავს მინარევებს – 200°C -ზე მეტი გადაცივების პირობებში. ჩანასახის წარმოქმნას ხელს უწყობს აგრეთვე იმ ჭურჭლის კედლები, რომელშიც სითხე მყარდება. ჩანასახის წარმოქმნას თხევად

ფაზაში არსებულ გამყოფ ზედაპირზე – ჭურჭლის კედლებზე ან უხსნადი მინარე-
ვების ნაწილაკებზე ჰეტეროგენური ეწოდება.

ლითონი მისთვის დამახასიათებელ აღნაგობას პირველადი კრისტალიზაციისპრო-
ცესში ღებულობს. ამ დროს ჩამოყალიბებული სტრუქტურა ნაკეთობის მრავალ
თვისებას განსაზღვრავს. გამყარების პროცესში ფორმირებული დეფექტები ლითო-
ნის დამუშავების სხვადასხვა სტადიის გავლის შემდეგ შეიძლება მზა პროდუქტში
აღმოჩნდეს, რაც სასურველი თვისებების მქონე ლითონის მიღებას აძნელებს.

2.3. კრისტალური წარმონაქმნის ფორმები. ფოლადის ზოდის აბეზულება

ჰომოგენური ან ჰეტეროგენული კრისტალიზაციის პროცესი შეიძლება სხვა-
დასხვანაირად წარიმართოს და ამის მიხედვით შედეგიც სხვადასხვაა მიიღება. თუ
კრისტალის ზრდა ერთი ცენტრიდან ხდება, გამყარების შემდეგ მიიღება შინაგანად
სრულყოფილი კრისტალური აგებულებისა და სწორი გარე გეომეტრიული ფორმის
წარმონაქმნი, რომელსაც მონოკრისტალი ეწოდება (სურ. 2.4, ა). დიდი ზომის მონო-
კრისტალებს, რომელთა მასა შეიძლება რამდენიმე ასეულ გრამს შეადგენდეს, სა-
მეცნიერო ან ტექნიკის განსაკუთრებული მიზნებისათვის ამზადებენ.



სურ. 2.4. კრისტალური წარმონაქმნის ფორმების სქემა:
ა – მონოკრისტალი; ბ – მარცვლები; გ – დენდრიტი; დ – დენდრიტული მარცვლები

როდესაც კრისტალიზაცია ერთდროულად რამდენიმე ცენტრიდან მიმდინარე-
ობს, სანამ კრისტალი გარშემორტყმულია სითხით, იგი ღებულობს სწორ გეომეტ-
რიულ ფორმას, მაგრამ მზარდი კრისტალების ურთიერთშეხვედრისას ხდება მათი

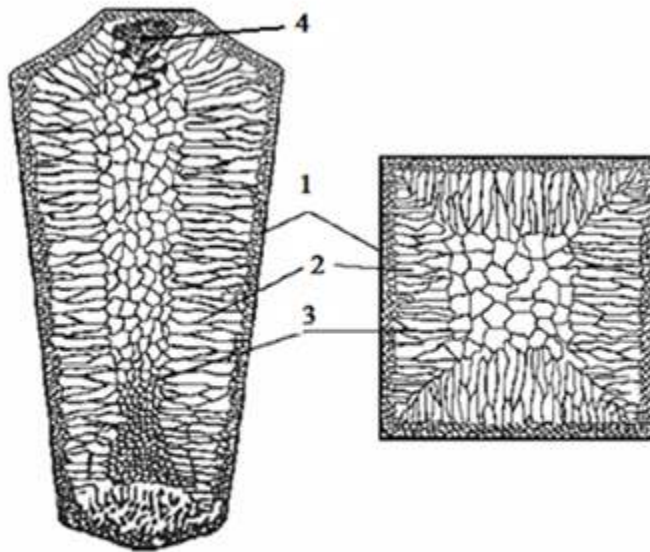
თავისუფალი ზრდის შეზღუდვა, ჩნდება მათ შორის საზღვარი და სწორი ფორმამახინჯდება. ამგვარად მიიღება დამახინჯებული ზედაპირის მქონე წარმონაქმნები, რომელთაც მარცვლები ეწოდება (სურ. 2.4, ბ).

უმეტეს შემთხვევაში, კრისტალი სხვადასხვა მიმართულებით სხვადასხვა სიჩქარით იზრდება. ასეთ შემთხვევაში თავდაპირველად წარმოიქმნება წაგრძელებული, ნემსისებრი გამონაზარდი ე.წ. კრისტალიზაციის პირველი რიგის ღერძი. ანალოგიურად, პირველად ღერძებზე მიიღება განშტოებები, რომლებიც, თავის მხრივ, სხვა განშტოებების საფუძველია. შედეგად ჩამოყალიბდება დატოტვილი, ხისმაგვარი ფორმის კრისტალი, რომელსაც დენდრიტი ეწოდება (სურ. 2.4, გ). შემდეგ ხდება დენდრიტებს შორის სივრცის მარცვლამდე (დ)შეკვება.

მრეწველობაში წარმოებული ფოლადის დიდი რაოდენობა ძირითადად ზოდის სახით ჩამოისხმება. ზოდის ჩამოსხმა თუჯის სპეციალურ ფორმებში (ბოყვებში) ხდება, სადაც სითხის კრისტალიზაცია ლითონის სხვადასხვა მოცულობაში განსხვავებულად მიმდინარეობს.

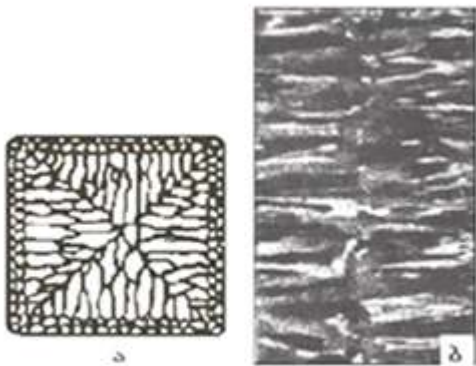
2.5 სურათზე წარმოდგენილია ფოლადის ზოდის აგებულების სქემა. ლითონი მაქსიმალური სიჩქარით ბოყვის კედელთან ცივდება, ამიტომ ამ ზონაში გამყარება დიდი გაცივებით მიმდინარეობს და ფორმირდება მეტად წვრილმარცვლოვანი შრე ე.წ. ზოდის ქერქი (სურ. 2.5, 1 ზონა). ქერქის წარმოქმნის მომენტიდან ლითონის გაცივების სიჩქარე მცირდება, ქერქის მარცვლებზე იწყება ახალი კრისტალების დაშენება. ისინი სითბოს გაცემის საპირისპირო მიმართულებით, ქერქიდან ზოდის გულისაკენ, ერთმანეთის პარალელურად იზრდება და სვეტისმსგავს, წაგრძელებულ ფორმას ღებულობს (მე-2 ზონა). მას სვეტოვანი კრისტალური აგებულების ზონა ეწოდება.

ლითონის ცენტრალურ ზონაში არ არსებობს სითბოს მიმართულებითი გაცივების პირობები. სითხის მთელ მოცულობაში ერთდროულად იწყება დამოუკიდებელი კრისტალიზაციის ცენტრების ჩასახვა და შედარებით მსხვილი, ტოლღერძა, ნებისმიერადორიენტირებული მარცვლების ზრდა, რომლებიც ზოდის გულს წარმოქმნის



სურ. 2.5. ფოლადის ზოდის აგებულების სქემა:
1 - ქერქი; 2 - სვეტოვანი კრისტალები; 3 - გული;
4 - ჩაჯდომის ნიჟარა

(მე-3 ზონა). ამ ზონაში ჩანასახის როლს, ჩვეულებრივ, სხვადასხვა უწვრილესი ჩანართი ასრულებს, რომლებიც ზოდის კრისტალიზაციის პროცესში გროვდება.



სურ. 2.6. ტრანსკრისტალიზაციის სქემა (ა) და ალუმინიანი ბრინჯაოს ტრანსკრისტალიზაცია (ბ)

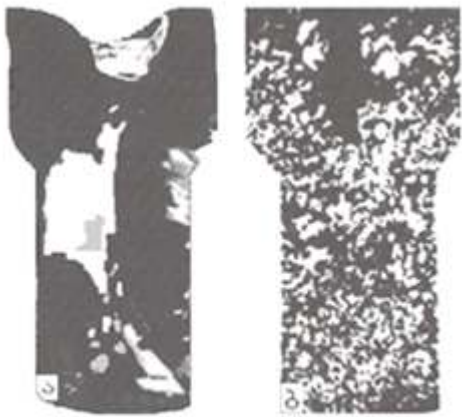
შედარებით დიდი სიჩქარით გაცივების შემთხვევაში მზარდი სვეტოვანი კრისტალები ერთმანეთს ხვდება და კრისტალიზაციის პროცესი ურთიერთშეზრდით მთავრდება (სურ. 2.6). ამ პროცესს ტრანსკრისტალიზაცია ეწოდება. შეხვედრის ადგილებში კრისტალების ერთმანეთთან მჭიდრო დაკავშირება არ ხდება და ზოდში სუსტი ადგილები მიიღება.

გამდნარი ფოლადის კრისტალიზაციის დროს ლითონის მოცულობა მცირდება და იქ, სადაც ლითონი ბოლოს გამყარდება, წარმოიქმნება სიცარიელე – ჩაჯდომის ნიჟარა (4, სურ. 2.5). ჩაჯდომის ნიჟარის მახლობლად თავს იყრის სხვადასხვა წარმოშობის მცირე ნიჟარები და არაღლითონური ჩანართები, რომლებიც ე.წ. ჩაჯდომის სიფხვიერეს წარმოქმნის.

მექანიკური თვისებების, კერძოდ სიმტკიცის მაღალი მახასიათებლების მისაღწევად სასურველია წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღება. ამის განმსაზ-

დგრელი პირობაა ის, რომ სითხეში რაც შეიძლება მეტი კრისტალიზაციის ცენტრი ჩაისახოს, ხოლო გაცივების სიჩქარე ისე უნდა შეირჩეს, რომ კრისტალს ზრდის შესაძლებლობა მიეცეს.

გაცივების სიჩქარე არსებით როლს ასრულებს ჩანასახის წარმოქმნის პროცესში. პირველად აღმოცენებული კრისტალები გაიზრდება იმ მომენტამდე, ვიდრე არ შეხვდება სხვა მზარდ კრისტალებს. სხმული ლითონის სტრუქტურის ჩამოყალიბებაზე ზემოქმედების ყველაზე გავრცელებული მეთოდია სწორედ ოპტიმალური გაცივების სიჩქარის შერჩევა. სხმულის კრისტალიზაციის პროცესშიფართო გამოყენებას პოულობს აგრეთვე ყალიბის ვიბრაცია. ვიბრაციის შედეგად იმსხვრევა მზარდი კრისტალები, რაც უზრუნველყოფს წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას.



სურ. 2.7. კატალიზატორის დამატებით სტრუქტურის დაწვრილმანება

პრაქტიკაში სტრუქტურის დაწვრილმანებისათვის ფართოდ სარგებლობენ თხევადლითონში მცირე რაოდენობით მინარევების დამატებით. სითხის დამუშავების ამ ხერხს მოდიფიცირება ეწოდება. მაგალითად, ფოლადში მოდიფიკატორებად იყენებენ ბორს და ტიტანს, ალუმინსა და მის შენადნობებში – ნატრიუმს, ტიტანს და ცირკონიუმს. 2.7სურათზე წარმოდგენილია მაღალი სისუფთავის ალუმი-

ნის სხმულის მაკროსტრუქტურა (ა), რომელიც მეტად მსხვილმარცვლოვანი აგებულებით ხასიათდება. 0,5% სპილენძისა და 1,1% ტიტანის დამატება უზრუნველყოფს სტრუქტურის მნიშვნელოვან დაწვრილმანებას (ბ).

2.4. მეორეული ბარდაქმნები სუფთა ლითონებში

2.4.1. ალუტროპიული გარდაქმნები

მოცემული ელემენტის ატომებმა შეიძლება ნებისმიერი ფორმის კრისტალური გისოსიწარმოქმნას მაგრამ მდგრადი აღმოჩნება ის, რომელსაც მინიმალური ენერგია აქვს. მრავალ ნივთიერებაში, განსაკუთრებით გარდამავალ ლითონებში, ერთ პირობებში ჩამოყალიბებული კრისტალური გისოსი გარე ფაქტორების (ტემპერატურა, წნევა) ზემოქმედებით შეიძლება არასტაბილური აღმოჩნდეს და ფორმა შეიცვა-

ლოს. მაგალითად, გარკვეულ პირობებში რკინა შეიძლება არსებობდეს სივრცით დაცენტრებულ და წახნაგდაცენტრებულ კრისტალურ გისოსში; აღმოჩენილია კობალტი წახნაგდაცენტრებული და ჰექსაგონური გისოსებით. სხვადასხვა კრისტალურ ფორმაში შეიძლება არსებობდეს აგრეთვე კალა, მანგანუმი, ტიტანი, ურანი და ცირკონიუმი.

ერთი და იგივე ლითონის სხვადასხვა კრისტალურ ფორმაში არსებობას პოლიმორფიზმი ანუ ალოტროპიზმი ეწოდება, ხოლო ლითონის კრისტალოგრაფიულ სახესხვაობებს – პოლიმორფული ანუ ალოტროპიული მოდიფიკაციები. ერთი და იგივე ნივთიერების სახესხვაობა აღინიშნება α , β , γ , δ ასოებით, რომლებიც ინდექსის სახით ელემენტების აღმნიშვნელ ქიმიურ სიმბოლოებს ემატება. მაგალითად, Fe_α , Ti_β და ა.შ.

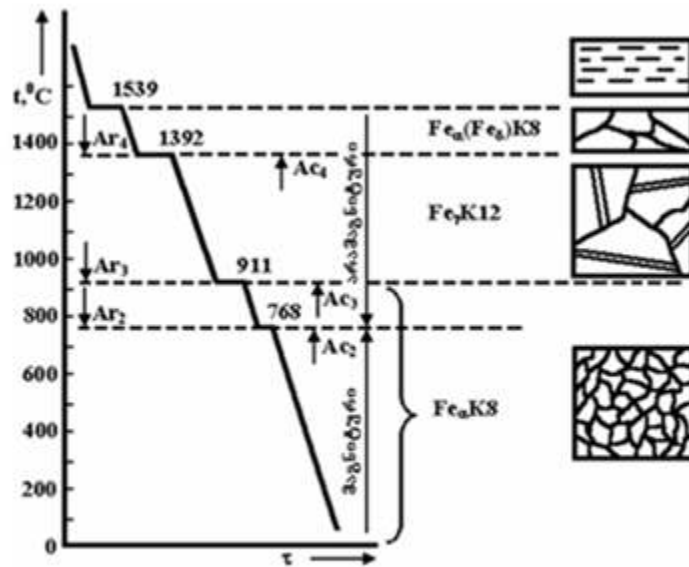
რადგან ალოტროპიული გარდაქმნა მყარ მდგომარეობაში მიმდინარეობს, პირველადი გარდაქმნის კრისტალიზაციისაგან განსხვავებით, მას მეორეულს უწოდებენ.

ალოტროპიული გარდაქმნა სუფთა ლითონებში ერთ გარკვეულ, მუდმივტემპერატურაზე თბური ეფექტით წარიმართება – გახურებისას ხდება ენერგიის შთანთქმა, გაცივებისას – ენერგიის გამოყოფა. ამიტომ, სუფთა ლითონის გაცივების მრუდზე პირველი ჰორიზონტალური ბაქნის ქვემოთ, რომელიც თხევადი ლითონის კრისტალიზაციას შეესაბამება, იმდენი ბაქანი წარმოიქმნება, რამდენი ალოტროპიული სახესხვაობაც აქვს. ტემპერატურას, რომელზეც ალოტროპიული გარდაქმნა მიმდინარეობს, ალოტროპიული გარდაქმნის ტემპერატურას უწოდებენ. ალოტროპიული გარდაქმნა შექცევადია.

ალოტროპიული გარდაქმნა მიმდინარეობს ახალი ფაზის კრისტალიზაციის ცენტრების ჩასახვითა და მათი ზრდით. პროცესი ემორჩილება იგივე კანონზომიერებებს, რომლებიც პირველადი კრისტალიზაციის შესწავლის დროს განვიხილეთ. ვინაიდან გარდაქმნა მყარ მდგომარეობაში მიმდინარეობს, დიფუზიის სიჩქარე რამდენიმე ხარისხით ნაკლებია სითხესთან შედარებით. ამიტომ გარდაქმნის დაწყებისათვის აუცილებელია სისტემის მნიშვნელოვანი გადაცივება, რათა არსებული და ახალი ალოტროპიული სახესხვაობების თავისუფალ ენერგიებს შორის სხვაობამ საკმარის სიდიდეს მიაღწიოს.

2.4.2. რკინის ალოტროპიზმი

ნორმალური წნევის პირობებში რკინაორიალოტროპიული სახესხვაობითარსებობს. 911°C -ის ქვემოთ და 1392°C -ის ზემოთ დნობის ტემპერატურამდე სტაბილურია რკინის α მოდიფიკაცია (Fe_α), რომელსაც სივრცით დაცენტრებული კუბური კრისტალური გისოსიაქვს. $911\text{--}1392^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში კიმდგრადია რკინის γ მოდიფიკაცია წახნაგდაცენტრებული კუბური კრისტალური გისოსით (Fe_γ , სურ. 2.8).



სურ. 2.8. რკინის გახურება-გაცივების შრუდი

ამაღალტემპერატურულ რკინას ხშირად Fe_δ -თი აღნიშნავენჰორიზონტალური ბაქანი, რომელიც 768°C -ზე მიიღება, არ არის დაკავშირებული კრისტალური გისოსის გადაჯგუფებასთან. იგი კიურის წერტილია. ამ წერტილის ზემოთ რკინა არამაგნიტურია,ხოლო ქვემოთ – ფერომაგნიტური. აფერომაგნიტური რკინისაგან განსხვავებით, აარამაგნიტურ რკინას ხშირად Fe_β -თი აღნიშნავენ.

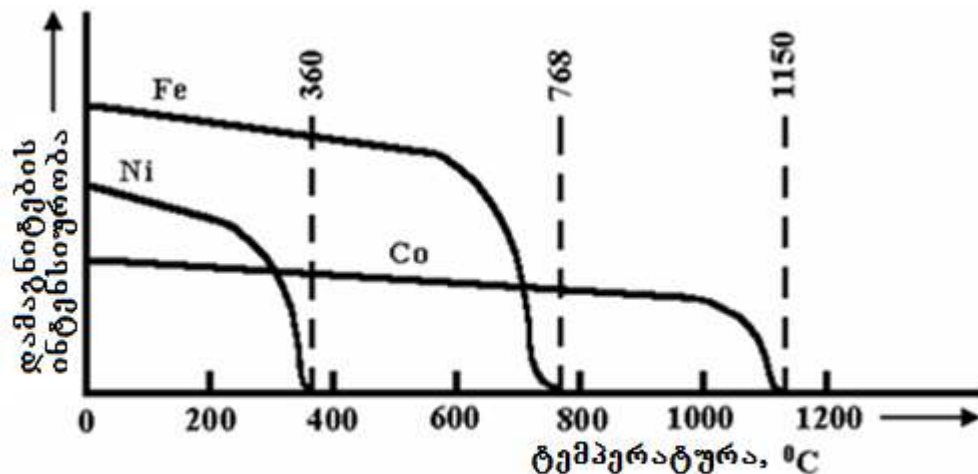
გახურებისას ალოტროპიული გარდაქმნის კრიტიკული წერტილები Ac -თიადინიშნება ($\text{Ac}_2\text{--}768^{\circ}\text{C}$, $\text{Ac}_3\text{ - }911^{\circ}\text{C}$, $\text{Ac}_4\text{ - }1392^{\circ}\text{C}$), ხოლო გაცივებისას – Ar -ით (Ar_2 , Ar_3 , Ar_4).

2.5. მაგნიტური გარდაქმნა

ტემპერატურის გაზრდით ლითონის ფერომაგნიტური თვისებები თანდათან მცირდება და ბოლოს ქრება გარკვეულ ტემპერატურაზე, რომელსაც კიურის წერტილი უწოდეს (სურ. 2.9). იგი რკინისათვის 768°C შეადგენს, ნიკელისათვის -360°C , კობალტისათვის -1150°C , ხოლო გადოლინიუმისათვის -16°C .

კიურის წერტილი სინამდვილეში მცირე ტემპერატურული ინტერვალია, სადაც მაგნიტური თვისებების ქრება. მაგნიტური გარდაქმნა ბევრი თავისებურებით ხასიათდება ალოტროპიულ გარდაქმნასთან შედარებით, რაც ძირითადად შემდეგში გამოიხატება:

1. მაგნიტური თვისებები თანდათან სუსტდება კიურის წერტილთან მიახლოებისას და იგი არ პასუხობს თვისებათა ნახტომისებრ შეცვლას;
2. გარდაქმნა არ ხასიათდება ტემპერატურული ჰისტერეზისით – გაცივების სიჩქარის ზრდა არ გადაადგილებს გარდაქმნის ტემპერატურას;
3. გარდაქმნის შედეგად იცვლება მრავალი ელექტრული, მაგნიტური და თბური თვისება, მაგრამ უცვლელი რჩება მექანიკური და ზოგიერთი ფიზიკური თვისება;
4. გარდაქმნა არ მიმდინარეობს გადაკრისტალებით – ახალი მარცვლების წარმოქმნითა და კრისტალური გისოსის შეცვლით.



სურ. 2.9. რკინის, კობალტისა და ნიკელის მაგნიტური თვისებების ცვლილების ხასიათი

თაზო III

ლითონის მექანიკური თვისებები

3.1. ზოგადი მიმოხილვა

გარე ძალების ზემოქმედებით ლითონი იცვლის ფორმას და ზომებს ანუ დეფორმირდება. მცირე დატვირთვა იწვევს მხოლოდ დრეკად დეფორმაციას. ამ შემთხვევაში მნიშვნელოვანი სტრუქტურული ცვლილებები არ მიმდინარეობს. ძირითადად ხდება ატომების გადაადგილება მცირე, ატომთშორისზე ნაკლები მანძილით, რაც იწვევს კრისტალური გისოსის დამახინჯებას. ეს ცვლილებები კრისტალში შენარჩუნებულია მანამ, სანამ მოქმედებს გარე ძალები. ძალის მოხსნის შემდეგ ატომები უბრუნდება პირვანდელ წონასწორულ მდგომარეობას, გისოსის დამახინჯება იხსნება და ლითონში საწყისი ფორმა და ზომები აღდგება. ლითონის უნარს, წინააღმდეგობა გაუწიოს დრეკად დეფორმაციას, სიხისტე ეწოდება.

თუ ლითონში აღძრული ძაბვა გადააჭარბებს დრეკადობის ზღვარს, გაცილებით უფრო რთული პროცესი, პლასტიკური დეფორმაცია იწყება. პლასტიკური დეფორმაციის დროს კრისტალის ერთი ნაწილი მთლიანად გადაადგილდება (დაიძვრება) მეორის მიმართ. ძალის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ ლითონი აღარ უბრუნდება პირვანდელ მდგომარეობას ანუ რჩება დეფორმირებულ მდგომარეობაში.

საკონსტრუქციო მასალას მოეთხოვება არა მარტო დეფორმაციისადმი, არამედ რღვევისადმი (ნგრევისადმი) გაზრდილი წინააღმდეგობაც. წინააღმდეგობას დეფორმაციისადმი, ჩვეულებრივ, აერთიანებენ ზოგად ცნებაში „სიმტკიცე“, ხოლო წინააღმდეგობას რღვევისადმი – ცნებაში „საიმედოობა“. თუ ნაკეთობის მთლიანობის რღვევას ვთვლით ერთი, არამედ მრავალგზის დატვირთვის შემდეგ, საქმე გვაქვს მასალის ხანგამძლეობასთან. ბუნებრივია, მაღალხარისხოვანი საკონსტრუქციო მასალა ერთდროულად უნდა ხასიათდებოდეს როგორც სიმტკიცით, ისე საიმედოობით და ხანგამძლეობით.

ლითონზე მოქმედი გარე ძალები გარკვეული სიდიდის შემდეგ მის რღვევას იწვევს. რღვევის პროცესში არჩევენ ორ ეტაპს: ბზარის ჩასახვასა და მის გავრცელებას სრულ რღვევამდე.

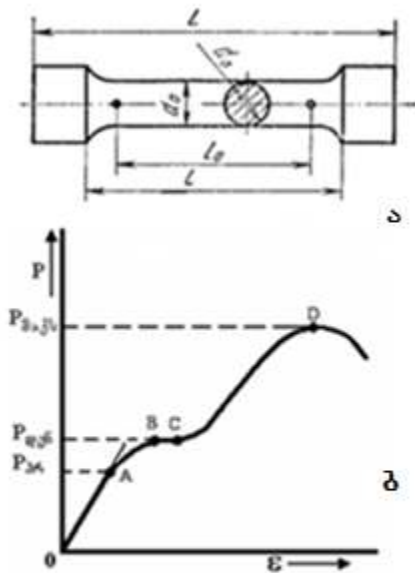
ლითონის რღვევა შეიძლება იყოს მყიფე და ბლანტი. მყიფე რღვევისათვის დამახასიათებელია მახვილი, დატოტვილი ბზარი, რომელიც დიდი სიჩქარით ვრცელ-

დება, პრაქტიკულად, პლასტიკური დეფორმაციის მიმდინარეობის გარეშე.

ბლანტი ტექის შემთხვევაში ბზარი ბლაგვია. იგი ვრცელდება დაბალი სიჩქარით, მაგრამ მნიშვნელოვანი პლასტიკური დეფორმაციით. რღვევის ხასიათიდან გამომდინარე, მყიფე ტექილი კრისტალური აგებულებით ხასიათდება, რადგან ამ დროს არ მახინჯდება მარცვლის ფორმა და ზომები, ხოლო ბლანტი – ბოჭკოვანი აგებულებით. პრაქტიკულად ლითონის რღვევა იშვიათად წარიმართება მხოლოდ მყიფე ან ბლანტი მექანიზმით. უფრო ხშირად ნაკეთობის რღვევა შერეული ხასიათისაა.

3.2. ლითონის მექანიკური თვისებების მახასიათებლები

3.2.1. სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მახასიათებლები



სურ. 3.1. გამოსაცდელი ნიმუში (ა) და გაჭიმვის მრუდი პლასტიკური ლითონისათვის

ლითონის მექანიკური თვისებების შესწავლა სპეციალურად მომზადებული ნიმუშის გაჭიმვაზე გამოცდითხორციელდება(სურ. 3.1, ა). გამოცდის წინ განისაზღვრება ნიმუშის საანგარიშო სიგრძე l_0 და საწყისი განივკვეთის ფართობი F_0 . გამოცდის დროს ნიმუშის დატვირთვა თანდათანობით ხდება. გამოცდის შედეგები გამოისახება მრუდით, რომლის ხასიათი პლასტიკური ლითონისათვის 3.1,ბ სურათზეა წარმოდგენილი. გაჭიმვაზე გამოცდისას შემდეგი ძირითადი მახასიათებლები განისაზღვრება:

1. პროპორციულობის ზღვარი $\sigma_{პრ}$. ეს არის მაქსიმალური ძაბვა დიაგრამის დრეკადი დეფორმაციის OA უბანზე, სადაც ძაბვა ფარდობითი წაგრძელების პირდაპირპროპორციულად იცვლება:

$$\sigma_{პრ} = P_{პრ} / F_0, \text{ მგპა.}$$

2. დენადობის ზღვარი $\sigma_{დენ}$. გაჭიმვის დიაგრამაზე მას შეესაბამება კორიზონტალური უბანი BC. იგი არის მაქსიმალური ძაბვა, რომლის დროსაც ნიმუში დეფორმაციას განიცდის დატვირთვის გაუზრდელად:

$$\sigma_{\text{დენ}} = P_{\text{დენ}} / F_0, \text{ მგპა}$$

ლითონთა უმრავლესობისათვის გაჭიმვის მრუდზე დენადობის ზღვარი მკაფიოდ არ არის გამოხატული. ასეთ შემთხვევაში მიმართავენ დენადობის პირობითი ზღვრის გამოთვლას. ეს არის ძაბვა, რომლის დროსაც წარმოქმნილი წაგრძელება ნიმუშის საწყისი სიგრძის 0,2%-ს შეადგენს. იგი აღინიშნება $\sigma_{0,2}$ სიმბოლოთი.

3. სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვისას $\sigma_{\text{მაქს}}$. იგი არის მაქსიმალური ძაბვა, რომელსაც ლითონი უძლებს რღვევამდე:

$$\sigma_{\text{მაქს}} = P_{\text{მაქს}} / F_0, \text{ მგპა.}$$

4. ფარდობითი წაგრძელება δ . იგი არის ნიმუშის სიგრძის ნამატის შეფარდება საწყის სიგრძესთან და გამოისახება პროცენტებით:

$$\delta = (\ell_k - \ell_0) / \ell_0 = (\Delta \ell / \ell_0) \times 100, \%$$

სადაც ℓ_0 არის ნიმუშის საწყისი სიგრძე, ℓ_k – საბოლოო სიგრძე, $\Delta \ell_0$ – ნიმუშის სიგრძის ნამატი გაჭიმვაზე გამოცდის შემდეგ.

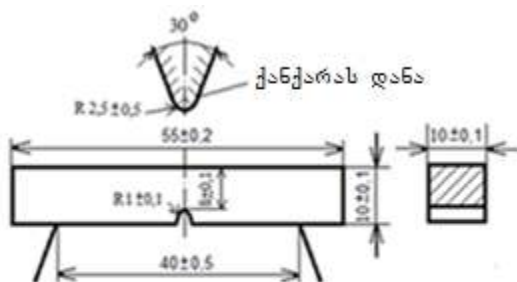
5. ფარდობითი შევიწროება ψ . იგი არის განივკვეთის ფართობის მაქსიმალური შემცირების ფარდობა საწყისი განივკვეთის ფართობთან:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%,$$

სადაც F_0 არის ნიმუშის საწყისი განივკვეთის ფართობი, F_k – საბოლოო ფართობი ნიმუშის მაქსიმალურად შევიწროების უბანში.

$\sigma_{\text{პრ}}$, $\sigma_{\text{დენა}}$ $\sigma_{\text{მაქს}}$ სიმტკიცის მახასიათებლებია, ხოლო δ და ψ – პლასტიკურობის მაჩვენებლები.

3.2.2. დარტყმითი სიბლანტე



სურ. 3.2. დარტყმითი სიბლანტეზე გამოცდის სქემა

ლითონის მექანიკური თვისებების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია დარტყმითი სიბლანტე a_6 (ნ – ნასერი). იგი განისაზღვრება სპეციალურად მომზადებული ნიმუშის (სურ. 3.2) გადატეხაზე დახარჯული მუშაობის (A) შეფარდებით ჩანაჭერთან ნი-

მუშის განიკვეთის ფართობთან(F):

$$a_6 = A/F, \text{მგჯ/მ}^2.$$

საპასუხისმგებლო დეტალების დარტყმითი სიბლანტე მაღალი უნდა იყოს. მაგალითად, საავიაციო ძრავას ლილვისათვის $a_6 = 1-1,1$ მგჯ/მ²; იარაღის ლულისათვის $a_6 = 0,6-0,7$ მგჯ/მ²; დეტალებისათვის, რომლებიც მუშაობს დინამიკური დატვირთვის პირობებში, დაუშვებელია დარტყმითი სიბლანტის დაბალი მნიშვნელობა ($a_6 \geq 0,15$ მგჯ/მ²).

3.2.3. სისაღე

სიმტკიცის მახასიათებლების შესაფასებლად სარგებლობენ აგრეთვე სისაღის განსაზღვრის მეთოდით, რომელიც არ მოითხოვს ნაკეთობის მთლიანობის დარღვევას. სისაღეს აღნიშნავენ H სიმბოლოთი.

სისაღე არის ლითონის უნარი, წინააღმდეგობა გაუწიოს დრეკად ან პლასტიკურ დეფორმაციას მასში გარეშე, უფრო სალი სხეულის შეჭრის შემთხვევაში. სისაღის განსაზღვრის არაერთიმეთოდი არსებობს, რომელთაგან ყველაზე გავრცელებულია:

ა) **ბრინელის მეთოდი.** ამ ხერხით სისაღის განსაზღვრისას გამოსაცდელ ნიმუშში წინასწარ შერჩეული P ძალით იწნეხება D დიამეტრის ფოლადის ნაწრთობი ბურთულა (სურ. 3.3, ა). ბურთულას დიამეტრი (D=10; 5; 2,5 მმ) დადატვირთვის სიდიდე შეირჩევა გამოსაცდელი მასალის სისქის მიხედვით. სისაღე აღინიშნება HB სიმბოლოებით (Bგამოცდის მეთოდის აღმნიშვნელი სიმბოლოა) და გამოითვლება დატვირთვის შეფარდებით ნიმუშზე მიღებული სფერული ანაბეჭდის ზედაპირის ფართობთან:

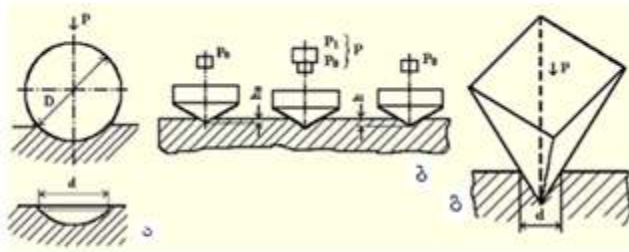
$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \times 10 \text{მგპა},$$

სადაც P არის დატვირთვის სიდიდე, კგ; F – ანაბეჭდის ზედაპირის ფართობი, მმ²;

D – ბურთულას დიამეტრი, მმ; d – ანაბეჭდის დიამეტრი, მმ.

სისაღის მნიშვნელობის აღება შესაძლებელია უშუალოდ სათანადო სტანდარტული ცხრილებიდანაც. თუ მაგალითად, გაზომვის შედეგად მიღებულია რიცხვი 350, სისაღის მნიშვნელობა შემდეგნაირად ჩაიწერება: HB 350.

ბ) როკველის მეთოდი. როკველის ხერხით სისხლის გამოცდისას იდენტორად გამოიყენება ალმასის კონუსი ან ფოლადის ნაწრთობი ბურთულა (სურ. 3.3, ბ). სისხლის მნიშვნელობად მიღებულია ჩაწნეხის სიღრმის (h_0) შებრუნებული სიდიდე. ანათვალი უშუალოდ ხელსაწყოს სკალიდან აიღება. ხელსაწყოს აქვს ორი სკალა – C და B. ალმასის კონუსით გამოიცდება ნაწრთობი და სალი ნიმუშები. გამოცდისას დატვირთვის სიდიდე 150 კგ შეადგენს, ანათვალი C სკალიდან აიღება და



სურ. 3.3. სისხლის განსაზღვრის მეთოდების სქემა.
ა - ბრინელის მეთოდი; ბ - როკველის მეთოდი;
გ - ვიკერსის მეთოდი

აღინიშნება HRC სიმბოლოებით. მაგალითად, 50 HRC. ანალოგიურად, როდესაც დატვირთვის სიდიდე შეადგენს 60 კგ, სისხლე იგივე C სკალიდან აიღება, მაგრამ აღინიშნება HRA სიმბოლოებით. ამ მეთოდით ძირითადად გამოიცდება თხელი ფირები, დანაფარები და მეტად სალი ნიმუშები.

ნაწრთობი ბურთულით აწარმოებენ შედარებით რბილი მასალების გამოცდას. დატვირთვის სიდიდეა 100 კგ, სისხლე ჩაწერება სიმბოლოებით HRB. მაგალითად, 30 HRB.

გ) ვიკერსის მეთოდი. ამ ხერხით სისხლის განსაზღვრისას გამოსაცდელ ნიმუშში ალმასის პირამიდა იწნეხება და იზომება ანაბეჭდის დიაგონალის სიგრძე d (სურ. 3.3, გ). სისხლე HV გამოითვლება ფორმულით:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

სადაც P არის დატვირთვის სიდიდე, კგ; d – ანაბეჭდის დიაგონალის სიგრძე, მმ.

დატვირთვის სიდიდე, უმეტეს შემთხვევაში, შეირჩევა ექსპერიმენტულად. სისხლის მნიშვნელობა აიღება სათანადო ცხრილებიდანაც.

არსებობს შესაბამისი ცხრილები, რომელთა საშუალებით შესაძლებელია ერთი მეთოდით გაზომილი სისხლის მნიშვნელობის გადაყვანა მეორეში, მათ შორის ბრინელის ერთეულებში.

სისხლე, როგორც თვისებათა ძირითადი მახასიათებელი, ფართოდ არის გამოყენებული მინეროლოგიაშიც. აქ შემოღებულია ე.წ. მოოსის სკალა, რომელშიც

მინერალები განლაგებულია მწკრივში იმის მიხედვით, თუ რომელი რომელზე სტოვებს კვალს (ნაკაწრს). მოოსის სკალაში სულ ათი ერთეულია. პირველ ადგილზე აქ დგას თაღკი, სისალით 1. იგი ცნობილი მინერალებიდან ყველაზე რბილია. შემდეგ სკალაში განლაგებულია ქვამარილი, კირქვა, შპატი, მდნობი შპატი და ა. შ. მეცხრე ადგილზეა კორუნდი, ხოლო მეათეზე – ალმასი, რომლის სისაღე განისაზღვრება 10 ერთეულით. ბუნებრივი მინერალებიდან ალმასი ყველაზე უფრო საღია, ამიტომაც ალმასი ძნელად მუშავდება და გამოიყენება მისი ფხვნილი.

ლითონის სისაღის მოოსის სკალით დახასიათება ლითონმცოდნეობაში არ გამოიყენება, რადგან იგი არ იძლევა ზუსტ და საიმედო რაოდენობრივ ინფორმაციას.

3.3. ციფქედვა და რეპრისენტალიზაცია

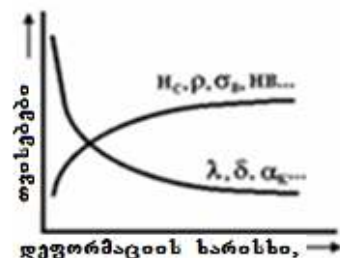
როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ლითონის პლასტიკური დეფორმაცია ხდება გარეშე ძალის ზემოქმედების პირობებში. 3.1 სურათზე წარმოდგენილი პლასტიკური ლითონის გაჭიმვის მრუდის ანალიზიდან გამომდინარე, ძაბვის რაღაც მნიშვნელობის ზემოქმედებით ლითონი გარკვეულ დეფორმაციას განიცდის, რის შემდეგაც ის ჩერდება. უკვე დეფორმირებული ლითონის შემდგომი დეფორმაციისათვის საჭიროა მოქმედი ძალის გაზრდა. ამასთან, რაც უფრო მეტად არის ლითონი დეფორმირებული, მით უფრო მეტი ძალის მოდებაა საჭირო, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ ცივად პლასტიკური დეფორმაციის პროცესში ლითონი განმტკიცებას განიცდის. ამ მოვლენას ციფქედვა ეწოდება.

ციფქედვის ეფექტი განპირობებულია იმ სტრუქტურული ცვლილებით, რომელიც ლითონში დეფორმაციის დროს მიმდინარეობს. თავდაპირველად, ნებისმიერად ორიენტირებული მარცვლები შემობრუნებას იწყებს და მაქსიმალური სიმტკიცის ღერძებით ლითონის დინების მიმართულებით განლაგდება. შემდგომში, ტოლდერძა მარცვლები წაგრძელებას იწყებს დეფორმაციის მიმართულებით და სტრუქტურა ბოჭკოვან აგებულებაში გადადის (ნახ.3.4). მარცვლების კანონზომიერ ორიენტაციას გარედან მიყენებული დეფორმირებადი ძალის მოქმედებით დეფორმაციის ტექსტურას უწოდებენ. მარცვალში ერთდროულად მიმდინარეობს ბლოკების მსხვრევა და კრისტალური გისოსის დამახინჯება. იზრდება დისლოკაციის სიმკვრივე.

ამგვარად, ცივნაჭედი ლითონის სტრუქტურა დაძაბულია და არამდგრადი, სათანადოდ შეცვლილია თვისებებიც: სისაღე და სიმტკიცე გაზრდილია, ხოლო პლასტიკურობა – შემცირებული (სურ. 3.5). აქედან გამომდინარე, პლასტიკურ დეფორმაციას ლითონი სტრუქტურულად არაწონა-



სურ. 3.4. პოლიკრისტალის დეფორმაციის სქემა

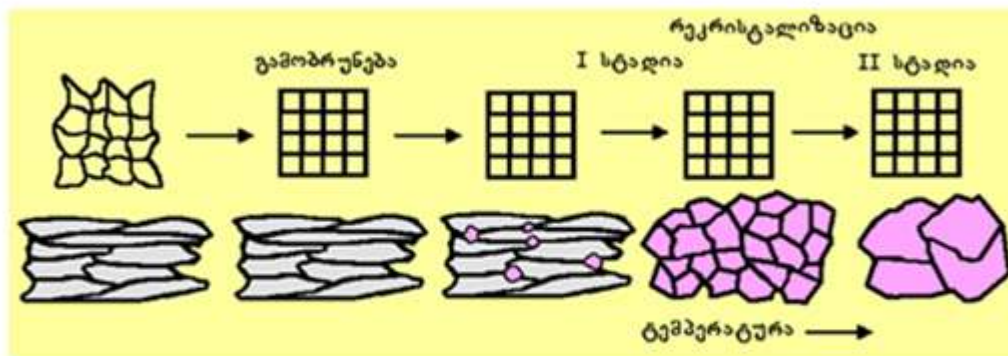


სურ. 3.5. ლითონის თვისებების დამოკიდებულება დეფორმაციის ხარისხზე

სწორულ მდგომარეობაში გადაყავს.

ოთახის ტემპერატურაზე ასეთი მდგომარეობა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში შენარჩუნდება. ტემპერატურის გაზრდა აჩქარებს წონასწორულ მდგომარეობაში მისი დაბრუნების პროცესის მიმდინარეობას. შედარებით დაბალ ტემპერატურაზე გარდაქმნები მხოლოდ მარცვლებისა და კრისტალური გისოსის შიგნით მიმდინარეობს, რის შედეგადაც აღდგება კრისტალური გისოსის გეომეტრიული ფორმა (სურ. 3.6). ამ მოვლენას გამობრუნება ეწოდება. გამობრუნების შედეგად ლითონის სისაღედა სიმტკიცე 20–30%-ით მცირდება, ხოლო პლასტიკურობა – მატულობს.

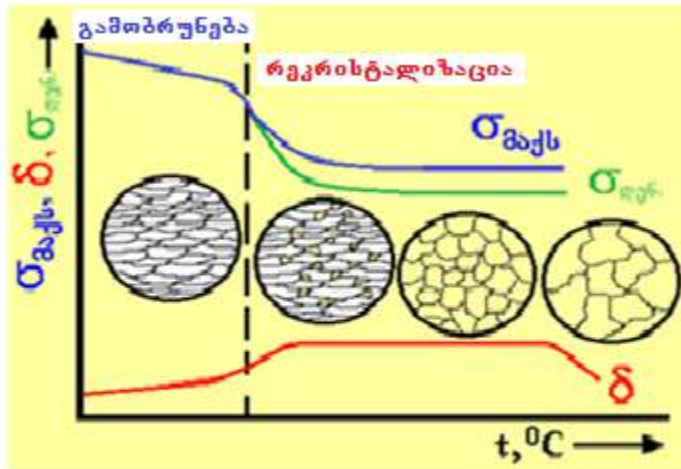
ტემპერატურის შემდგომი აწევით იზრდება ატომების ძვრადობის უნარი, რაც განაპირობებს ცვლილების მიმდინარეობას მიკროსტრუქტურაში. დამახინჯებული,



სურ. 3.6. გახურებისას ცივნაჭედი ლითონის სტრუქტურის ცვლილებების სქემა

არაწონასწორული ბლოკებისა და მარცვლების საზღვრებში ჩაისახება და იზრდება ახალი, წონასწორული მარცვლები ძველის მოსპობის ხარჯზე. ამ პროცესს პირველადი რეკრისტალიზაცია (რეკრისტალიზაციის I სტადია) ეწოდება.

პირველადი რეკრისტალიზაციის შედეგად ცივჭედვის მოვლენა მთლიანად იხსნება. შესაბამისად იცვლება ლითონის თვისებებიც: სისალე და სიმტკიცე მცირდება, ხოლო პლასტიკურობა და სიბლანტე მატულობს იმ მნიშვნელობამდე, რომელიც ლითონს ცივჭედვამდე ჰქონდა (სურ. 3.7).

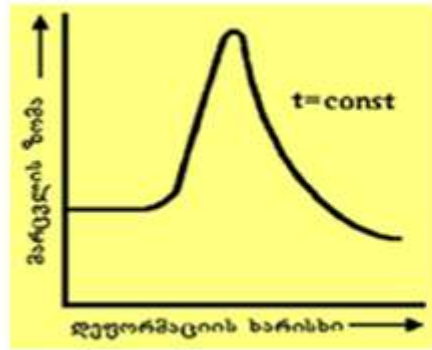


სურ. 3.7. ცივნაჭედი ლითონის თვისებების ცვლილების ხასიათი რეკრისტალიზაციის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით

გორც რეკრისტალიზაციის ტემპერატურაზე, ისე წინასწარი დეფორმაციის ხარისხზე. ბუნებრივია, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მარცვლის სიდიდე განუხრელად იზრდება.

რაც შეეხება წინასწარი დეფორმაციის ხარისხს, აქ მდგომარეობა განსაკუთრებულია. თუ წინასწარი დეფორმაციის ხარისხი მცირეა (3–5%) ან აღემატება 10%, მარცვლის ზრდის საშიშროება რეკრისტალიზაციის ოპტიმალურ ტემპერატურაზე არ არსებობს – პროცესის დამთავრების შემდეგ ყალიბდება საკმაოდ წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა (სურ. 3.8), რაც თვისებათა კარგ კომპლექსს უზრუნველყოფს. თუ წინასწარი დეფორმაციის ხარისხი 5–10%-ის ზღვრებში მერყეობს, რეკრისტალიზაციის II სტადიაში მოსალოდნელია მარცვლის ზომის ინტენსიური ზრდა, რაც პრინციპულად არასასურველი მოვლენაა. ზოგ შემთხვევაში, როდესაც

პირველადი რეკრისტალიზაციის დამთავრების შემდეგ ტემპერატურის შემდგომი ამაღლებათა შედეგად რეკრისტალიზებული სტრუქტურის მარცვლების ზრდას (სურ. 3.6, რეკრისტალიზაციის II სტადია). პროცესს მეორეულ რეკრისტალიზაცია-საც უწოდებენ. მეორეული რეკრისტალიზაციის დროს მარცვლის ზრდა დამოკიდებულია რო-



სურ. 3.8. დეფორმაციის ხარისხსა და მარცვლის ზომას შორის დამოკიდებულების ხასიათი სარეკრისტალიზაციო მოწვის დროს

დეტალის, მაგალითად, ტურბინის დისკოს, აირტურბინისა ან კომპრესორის თათის განიკვეთში ჭედვის ან ტვიფრვის პროცესში დეტალის დეფორმაციის ხარისხი სხვადასხვაა, რეკრისტალიზაციის ტემპერატურამდე გახურებამ შეიძლება გამოიწვიოს სხვადასხვა მარცვლოვნობის მქონე სტრუქტურის ჩამოყალიბება ნაკეთობის მოცულობაში. ასეთი დეტალები გამოუსადეგარია, რადგან ექსპლუატაციაში კარგავს სიმტკიცეს და ნაადრევად გამოდის მწყობრიდან. მოცემულ შემთხვევაში რეკრისტალიზაცია უარყოფით ზემოქმედებას ახდენს დეტალის საექსპლუატაციო თვისებებზე.

რეკრისტალიზაციის მოვლენას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. უპირველეს ყოვლისა, იგი საშუალებაა ციფნაჭედ ლითონში წონასწორული სტრუქტურისა და, აქედან გამომდინარე, პლასტიკურობის აღსადგენად.

დეფორმაციის ხარისხს, რომელიც რეკრისტალიზაციის პროცესში მარცვლების ინტენსიური სიჩქარით ზრდას განაპირობებს, კრიტიკული დეფორმაციის ხარისხი ეწოდება.

თაზო IV

შენადნობთა აბეზულება

ორი ან მეტი ელემენტის შედნობით მიღებულ ნივთიერებას შენადნობი ეწოდება. ტრადიციულად, შენადნობებს ღებულობენ თხევად მდგომარეობაში ფუძელთონთან სხვადასხვა ნივთიერების შედნობით. არსებობს შენადნობის მიღების სხვა ხერხებიც, როგორიცაა, მაგალითად: კომპონენტების შეცხოვა, დიფუზიური გაჯერება, ელექტროლიზი, პლაზმური დაფრქვევა, ვაკუუმში ორთქლის ფაზიდან კომპონენტების კონდენსაცია. ამ ხერხებით მიღებულ შენადნობს ფსევდოშენადნობი ეწოდება. თუ შენადნობი უპირატესად ლითონური ელემენტებისგან არის დამზადებული და ლითონური თვისებები ახასიათებს, მას ლითონურ შენადნობს უწოდებენ.

ლითონური შენადნობის აგებულება უფრო რთულია სუფთა ლითონებთან შედარებით. თხევად მდგომარეობაში ელემენტის უმრავლესობა ერთმანეთში განუსაზღვრელად იხსნება (გამონაკლისია, მაგალითად, რკინა და ტყვია, რკინა და ბისმუტი), მყარ მდგომარეობაში კი შეიძლება მიკრომექანიკური ნარევი, ქიმიური ნაერთი ან მყარი ხსნარი წარმოიქმნას. შენადნობის მიღების ერთ-ერთი ძირითადი პირობა იმაში მდგომარეობს, რომ კომპონენტები თხევად მდგომარეობაში ერთმანეთში განუსაზღვრელად უნდა იხსნებოდეს.

4.1. მიკრომექანიკური ნარევი

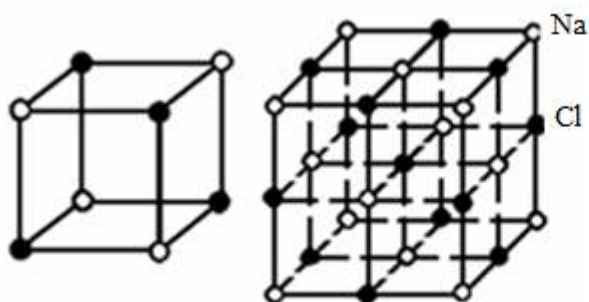
მიკრომექანიკური ნარევი იმ შემთხვევაში მიიღება, როდესაც A და B საწყისი კომპონენტები მყარ მდგომარეობაში ერთმანეთში უხსნადია და არც ქიმიურ ნაერთს წარმოქმნის. გამყარებისას ცალკე ჩაისახება და იზრდება A კომპონენტის მარცვლები, ცალკე - B კომპონენტისა. შედეგად ჩამოყალიბდება A და B მარცვლების მიკრომექანიკური ნარევი (სურ. 4.1). შენადნობის შემადგენელი ყოველი მარცვლის კრისტალური გისოსი დათვისებები სავსებით ეთანადება შესაბამისი სუფთა ელემენტის აგებულებასა და თვისებებს. ამდენად, მიკრომექანიკური ნარევი ორჯაზა შენადნობს მიეკუთვნება. მისი თვისებები საშუალოა შემადგენელი ელემენტების თვისებებს შორის და დამოკიდებულია შენადნობში ამ ელემენტების კონცენტრაციაზე.



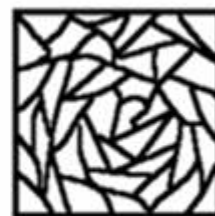
სურ. 4.1. მიკრომექანიკური ნარევის მიკროსტრუქტურის სქემა

4.2. ქიმიური ნაერთი

როდესაც შენადნობის შემადგენელი კომპონენტები რაღაც კონცენტრაციაზე ქიმიურ ნაერთს წარმოქმნის, მაშინ კრისტალიზაციის პროცესში ჩამოყალიბდება როგორც A, ისე B კომპონენტისგან განსხვავებული, სპეციფიკური კრისტალური გისოსი, რომელიც ერთდროულად ორივე ელემენტის ატომებს შეიცავს. ატომების განლაგება კრისტალურ გისოსში მოწესრიგებულია (სურ. 4.2) და დაცულია მათი სტექიომეტრიული თანაფარდობა, რაც მარტივი ქიმიური ფორმულით



სურ. 4.2. NaCl-ის კრისტალური გისოსის სქემა



სურ. 4.3. ქიმიური ნაერთის მიკროსტრუქტურის სქემა

გამოიხატება: A_nB_m .

ქიმიური ნაერთი ხასიათდება ღნობის ან დისოციაციის გარკვეული, მუდმივი ტემპერატურით და შემაღლენელი ელემენტებისგან მკვეთრად განსხვავებული ე.წ. სინგულარული თვისებებით. შედგენილობიდან მცირეოდენი გადახრა იწვევს თვისებების ნახტომისებრ ცვლილებას.

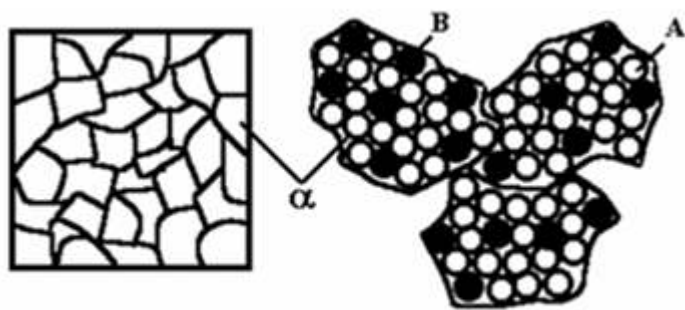
ამგვარად, ქიმიური ნაერთი ერთფაზა შენადნობია. მისი სტრუქტურა შედგენილია ერთგვაროვანი ქიმიური ნაერთის კრისტალებისაგან (სურ. 4.3).

4.3. მყარი ხსნარი

ლითონური შენადნობების უმრავლესობის, რომლებიც ტექნიკაში გამოიყენება, მყარ მდგომარეობაში გადასვლისას კომპონენტების ურთიერთხსნადობა შენარჩუნებულია. ასეთ შენადნობს მყარ ხსნარებს უწოდებენ.

მყარი ხსნარის კრისტალიზაციისას ჩამოყალიბდება ერთ-ერთი შემაღლენელი კომპონენტის კრისტალური გისოსი, რომელშიც ადგილს იკავებს მეორე კომპონენტის ატომებიც. ატომების განლაგება კრისტალურ გისოსში მოუწესრიგებელი, სტატისტიკურია. იმ ელემენტს, რომლის კრისტალური გისოსიც შენარჩუნებულია, გამხსნელი ეწოდება, ხოლო მეორეს – გახსნილი. ამგვარად, მყარი ხსნარი არის ერთფაზა შენადნობი, რომლის კომპონენტები საერთო კრისტალურ გისოსს

წარმოქმნის. მისი სტრუქტურა ერთგვაროვანი მყარი ხსნარის კრისტალებისგან არის შედგენილი (სურ. 4.4).

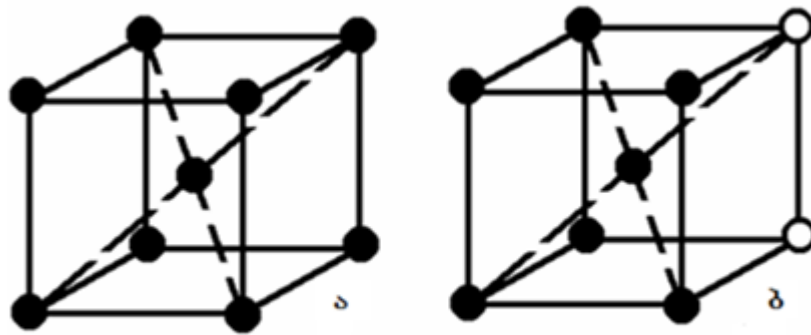


სურ. 4.4. მყარი ხსნარის მიკროსტრუქტურის სქემა

იმის მიხედვით, თუ როგორ არის განლაგებული გახსნილი ელემენტის ატომები გამხსნელის კრისტალურ გისოსში,

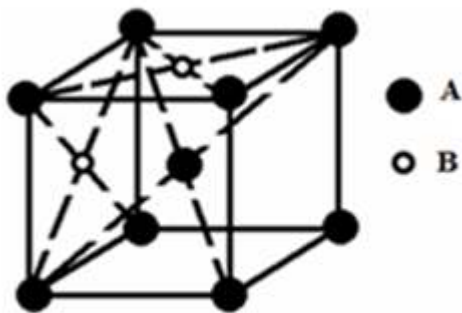
მყარი ხსნარი ძირითადად ორგვარია: ჩანაცვლების და ჩანერგვის. ჩანაცვლების მყარი ხსნარი წარმოიქმნება იმ შემთხვევაში, როდესაც გამხსნელის გისოსში ზოგიერთი ატომი (შენადნობის კონცენტრაციის შესაბამისად) შეცვლილია გახსნილი ელემენტის ატომებით (სურ.4.5). ჩა-ნაცვლების მყარი ხსნარი, თავის მხრივ, შეიძლება იყოს განუსაზღვრელი და განსაზღვრული ხსნადობის. განუსაზღვრელი ხსნადობის შემთხვევაში გამხსნელის ატომების ნებისმიერი რაოდენობა შეიძლება შეიცვალოს გა-

ხსნილი ელემენტის ატომებით. განუსაზღვრელი მყარი ხსნარების წარმოქმნის ერთ-ერთი უმთავრესი პირობაა კომპონენტების კრისტალური გისოსების მსგავსება და ატომის ზომებს შორის მინიმალური განსხვავება. დადგენილია, რომ რკინაში განუსაზღვრელი რიგის მყარი ხსნარები წარმოიქმნება იმ შემთხვევაში, როდესაც ატომის ზომებს შორის სხვაობა 8%-არ აღემატება სპილენძში – 10–11%, ხოლო ადვილ-



სურ. 4.5. სუფთა ლითონის (ა) და ჩანაცვლების მყარი ხსნარის (ბ) კრისტალური გისოსის სქემა

დნობადი ელემენტები განუსაზღვრელად იხსნება ერთმანეთში ზომებს შორის 17% სხვაობის შემთხვევაშიც კი. უმრავლეს შემთხვევაში ტემპერატურის შემცირებით მყარ ხსნარებში ხსნადობის ზღვარი მცირდება.



სურ. 4.6. ჩანერგვის მყარი ხსნარის კრისტალური გისოსის სქემა

ჩანერგვის მყარი ხსნარის წარმოქმნის შემთხვევაში გახსნილი ელემენტის ატომები ჩანერგება გამხსნელის კრისტალური გისოსის თავისუფალ ადგილებში (სურ. 4.6). გახსნილი ატომის ზომა, უმრავლეს შემთხვევაში აღემატება იმ სიცარიელის სიდიდეს, სადაც იგი ჩანერგა. აქედან გამომდინარე, გამხსნელის კრისტალური გისოსი ყოველთვის მახინჯდება და ამდენად ჩანერგვის მყარი ხსნარი ყოველთვის განსაზღვრულია.

თაზო V

რკინა-ნახშირბადის შენადნობები

ტექნიკაში ყველაზე მეტად რკინა-ნახშირბადის შენადნობები – ფოლადი და თუჯი გამოიყენება. ფოლადი და თუჯი, გარდა რკინისა და ნახშირბადისა, შეიცავს მუდმივ მინარევებს - Si, Mn, P და S. ეს მინარევები გარკვეულ გავლენას ახდენს ფოლადისა და თუჯის თვისებებზე. მიუხედავად ამისა, თეორიულად ფოლადი და თუჯი მიჩნეულია ორკომპონენტიან რკინა-ნახშირბადის შენადნობებად, ხოლო დამატებითი ელემენტების გავლენას ცალკე განიხილავენ. ამდენად, რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში მიმდინარე წონასწორულ გარდაქმნებს და მათ საბოლოო სტრუქტურას რკინა-ნახშირბადის მდგომარეობის დიაგრამის მიხედვით აღწერენ.

5.1. რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამა

5.1.1. ძირითადი კომპონენტების დახასიათება

რკინა-ნახშირბადის საწარმოო შენადნობების ძირითადი კომპონენტები, რომლებიც შენადნობების სტრუქტურასა და თვისებებს განსაზღვრავს, არის რკინა და ნახშირბადი. რკინის დნობის ტემპერატურაა 1539°C , სიმკვრივე – $7,684 \text{ გ/სმ}^3$. ხასიათდება დაბალი სისაღითა და სიმტკიცით (HB 80; $\sigma_{\text{მკვ.}}=250-300 \text{ მგპა}$), მაღალი პლასტიკურობითა და სიბლანტით ($\delta=50\%$; $\psi=85\%$; $a_{\text{ნახ}}=3 \text{ მგჯ/მ}^2$).

რკინა მრავალ ელემენტთან მყარ ხსნარებს წარმოქმნის. განსაკუთრებით საყურადღებოა რკინაში ნახშირბადის მყარი ხსნარების წარმოქმნა. ნახშირბადის ხსნადობის ზღვარი არსებითად არის დამოკიდებული რკინის კრისტალურ მოდიფიკაციაზე. α რკინაში ნახშირბადი უმნიშვნელოდ იხსნება ($0,02\%$ -მდე), ხოლო γ მოდიფიკაციაში ხსნადობის ზღვარი ასჯერ მეტია ($2,14\%$ -მდე).

ნახშირბადისა და სხვა ელემენტების მყარ ხსნარებს γ რკინაში აუსტენიტს უწოდებენ, ხოლო α რკინაში – ფერიტს.

ნახშირბადი მეტალოიდია, რომლის ორი მოდიფიკაციაა ცნობილი – გრაფიტი და ალმასი. რკინა ნახშირბადთან იძლევა ქიმიურ ნაერთს – ცემენტიტს (Fe_3C), რომელიც 6,67% ნახშირბადს შეიცავს. რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში ნახშირბადი შეიძლება არსებობდეს როგორც ცემენტიტის, ისე თავისუფალი, გრაფიტის სახით. გრაფიტი რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში ყველაზე დაბალმტკიცე ფაზას წარმოადგენს.

5.1.2. რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამის

ანალიზი

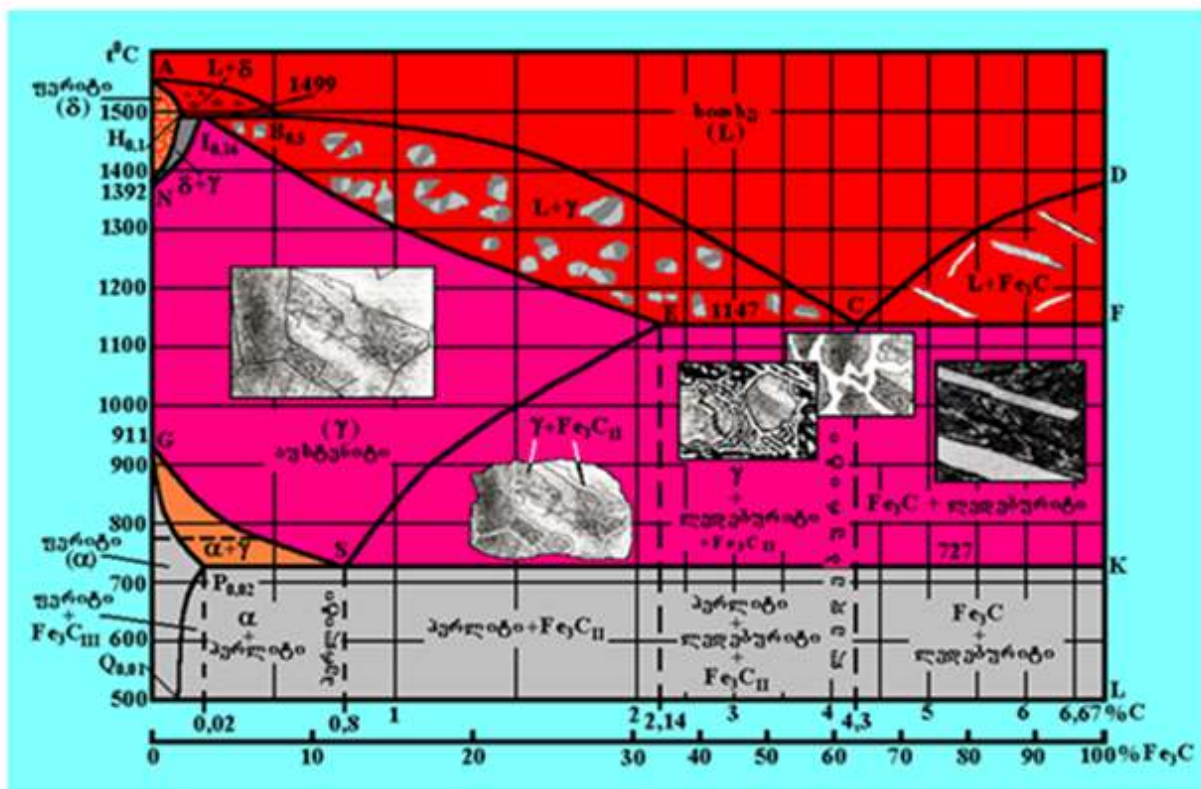
მდგომარეობის დიაგრამა მოცემულ სისტემაში გახურება-გაცივებისას შენადნობებში მიმდინარე გარდაქმნების გრაფიკული გამოსახულებაა. 5.1 სურათზე წარმოდგენილია რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამა. იგი მოიცავს არა მთელი Fe-C სისტემის შენადნობებს, არამედ შეწყვეტილია იქ, სადაც რკინა ნახშირბადთან ცემენტიტს იძლევა. რკინა-ნახშირბადის შენადნობების სტრუქტურისა და თვისებების თავისებურებას ის გარემოება განსაზღვრავს, რომ ნახშირბადი წარმოქმნის ჩანერგვის მყარი ხსნარების ფართო არეს γ რკინასთან, α რკინასთან კი ხსნადობა მეტად შეზღუდულია.

დიაგრამის მიხედვით, შენადნობების კრისტალიზაცია იწყება **ABCD** ხაზზე, რომელსაც ლიკვიდუსის ხაზი ეწოდება. შესაბამისად, ლიკვიდუსის ხაზის ზემოთ სისტემის ნებისმიერი შენადნობი თხევად მდგომარეობაშია. კრისტალიზაციის პროცესი მთავრდება **AHIECF** ხაზზე. მას სოლიდუსის ხაზს უწოდებენ. ამ ხაზის ქვემოთ სისტემის ნებისმიერი შენადნობი მყარ მდგომარეობაშია. კრისტალიზაციის პროცესი ლიკვიდუსისა და სოლიდუსის ხაზებს შორის მიმდინარეობს.

ლიკვიდუსის **ABC** შტოზე პირველადი კრისტალიზაციისა და მაღალტემპერატურული ფაზური გარდაქმნების შემდეგ ყალიბდება ნახშირბადის მყარი ხსნარი რკინის γ მოდიფიკაციაში, რომელსაც აუსტენიტი ეწოდება. ლიკვიდუსის **CD** შტოზე კი სითხიდან გამოკრისტალდება იწყებს რკინისა და ნახშირბადის ქიმიური ნაერთი, ცემენტიტი, Fe_3C .

შენადნობი, რომელიც 4,3% ნახშირბადს შეიცავს, რამდენიმე თავისებურებით ხასიათდება:

1. სუფთა ლითონების მსგავსად, მისი კრისტალიზაცია მუდმივ ტემპერატურაზე მიმდინარეობს (C წერტილში ლიკვიდუსისა და სოლიდუსის ხაზები თანხვედნილია);
2. კრისტალიზაციის (დნობის) ტემპერატურა მინიმალურია (ლიკვიდუსის



სურ. 5.1. რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა მდგომარეობის დიაგრამა.

CB და CD შტოები აღმავალია) და 1147°C შეადგენს;

3. კრისტალიზაციის პროცესში ერთდროულად ხდება როგორც აუსტენიტის, ისე ცემენტიტის კრისტალების გამოყოფა და მიიღება მათი მიკრომექანიკური ნარევი, რომელსაც ლედებურიტი ეწოდება. ასეთი შენადნობი რკინა-ნახშირბადის სისტემაში ერთადერთია და მას ევტექტიკურ (აღვილდნობად) შენადნობს უწოდებენ.

ევტექტიკის წერტილის მიხედვით შენადნობები სამ ჯგუფად იყოფა: ქვეევტექტიკური, რომელიც 2,14%-დან 4,3%-მდე ნახშირბადს შეიცავს; ევტექტიკური, რომე-

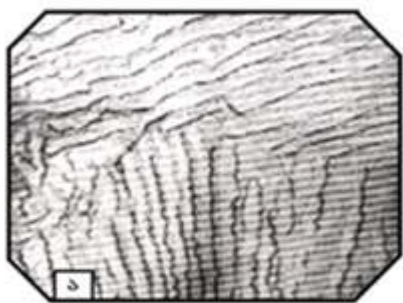
ლიც 4,3% ნახშირბადს შეიცავს და ზევეტექტიკური – ნახშირბადის 4,3%-დან 6,67%-მდე შემცველობით.

ქვევეტექტიკურ შენადნობებში პირველადი კრისტალიზაცია იწყება ლიკვიდუსის **BC** შტოზე აუსტენიტის გამოკრისტალებით, ხოლო ზევეტექტიკურ თუჯებში – ლიკვიდუსის **CD** შტოზე ცემენტიტის გამოკრისტალებით. პირველ შემთხვევაში სითხე მდიდრდება ნახშირბადით, ხოლო მეორე შემთხვევაში – ღარიბდება და 1147°C ტემპერატურაზე მათი კონცენტრაცია ევტექტიკურის (4,3%) შესაბამისი ხდება. ამ მომენტიდან იწყება სითხის ევტექტიკური დაშლა, რის შედეგადაც კრისტალიზაციის დამთავრების მომენტში ქვევეტექტიკურ შენადნობებში ყალიბდება სტრუქტურა – აუსტენიტი+ღედებურიტი, ხოლო ზევეტექტიკურში – ღედებურიტი+ცემენტიტი.

ამგვარად, შენადნობებში, რომლებიც 2,14%-ზე მეტ ნახშირბადს შეიცავს (E წერტილის მარჯვნივ Fe-C დიაგრამაზე), კრისტალიზაციის პროცესი ევტექტიკის (ღედებურიტის) წარმოქმნით მთავრდება, რაზედაც **ECF**ჰორიზონტალი მიუთითებს. მათ თუჯები ეწოდება. ხოლო შენადნობებს, რომლებიც 2,14%-მდე ნახშირბადს შეიცავს (E წერტილის მარცხნივ Fe-C დიაგრამაზე) და პირველადი კრისტალიზაცია აუსტენიტის წარმოქმნით მთავრდება – ფოლადებს.

პირველადი კრისტალიზაციის დამთავრების შემდეგ, გაცივების პროცესში, შენადნობებში მიმდინარეობს მეორეული გარდაქმნები, რაც რკინის ალოტროპიზმით და აუსტენიტში ნახშირბადის ცვალებადი ხსნადობით არის განპირობებული. კერძოდ, აუსტენიტი ოთახის ტემპერატურამდე მდგრადობას არ ინარჩუნებს და დაშლას განიცდის. აუსტენიტის დაშლა ფოლადებში **GSE** ხაზზე იწყება და **GPSK** ხაზზე მთავრდება.

შენადნობი, რომელიც 0,8% ნახშირბადს შეიცავს (S წერტილი Fe-C დიაგრამაზე), ევტექტიკური შენადნობის ანალოგიურად, სამი თავისებურებით ხასიათდება: აუსტენიტის დაშლის ტემპერატურა მინიმალურია; გარდაქმნა მიმდინარეობს მუდმივ ტემპერატურაზე (727°C); აუსტენიტის დაშლის შედეგად მიიღება ორი ახალი ფაზის – ფერიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევი, რომელსაც პერლიტი ეწოდება (სურ. 5.2). პროცესი ევტექტოიდური გარდაქმნის სახელწოდებითაა ცნობილი.



სურ. 52. ევტექტოიდური ფოლადის მიკროსტრუქტურა. x1500

ევტექტოიდური წერტილის (S) მიხედვით ფოლადები სამ ჯგუფად იყოფა: ქვეევტექტოიდური, რომელიც 0,02%-დან 0,8%-მდე ნახშირბადს შეიცავს, ევტექტოიდური – 0,8% ნახშირბადის შემცველობით და ზეევტექტოიდური, რომელიც 0,8%-დან 2,14%-მდე ნახშირბადს შეიცავს. შენადნობები 0,02%-მდე ნახშირბადის შემცველობით ტექნიკური რკინის სახელწოდებითაა ცნობილი.

ტექნიკურად სუფთა რკინაში, რომელშიც ნახშირბადის რაოდენობა 0,01% არ აღემატება (სურ. 5.1), მეორეული (აუსტენიტის უშუალოდ ფერიტად) გარდაქმნა **GS**



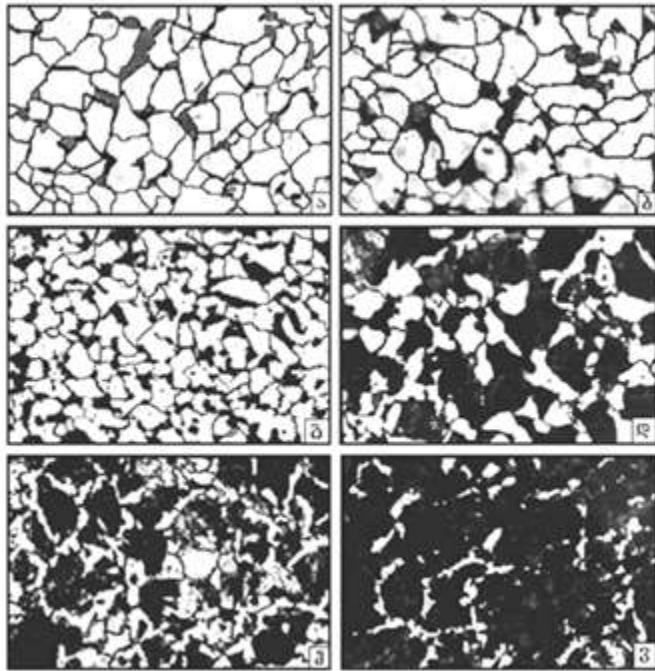
სურ. 53. ტექნიკური რკინის მიკროსტრუქტურა. x 400
ა- $C < 0,01\%$, ფერიტი; ბ- $C = 0,01-0,02\%$, ფერიტი და Fe_3C_{III} (თეთრი უბნები მარცვლის საზღვრებში)

ხაზზე იწყება. პროცესი **GP** ხაზზე მთავრდება და ოთახის ტემპერატურაზე ჩამოყალიბდება α მყარი ხსნარის კრისტალები – ფერიტი (სურ. 5.3, ა). α მყარ ხსნარში ნახშირბადის ხსნადობის ზღვარი ცვალებადია, რაზედაც **PQ** ხაზის დახრილი ხასიათი მიუთითებს –

727°C-ზე ფერიტში იხსნება 0,02% ნახშირბადი (P წერტილი), ხოლო ოთახის ტემპერატურაზე – 0,01% (Q წერტილი). ამიტომ, თუ ტექნიკურ რკინაში ნახშირბადის შემცველობა 0,01–0,2%-ის ზღვრებშია, ტემპერატურის შემცირებისას ფერიტის მარცვლის საზღვრებზე მოხდება ჭარბი ნახშირბადის გამოყოფა ცემენტიტის სახით (სურ. 5.3, ბ). მას მესამეულ ცემენტიტს უწოდებენ და აღინიშნება Fe_3C_{III} სიმბოლოთი.

სუფთა რკინა $\gamma \rightarrow \alpha$ გარდაქმნას 911°C-ზე განიცდის. აუსტენიტში $\gamma \rightarrow \alpha$ გარდაქმნა სუფთა რკინის ანალოგიურად მიმდინარეობს, მაგრამ აუსტენიტში გახსნილი ნახშირბადი გარდაქმნის ტემპერატურას დაბლა სწევს მით უფრო მეტად, რაც უფრო მეტი ნახშირბადია აუსტენიტში გახსნილი (GS ხაზი დიაგრამაზე). S წერტილში გარდაქმნის ტემპერატურა მინიმალურია და 727°C შეადგენს ამასთან გასათვალისწინებელია, რომ აუსტენიტში ნახშირბადის ხსნადობის ზღვარი ცვალებადია, რაზედაც ES ხაზის დახრილი ხასიათი მიუთითებს: 1147°C-ზე აუსტენიტში იხსნება

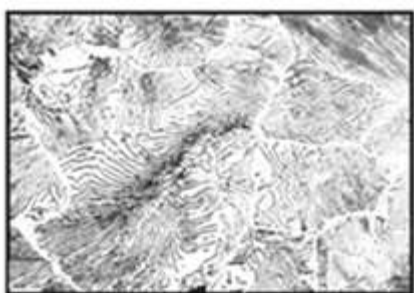
2,14%. ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად ხსნადობის ზღვარი მცირდება და 727°C-ზე 0,8% შეადგენს. აქედან გამომდინარე, ფოლადებში აუსტენიტის დაშლა GSE ხაზზე იწყება და GPSK ხაზზე მთავრდება (სურ. 5.1).



ნახ. 5.4. ფოლადის მიკროსტრუქტურა. x200. ნახშირბადის შემცველობა, %: ა-0,15; ბ-0,25; გ-0,30; დ-0,42; ე-0,5; ვ-0,6.

ქვევებტოიდურ ფოლადებში აუსტენიტიდან ფერიტის გამოკრისტალდება GS ხაზზე იწყება. ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად აუსტენიტი თანდათან მდიდრდება ნახშირბადით, მისი შედგენილობა იცვლება GS ხაზის შესაბამისად და 727°C-ზე 0,8%-ს აღწევს. პროცესი პერლიტური გარდაქმნით მთავრდება და ოთახის ტემპერატურაზე ყალიბდება ფერიტ-პერლიტური სტრუქტურა. რაც მეტია ფოლადში ნახშირბადი, მით მეტია სტრუქტურაში პერლიტური შემდგენი (სურ. 5.4).

აუსტენიტის დაშლა SE ხაზზე აუსტენიტის მარცვლის საზღვრებში ცემენტიტის გამოყოფით იწყება. პირველადი ცემენტიტისაგან განსხვავებით, მას მეორეულ ცემენტიტს უწოდებენ და აღნიშნავენ Fe_3C_{II} სიმბოლოთი. ცემენტიტის გამოყოფის გამო, აუსტენიტი ღარიბდება ნახშირბადით და 727°C-ზე მისი კონცენტრაცია 0,8%-მდე ეცემა. პროცესი ევტექტოიდური გარდაქმნით მთავრდება და ოთახის ტემპერატურაზე ყალიბდება ფერიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევი – პერლიტი, რომლის მარცვლები ცემენტიტის ბადით არის გარშემორტყმული (სურ. 5.5). როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ევტექტიკური თუჯის (4,3% C) პირველადი კრისტალიზაციის შედეგად



სურ. 5.5. ზევებტოიდური ფოლადის მიკროსტრუქტურა. x400

ყალიბდება ლედებურიტული სტრუქტურა – აუსტენიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევი. ქვევებტოიდურ თუჯში ლედებურიტის გამოყოფას წინ უსწრებს აუსტენიტის გამოკრისტალდება. 1147°C-



სურ. 5.6. თეთრი თუჯის მიკროსტრუქტურა. x200.
ა-ქვევტემპტიკური; ბ-ვტემპტიკური; გ-ზევტემპტიკური

დან ოთახის ტემპერატურამდე გაცივებისას თუჯების სტრუქტურის შედგენილობაში შემაჯალ აუსტენიტში იგივე გარდაქმნები მიმდინარეობს, რაც ფოლადებში განვიხილეთ. კერძოდ, 727°C -მდე ხდება მეორეული ცემენტიტის გამოყოფა, ხოლო 727°C -ზე – აუსტენიტის პერლიტური გარდაქმნა. ამდენად, 727°C -ის ქვემოთ ლედეზურიტი შედგენილი იქნება პერლიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევისაგან. ოთახის ტემპერატურამდე გაცივების შემდეგ ქვევტემპტიკური თუჯის სტრუქტურა იქნება პერლიტი და ლედეზურიტი (სურ. 5.6, ა), ვტემპტიკური თუჯისა – ლედეზურიტი (ბ), ხოლო ზევტემპტიკური თუჯისა – ლედეზურიტი და ცემენტიტი (გ). ასეთი სტრუქტურის შენადნობებს თეთრ თუჯებს უწოდებენ.

5.1.3. ფაზები და სტრუქტურული შემდგენელი რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში

ამგვარად, რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში გვხვდება შემდეგი ფაზები და სტრუქტურული შემდგენელი:

1. თხევადი ხსნარი (L) – ერთგვაროვანი თხევადი ხსნარი, სადაც შენადნობის შემცველი ყველა ელემენტი ერთმანეთშია გახსნილი.
2. ფერიტი – ნახშირბადის მცირე ხსნარი α რკინაში. ფერიტის თვისებები მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ფოლადის ქიმიურ შედგენილობაზე.

ელემენტები, რომლებიც ფერიტ-ში იხსნება, ზრდის მის სისაღეს და ამცირებს პლასტიკურობასა და სიბლანტეს.

ოთახის ტემპერატურაზე ფერიტი ფერომაგნიტურია. გახურებისას ფერომაგნიტიზმი უმნიშვნელოდ კლებულობს, ხოლო 768°C-ზე მკვეთრად იკარგება.

3. აუსტენიტი – ნახშირბადის მყარი ხსნარი γ რკინაში. აუსტენიტი არამაგნიტური, მაღალპლასტიკური ფაზაა. მისი სისაღე დაბალია. აუსტენიტი ჩვეულებრივ ნახშირბადიან ფოლადებში მდგრადია 727°C-ზე მაღალ ტემპერატურებზე. 727°C-ზე იგი იშლება პერლიტის წარმოქმნით.

4. ცემენტიტი, Fe_3C – რკინისა და ნახშირბადის ქიმიური ნაერთი. იგი შეიცავს 6,67% ნახშირბადს. ყველაზე სალი და მყიფე ფაზაა რკინა-ნახშირბადის სისტემაში. სისაღის მნიშვნელობაა $HB=700-800$.

ცემენტიტი გარკვეულ პირობებში იშლება თავისუფალი ნახშირბადის – გრაფიტის წარმოქმნით.

5. პერლიტი – ფერიტისა და ცემენტიტის ევტექტოიდური მიკრომექანიკური ნარევი, რომელიც 0,8% ნახშირბადს შეიცავს. პერლიტის სისაღეა 180–200 HB, $\sigma_{\text{მკ}}$ – 700–800 მგპა, δ – 10%.

6. ლედებურიტი – აუსტენიტის (პერლიტის) და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ევტექტიკური ნარევი, 4,3% ნახშირბადს შეიცავს. ლედებურიტი პერლიტთან შედარებით უფრო უხეშ კონგლომერატს წარმოადგენს, რადგან იგი პირველადი კრისტალიზაციის პროდუქტია. ცემენტიტის დიდი რაოდენობით შემცველობის გამო (65%) ლედებურიტი საკმაოდ მაღალი სისაღით ხასიათდება (450 HB).

ფერიტი, აუსტენიტი და ცემენტიტი ფაზებია, ხოლო პერლიტი და ლედებურიტი – ორი ფაზისგან შედგენილი სტრუქტურული შემდგენები.

5.2. ნახშირბადიანი ფოლადი

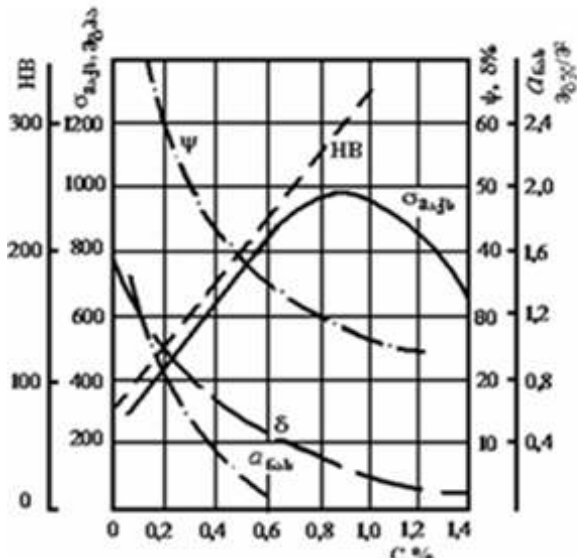
5.2.1. ფოლადის სტრუქტურა და თვისებები

ფოლადის სტრუქტურასა და თვისებებს, სხვა თანაბარ პირობებში, ნახშირბადის შემცველობა განსაზღვრავს. რადგან ფოლადის სტრუქტურა ფერიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევია, რაც უფრო მეტია ფოლადში ნახშირბადი (ცემენტიტი), მით უფრო მეტად ვშორდებით ფერიტის თვისებებს და ვუახლოვდებით ცემენტიტისას. ამიტომ, ფოლადში ნახშირბადის რაოდენობის გადიდე-

ბასთან ერთად სისაღე და სიმტკიცე იზრდება, ხოლო პლასტიკურობა და სიბლანტე კლებულობს.

5.7 სურათზე წარმოდგენილია ფოლადის ძირითადი მექანიკური მახასიათებ-

ლების ცვლილების ხასიათი ნახშირბადის შემცველობაზე დამოკიდებულებით. როგორც წარმოდგენილ დიაგრამაზე ჩანს, 1-1,1%-ის ზემოთ ნახშირბადის შემცველობისას ფოლადი საკმაოდ მყიფედება, რაც გამოწვეულია ცემენტიტის რაოდენობის მნიშვნელოვანი გაზრდით დამარცვლის საზღვრებში მისი არახელსაყრელი განლაგე-



სურ. 5.7. ფოლადის ძირითადი მექანიკური მახასიათებლების ცვლა ნახშირბადის რაოდენობაზე დამოკიდებულებით

ბით. ნიმუშების გაჭიმვაზე გამოცდისას იგი იწვევს ნაადრევ რღვევას. სწორედ ამიტომ სისაღის მახასიათებელი (HB) განაგრძობს მატებას, სიმტკიცის მრუდი ($\sigma_{0.2}$) კი მაქსიმუმის გავლის შემდეგ დაბლა ეშვება. ნახშირბადის რაოდენობის გაზრდით იცვლება

აგრეთვე ფოლადის ფიზიკური თვისებებიც: ელექტროგამტარობა, თბოგამტარობა და მაგნიტური შეღწევადობა მცირდება, კოერცი-ტიული ძალა კი იზრდება.

5.2.2. მუდმივი მინარევები ფოლადში

ჩვეულებრივი ნახშირბადიანი ფოლადი, რკინისა და ნახშირბადის გარდა, შეიცავს სილიციუმს, მანგანუმს, ფოსფორსა და გოგირდს. სილიციუმი არის ფოლადის ძირითადი განმჟანგველი ელემენტი. მისი რაოდენობა ფოლადში 0,15–0,35%-ის ზღვრებშია. სილიციუმი იხსნება ფერიტში და საგრძნობლად ზრდის მის სისაღეს, დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარს, მაგრამ ამავე დროს ამცირებს პლასტიკურობას.

მანგანუმი ასევე ფოლადის ძირითადი განმჟანგველია. მანგანუმი, სილიციუმის ანალოგიურად, იხსნება ფერიტში და ზრდის მის სისაღესა და სიმტკიცეს. მანგანუ-

მის რაოდენობა 0,5–0,8% ზღვრებში იცვლება. მანგანუმის განსაკუთრებით დადებითი გავლენა იმაში გამოიხატება, რომ იგი მნიშვნელოვნად ასუსტებს გოგირდის უარყოფით გავლენას ფოლადის თვისებებზე.

ფოსფორი და გოგირდი ფოლადში მავნე მინარევებს მიეკუთვნება. ფოსფორი რკინასთან იძლევა ფოსფიდს Fe_3P . ფოსფორის გავლენით იზრდება ფოლადის სისაღე, მაგრამ მკვეთრად მცირდება მისი დარტყმითი სიბლანტე და მალა იწვეს გამყიფების ტემპერატურა. ფოსფორის გავლენით განვითარებულ სიმყიფეს ციკმეტეხობა ეწოდება. ფოსფორის შემცველობა ფოლადში 0,05% არ უნდა აღემატებოდეს.

გოგირდი რკინაში არ იხსნება და ფოლადში რკინის სულფიდის – FeS -ის სახით გვხვდება. FeS დნობის დაბალი ტემპერატურით ხასიათდება. გარდა ამისა, იგი რკინასთან იძლევა ევტექტიკას, რომლის დნობის ტემპერატურაა 985°C . ფოლადის გამყარების პროცესში ევტექტიკა ($\text{Fe}+\text{FeS}$) მარცვლის საზღვრებში გამოკრისტალდება. ასეთი ფოლადის წნევით დამუშავების ტემპერატურამდე ($800\text{--}1200^\circ\text{C}$) გახურებისას ევტექტიკა იწვეს შემოდნობას, ასუსტებს მარცვლებს შორის კავშირს და ფოლადი მყიფდება – წარმოიქმნება ცხელი ბზარები და ნაპრალები. ამ მოვლენას წითელმეტეხობა ეწოდება. გოგირდის შემცველობა ფოლადში 0,04% არ უნდა აღემატებოდეს.

5.2.3. ნახშირბადიანი ფოლადის კლასიფიკაცია

ფოლადის კლასიფიკაციას ქიმიური შედგენილობის, სტრუქტურისა და დანიშნულების მიხედვით აწარმოებენ.

ქიმიური შედგენილობის მიხედვით ფოლადები ორ დიდ ჯგუფად იყოფა: ნახშირბადიან და ლეგირებულ ფოლადებად. ნახშირბადიანი ფოლადი შეიცავს რკინას, ნახშირბადს და მუდმივ მინარევებს (Si , Mn , P და S) დასაშვებ ზღვრებში.

ლეგირება გულისხმობს მასალის შედგენილობის მიზანდასახულად შეცვლას სასურველი სტრუქტურისა და თვისებების მისაღებად, მასში სხვადასხვა ელემენტის დამატების გზით. აქედან გამომდინარე, ლეგირებული ფოლადი, გარდა ზემოაღნიშნული ელემენტებისა, დამატებით შეიცავს ერთ ან რამდენიმე ელემენტს, რომლებიც ფოლადს თვისებათა დიდ მრავალფეროვნებას ანიჭებს (უჟანგაობას, მხურვალმედეგობას, მხურვალმტკიცობას და ა.შ.). ასეთ ფოლადს ლეგირებულს უწოდებენ, ხოლო სპეციალურად შეყვანილ ელემენტებს – მალეგირებულ ელემენტებს.

ფოლადის კლასიფიკაცია სტრუქტურის მიხედვით ზემოთ იყო განხილული.

დანიშნულების მიხედვით ასხვავებენ საკონსტრუქციო, საიარაღო და განსაკუთრებული თვისებების მქონე ფოლადებს.

5.2.4. საკონსტრუქციო ფოლადი

ხარისხის მიხედვით საკონსტრუქციო ნახშირბა-დიანი ფოლადი ორგვარია: ჩვეულებრივი ხარისხის ანუ საერთო დანიშნულებისა და ხარისხოვანი.

ჩვეულებრივი ხარისხის საკონსტრუქციო ფოლადი შეიცავს 0,6%-მდე ნახშირბადს. დღეისათვის მოქმედი სტანდარტების მიხედვით ჩვეულებრივი ხარისხის ფოლადები სამ ჯგუფად იყოფა A, B და B.

A ჯგუფში გაერთიანებულია ფოლადები, რომელთა მიწოდება მეტალურგიული ქარხნიდან ხდება გარანტირებული მექანიკური თვისებებით. ფოლადის მარკა აღინიშნება C_T ასოებით, რომლის შემდეგ იწერება ციფრები 0; 1; 2; 3 და ა.შ. 6-მდე. მაგალითად, C_T0; C_T1; C_T2; C_T3. რაც მეტია ციფრი, მით მაღალია სიმტკიცის მაჩვენებლები, მაგრამ პლასტიკურობა მცირდება.

B ჯგუფში შედის ფოლადები, რომელთა მიწოდება მეტალურგიული ქარხნიდან ხდება გარანტირებული ქიმიური შედგენილობით. მისი მარკა იგივე სისტემით აღინიშნება, მხოლოდ წინ ეწერება ჯგუფის კუთვნილების აღმნიშვნელი ასო – B. მაგალითად, B_CT3.

B ჯგუფის ფოლადებს ქარხანა უშვებს როგორც გარანტირებული ქიმიური შედგენილობით, ისე მექანიკური თვისებებით. მარკაში პირველ ადგილზე იწერება ასო B, შემდეგ C_T და შესაბამისი ციფრი. მაგალითად, B_CT2, B_CT3, B_CT4, B_CT5. ამ ჯგუფის ყოველი მარკის ფოლადში მექანიკური თვისებები ეთანადება A ჯგუფის შესაბამისი მარკის ფოლადს, ხოლო ქიმიური შედგენილობა – B ჯგუფის შესაბამისი მარკის ფოლადს.

ჩვეულებრივი ხარისხის ნახშირბადიანი ფოლადებისაგან მზადდება შედუღებული სამშენებლო კონსტრუქციები, ხიდები, სახურავი თუნუქი, მცირედ და საშუალოდ დატვირთული მანქანათა ნაწილები (კბილანა, ლილვი, ღერძი).

ხარისხოვანი საკონსტრუქციო ფოლადი 0,85%-მდე ნახშირბადს შეიცავს. იგი გამოირჩევა მავნე მინარევების (P, S) ნაკლები შემცველობით, ამიტომ უფრო მაღალი თვისებებით ხასიათდება და უფრო საპასუხისმგებლო შემთხვევებშიც გამოიყენება.

ხარისხოვანი ფოლადის ნიშანდება ხდება ქიმიური შედგენილობის მიხედვით. მარკაში იწერება ორნიშნა რიცხვი, რომელიც მიუთითებს ნახშირბადის საშუალო შემცველობას პროცენტის მუდგებით. მაგალითად, ფოლადი 05; 08; 10; 15; 20 და ა.შ.

ხარისხოვანი ფოლადი არსებითად არის სამანქანო ფოლადი. იგი მრავალი დანიშნულებისაა. ნახშირბადმცირე ფოლადი 05-დან ფოლად 20-მდე ფართოდ გამოიყენება ცივი შტამპვისათვის. მათგან მზადდება სახურავი თუნუქი, საქვაბე ფურცლები, მცირედ დატვირთული სამაგრი დეტალები, შენადული და საცემენტაციო ნაწილები.

საშუალონახშირბადიანი ფოლადები (30–50) გამოიყენება მანქანათა ნაწილების, კერძოდ მცირედ და საშუალოდ დატვირთული ღერძების, ლილვების, მუხლა ლილვების, კბილანების და ა.შ. დასამზადებლად.

ნახშირბადუხვი ფოლადი 60–65 ხასიათდება გაზრდილი სიმტკიცით და დრეკადობით. გამოიყენება უფრო მძიმედ დატვირთული ნაწილებისა და სხვადასხვა სახის ზამბარებისა და რესორების დასამზადებლად.

ხარისხოვანი საკონსტრუქციო ფოლადები გამოიყენება მხოლოდ თერმულად დამუშავებულ მდგომარეობაში.

სამანქანო ფოლადებს მიეკუთვნება აგრეთვე სამსხმელო ფოლადი, რომლის ნიშანდება იგივე პრინციპით ხდება, მაგრამ მარკის ბოლოში იწერება ასო Л. მაგალითად, ფოლადი 20Л; 25Л და ა.შ.

განჯანგვის ხარისხის მიხედვით არჩევენ მშვიდ, მდუღარე და ნახევრად მშვიდ ფოლადებს. თუ ფოლადი მშვიდია, მარკის ბოლოს ემატება აღნიშვნა сп (спокойная), ნახევრად მშვიდს – пс, ხოლო მდუღარეს – кп (кипящая). მაგალითად, БСт2кп, 08кп.

525. საიარალო ფოლადი

საიარალო ფოლადს მიეკუთვნება ნახშირბადუხვი ფოლადი 0,7–1,3% ნახშირბადის შემცველობით. მისი მარკა აღინიშნება У ასოთი. შემდეგ დგას რიცხვი, რომელიც მიუთითებს ნახშირბადის რაოდენობას პროცენტის მუდგებით. მაგალითად, ფოლადი У7 საშუალოდ შეიცავს 0,7% ნახშირბადს, У8 – 0,8% და ა.შ. თუ მარკის ბოლოს წერია ასო А, ეს ფოლადის მაღალხარისხოვნების მაჩვენებელია (0,02%S და 0,03%P).

ნახშირბადიანსაიარალო ფოლადი ზოგადად შემდეგი დანიშნულებით გამოიყენება: У7 – ისეთი იარაღების დასამზადებლად, რომლებსაც მაღალ სისაღესთან ერთად მნიშვნელოვანი სიბლანტეც მოეთხოვება. ასეთი იარაღი დარტყმითი დატვირთვების

პირობებში მუშაობს. მათ მიეკუთვნება ღოჯები, სამჭედლო ტვიფრები, საზეინკლო ჩაქუნები და ა.შ.

Y8-Y9 – დაახლოებით იმავე დანიშნულებით გამოიყენება, მხოლოდ მეტი სისაღის მოთხოვნის შემთხვევაში (სამჭედლო სახერეტელები, ხერხები, საჭრისები);

Y10-Y11 – გამოიყენება ისეთი იარაღის დასამზადებლად, რომლებიც მკვეთრ დარტყმას არ განიცდის (საჭრისები, ბურღები, გარესახრახნები, ფრეზები და ა.შ.);

Y12-Y13 – იმავე მჭრელი იარაღებისათვის, მაგრამ დარტყმითი დატვირთვები გამორიცხულია.

საიარაღო ფოლადები განმამტკიცებელი თერმული დამუშავების გარეშე არ გამოიყენება.

52.6. საავტომატე ფოლადი

ფოლადების გარკვეული ჯგუფი განკუთვნილია დეტალების დასამზადებლად ჩარხ-ავტომატებზე. ისინი მეტი რაოდენობით შეიცავს გოგირდსა (0,08–0,20%) და ფოსფორს (0,06–0,15%), რაც აადვილებს მასალის ჭრით დამუშავებას და ზრდის ნაკეთობის ზედაპირის ხარისხს. ასეთმა ფოლადებმა საავტომატე ფოლადის სახელწოდება მიიღო.

საავტომატე ფოლადის მარკა A ასოთი აღინიშნება, შემდეგ იწერება ციფრი, რომელიც მიუთითებს ნახშირბადის შემცველობას მასალაში პროცენტებში. მაგალითად, A11; A12; A20; A30; A35; A40Г. ამ დანიშნულებით გამოიყენება აგრეთვე ტყვიაშემცველი ნახშირბადიანი და ლეგირებული ფოლადები.

5.3. თუჯი

თუჯი ფოლადთან შედარებით მეტი რაოდენობით შეიცავს ნახშირბადს და მუდმივ მინარევებს. არჩევენ თეთრ, რუხ, მაღალი სიმტკიცისა და ჭედად თუჯებს.

5.3.1. თეთრი თუჯი

თეთრ თუჯში ნახშირბადი მთლიანად დაკავებულია ცემენტიტში, ამიტომ მისი ღნობისა და გამყარების პროცესი და სტრუქტურა აღიწერება რკინა-ცემენტიტის მდგომარეობის დიაგრამით (სურ. 5.1).

თეთრი თუჯი სტრუქტურის მიხედვით სამ ჯგუფად იყოფა:

1. ქვევტექტიკური. ნახშირბადის რაოდენობა 2,14–4,3%; სტრუქტურა – პერლიტი+ლედებურიტი (იხ.სურ. 5.6, ა);

2. ევტექტიკური. ნახშირბადის რაოდენობა 4,3%; სტრუქტურა – ლედებურიტი (ბ);

3. ზეევტექტიკური. ნახშირბადის რაოდენობა 4,3–6,67%; სტრუქტურა – ლედებურიტი+ცემენტიტი (გ).

რადგან თეთრი თუჯი დიდი რაოდენობით შეიცავს ცემენტიტს, იგი ხასიათდება ძალიან მაღალი სისაღით. სისაღე მთლიანად დამოკიდებულია ნახშირბადის რაოდენობაზე. აქედან გამომდინარე, თეთრი თუჯი მეტად მყიფეა და ჭრით ძნელად მუშავდება.

მაღალი სისაღისა და სიმყიფის გამო, მანქანათმშენებლობაში თეთრი თუჯი იშვიათად გამოიყენება. თეთრი თუჯისგან მზადდება სხმული სავაგონო ბორბლები, გზის სატკეპნი მანქანების საგორავები და სხვა.

53.2. რუხი თუჯი

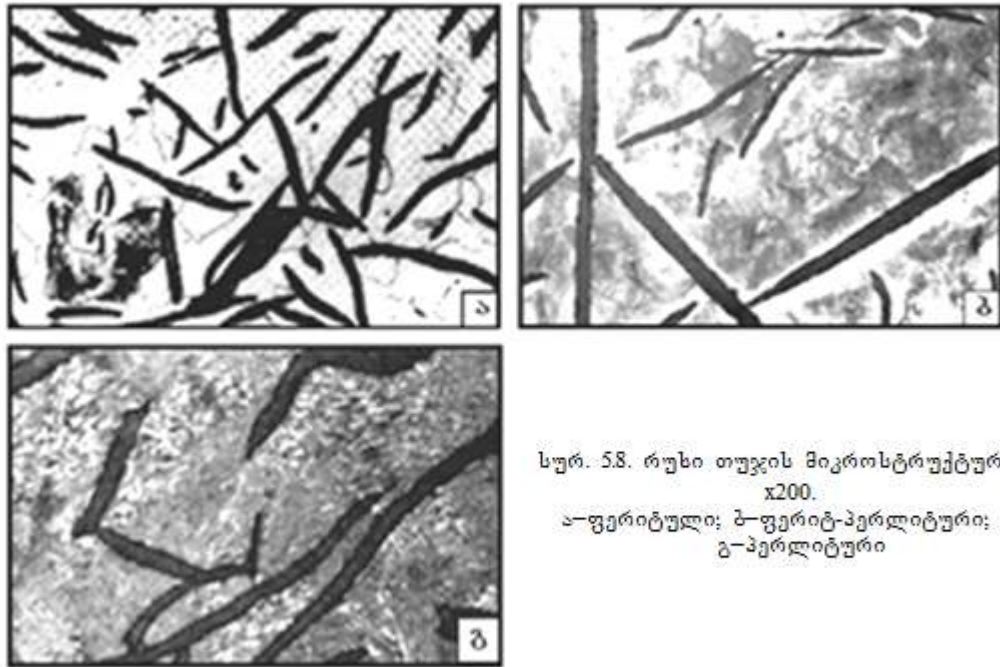
რუხ თუჯში ნახშირბადი მთლიანად ან ნაწილობრივ თავისუფალი, გრაფიტის სახით არის გამოყოფილი. რუხი თუჯის სტრუქტურა განიხილება როგორც ლითონური ფუძე, რომელშიც განლაგებულია გრაფიტის ჩანართები. ჩვეულებრივ რუხ თუჯში გრაფიტის ჩანართები ყოველთვის ფირფიტოვანია.

ლითონური ფუძის სტრუქტურისმიხედვით თუჯები სამ ჯგუფად იყოფა: ფერიტული, ფერიტ-პერლიტური და პერლიტური.

რუხი ფერიტული თუჯის ლითონური ფუძის მიკროსტრუქტურას ფერიტი წარმოადგენს. ასეთი სტრუქტურის მქონე თუჯში მთელი ნახშირბადი, რომელსაც შენადნობი შეიცავს, გრაფიტის სახით არის გამოყოფილი. თუჯს ფერიტული კლასის რუხი თუჯი ეწოდება. მისი სტრუქტურაა ფერიტი+გრაფიტი (სურ. 5.8, ა), სადაც ფერიტის მრავალწახნაგა მარცვლების ფონზე განლაგებულია მუქი შეფერილობის გრაფიტის ფირფიტები.

რუხ ფერიტ-პერლიტურ თუჯში ცემენტიტში დაკავებული ნახშირბადის რაოდენობა 0,8%-ზე ნაკლებია. მისი სტრუქტურა შედგება ფერიტის, პერლიტისა და გრაფიტის ჩანართებისაგან (ბ). ასეთ რუხ თუჯს ფერიტ-პერლიტური კლასის რუხი თუჯი ეწოდება.

პერლიტური რუხი თუჯის ლითონური ფუძის სტრუქტურა შედგება პერლიტ-ტისაგან. ასეთ თუჯს პერლიტური კლასის რუხი თუჯი ეწოდება და მისი სტრუქტურაა პერილტი+გრაფიტი (სურ. 5.8, გ).



სურ. 5.8. რუხი თუჯის მიკროსტრუქტურა.
x200.
ა-ფერიტული; ბ-ფერიტ-პერლიტური;
გ-პერლიტური

5.3.3. მაღალი სიმტკიცის და ჭედადი თუჯები

გრაფიტის ფირფიტოვანი ჩანართებით თუჯი შედარებით დაბალი მექანიკური თვისებებით და გაზრდილი სიმკეფიით ხასიათდება.

სხვადასხვა ტექნოლოგიური საშუალებით შესაძლებელია უფრო ხელსაყრელი ფორმის გრაფიტის ჩანართების მიღება. მაგალითად. მოდიფიცირებით – დაკლანკილი; თეთრი თუჯის გარკვეული რეჟიმით მოწვის შედეგად – ფიფქისებრი (ბუდობრივი); ხოლო მაგნიუმით მოდიფიცირებით – მომრგვალებული ანუ სფეროიდული. თუჯს გრაფიტის სფეროიდული ფორმის ჩანართებით მაღალი სიმტკიცის თუჯს უწოდებენ, ხოლო ბუდობრივი ჩანართებით – ჭედად თუჯს (სურ. 5.9). როგორც რუხ თუჯში, აქაც ლითონური ფუძის სტრუქტურა შეიძლება იყოს ფერიტული, ფერიტ-პერლიტური და პერლიტური (სურ. 5.10, 5.11).

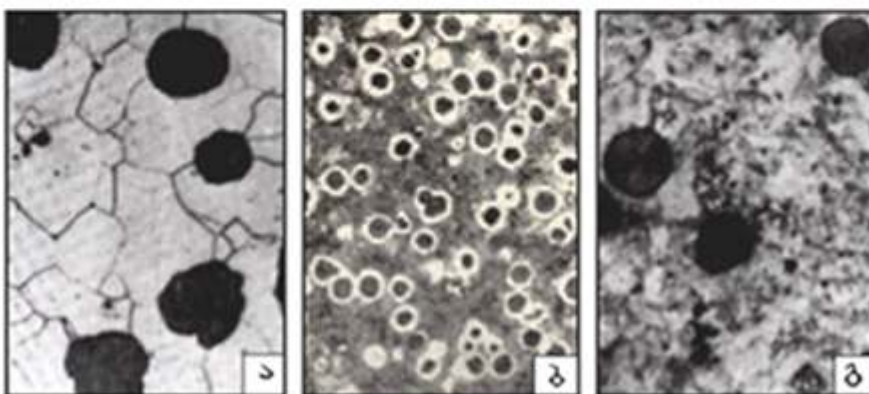
ამგვარად, რუხი, მაღალი სიმტკიცისა და ჭედადი თუჯები ერთმანეთისგან გრაფიტის ჩანართების ფორმით განსხვავდება.

5.3.4. თუჯების ნიშანდება

თუჯების ნიშანდება ხდება მექანიკური თვისებების მიხედვით. რუხი თუჯის მარკა აღინიშნება ასოებით СЧ (серый чугу́н), შემდეგ იწერება რიცხვი, რომელიც

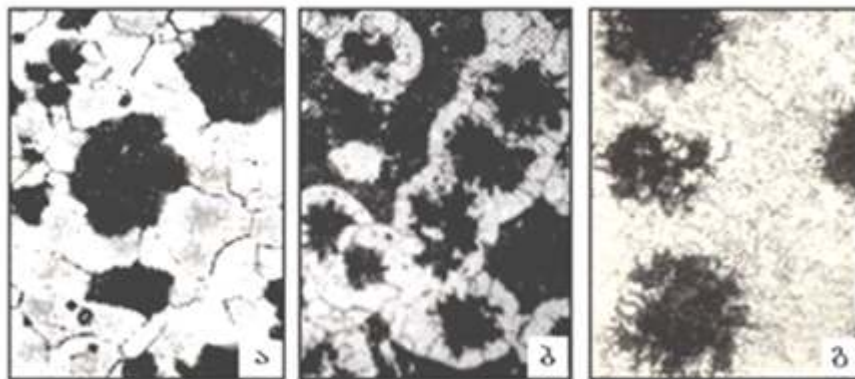


სურ. 5.9. გრაფიტის ჩანართის ფორმა მაღალი სიმტკიცის (ა, ბ, x200) და ჭედად (გ) თუჯებში



სურ. 5.10. მაღალი სიმტკიცის თუჯების მიკროსტრუქტურა. x200.
ა-ფერიტული; ბ-ფერიტ-პერლიტური; გ-პერლიტური

მიუთითებს სიმტკიცის ზღვარს გაჭიმვაზე. მაგალითად, СЧ10, СЧ20, СЧ25.



სურ. 5.11. ჭედადი თუჯების მიკროსტრუქტურა. x200.
ა-ფერიტული; ბ-ფერიტ-პერლიტური; გ-პერლიტური

მაღალი სიმტკიცის თუჯის მარკას აღნიშნავენ ასოებით ВЧ (высокопрочный чугун), შემდეგ იწერება ორი რიცხვი, რომელთაგან პირველი მიუთითებს სიმტკიცის ზღვარს გაჭიმვაზე, ხოლო მეორე – ფარდობით წაგრძელებას. მაგალითად, ВЧ 38-17; ВЧ 45-5; ВЧ 120-2.

ჭედადი თუჯის ნიშანდებავივე პრინციპითხდება, როგორც მაღალი სიმტკიცის თუჯისა, მხოლოდ მარკის წინ იწერება ასოები КЧ (ковкий чугун). მაგალითად, КЧ30-6; КЧ 35-10.

5.3.5. თუჯის სტრუქტურასა და თვისებებს შორის კავშირი

თუჯის სტრუქტურა შედგება ლითონური ფუძისა და გრაფიტული ჩანართებისაგან. აქედან გამომდინარე, მისი თვისებები დამოკიდებული იქნება როგორც ლითონური ფუძის სტრუქტურაზე, ისე გრაფიტული ჩანართების რაოდენობასა და ხასიათზე. გრაფიტი ფოლადთან შედარებით უმნიშვნელო სისაღითა და სიმტკიცით ხასიათდება. გარდა ამისა, მათ ლითონურ ფუძესთან არსებითად კავშირი არა აქვს,

ამიტომ გრაფიტული ჩანართები პირველი მიახლოებით შეიძლება განვიხილოთ როგორც სიცარიელე, ბზარი, რომელიც ასუსტებს ლითონურ ფუძეს. ბუნებრივია, რაც უფრო მეტი მოცულობა უკავია სიცარიელეს, მით უფრო დაბალი იქნება თუჯის მექანიკური თვისებები. ერთი და იგივე ლითონური ფუძის სტრუქტურისა და გრაფიტის თანაბარი შემცველობის შემთხვევაში თუჯის თვისებებს გრაფიტის ფორმა და განლაგება განსაზღვრავს.

ფირფიტოვან ჩანართებს ბზარის სახე აქვს, რომლის ბოლოები ძაბვათაკონცენტრაციას იწვევს. ამიტომ რუხი თუჯი ხასიათდება დაბალი წინააღმდეგობით გამჭიმავი და, განსაკუთრებით, დარტყმითი დატვირთვების მიმართ. ამდენად, თუჯი მეტად მყიფე მასალაა, რადგან ბზარი ბუნებრივადაა ჩასახული გრაფიტის ჩანართების წარმოქმნის დროს. რაც შეეხება მეუმშავ დატვირთვებს, აქ გრაფიტის ჩანართების უარყოფითი გავლენა უმნიშვნელო ხდება, თუჯის თვისებები საკმაოდ მაღალია და პრაქტიკულად ძალიან ახლოს დგას იმ ფოლადის თვისებებთან, რომლის შედგენილობა და ლითონური ფუძის სტრუქტურა მოცემული თუჯის ანალოგიურია. დაკლაკნილი, წვრილი ჩანართები, რომლებიც მიიღება თუჯის სხვადასხვა ხერხით დამუშავების გზით, მაღალი ხარისხის მაჩვენებელია, რადგან ბზარების განვითარების შესაძლებლობა ამ შემთხვევაში ნაკლებია.

გრაფიტის მომრგვალებული ჩანართები არ წარმოქმნის ძაბვების მკვეთრ კონცენტრაციას, ამიტომ თუჯი გრაფიტის მომრგვალებული ჩანართებით (მაღალი სიმტკიცის თუჯი) ხასიათდება მნიშვნელოვნად მაღალი თვისებებით გაჭიმვასა და ღუნვაზე. ჭედად თუჯს ფიფქისებრი გრაფიტის ჩანართებით შუალედური მდგომარეობა უკავია ჩვეულებრივ რუხ და მაღალი სიმტკიცის თუჯებს შორის.

მართალია, გრაფიტის ჩანართები უარყოფით გავლენას ახდენს თუჯის მექანიკურ თვისებებზე, მაგრამ გარკვეულ შემთხვევაში იგი თუჯს ღირსშესანიშნავ ტექნოლოგიურ თვისებებს ანიჭებს ფოლადთან შედარებით. კერძოდ, რუხი თუჯი ხასიათდება დაბალი დნობის ტემპერატურითა და მაღალი თხევადენადობით. ამასთან, კრისტალიზაცია მუდმივ ტემპერატურაზე მთავრდება ევტექტიკის წარმოქმნით. გრაფიტის გამოყოფის გამო, კრისტალიზაციის პროცესში რუხი თუჯი ფართოვდება. ყოველივე ეს უზრუნველყოფს სამსხმელო ყალიბის კარგ შევსებას და რთული ფორმის ნაკეთობის ჩამოსხმით დამზადების შესაძლებლობას. თუჯში გრაფიტის

არსებობა აადვილებს თუჯის ჭრით დამუშავებას. იგი ხელს უწყობს აგრეთვე ვიბრაციის სწრაფად ჩაქრობას.

თუჯი კარგი ანტიფრიქციული მასალაა, რადგან გრაფიტი ხასიათდება პოხვის უნარით და კარგად აკავებს საპოხ ნივთიერებას.

ყოველივე ამის გამო, თუჯი ფართოდ გამოიყენება მრეწველობაში მანქანათა ისეთი ნაწილების დასამზადებლად, რომლებიც ექსპლუატაციის დროს გამჭიმავ და დარტყმით დატვირთვებს არ განიცდის.

5.3.6. თუჯების გამოყენება

რუხი თუჯი დღემდე ყველაზე ფართოგამოყენებას პოულობს მრეწველობაში. რუხი თუჯისგან ასხამენ დიზელის დგარებს, ცილინდრებს და მათ სახურავებს, მქნევარებს და სხვა რთული მოყვანილობის დეტალებს. ავტომანქანებში რუხი თუჯისგანაა ჩამოსხმული ცილინდრების ბლოკი, ზოგიერთი დგუში, სინქარეთა კოლოფი, სამუხრუჭო მოწყობილობის დეტალები. რუხი თუჯისგან მზადდება საკანალიზაციო მილებისა და წყალგაყვანილობის არმატურის მნიშვნელოვანი ნაწილი.

ჭედადი და მაღალი სიმტკიცის თუჯების შემუშავებამ გააფართოვა თუჯის გამოყენების სფერო. მაგალითად, ჭედადი თუჯისგან მზადდება დარტყმითი დატვირთვებისა და ვიბრაციის პირობებში მომუშავე, ავტომობილისა და სასოფლო-სამეურნეო მაქანების ნაწილები. მაღალი სიმტკიცის თუჯისგან ამზადებენ მუხლას და განმანაწილებელ ლილვებს, დგუშებს, დგუშის რგოლებს, მასრებს, ფრიქციულ დისკებს, გუთნის დეტალებს, ტრაქტორის მუხლუხებს.

თუჯი წარმატებით გამოიყენება აგრეთვე საავიაციო მრეწველობაში. ანტიფრიქციული ჭედადი თუჯი $\Psi M 1,3 (1,25\%Cu)$ გამოიყენება თვითმფრინავის სხვადასხვა აგრეგატისა და ხელსაწყოთა საყრდენი ნაწილების, მილისის, დგუშისა და შემამჭიდროებელი რგოლების, შასის დგუშის დემფერების და ა.შ. დასამზადებლად, რომლებიც შეხეთვის პირობებში სტატიკური და დინამიკური დატვირთვებისას მუშაობს.

თბომდეგი (ΨHMX) თუჯი გამოიყენება რეაქტიული ძრავას ტურბინის აირსაგროვი კორპუსის, ფრიქციული დისკებისა და საავიაციო ბორბლების ბიმეტალური სამუხრუჭო დოლის დასამზადებლად.

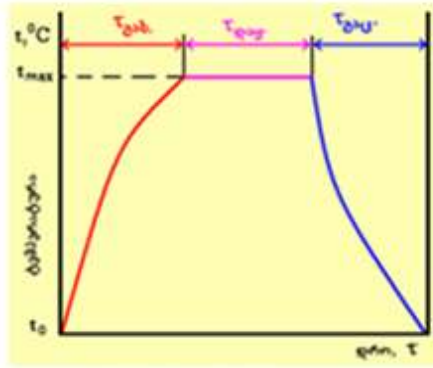
მაგნიუმნიკელიანი ლიგატურით ლეგირებული მაღალი სიმტკიცის თუჯი (MH) გამოიყენება ფრიქციული დისკების, ანტიფრიქციული და სარკველის მიმმარ-

თველი მიღისების, დგუშის, შემამჭიდროებელი რგოლებისა და სხვათა დასამზადებლად.

თავი VI

ლითონის თერმული დამუშავება

თერმული დამუშავება არის ლითონების თვისებათა სასურველი მიმართულებით შეცვლის უმნიშვნელოვანესი საშუალება. თერმული დამუშავების დროს იცვლება ლითონის სტრუქტურა და, შესაბამისად, თვისებები მისი ქიმიური შედგენილობის შეუცვლელად.



სურ. 6.1. თერმული დამუშავების
ზოგადი გრაფიკი

თერმულ დამუშავებაზე ორი ძირითადი ფაქტორი მოქმედებს: ტემპერატურა და დრო. აქედან გამომდინარე, ნებისმიერი თერმული დამუშავების რეჟიმი შეიძლება გამოისახოს კოორდინატთა სისტემაში – ტემპერატურა (t) – დრო (τ). 6.1 სურათზე წარმოდგენილია თერმული დამუშავების ზოგადი გრაფიკი.

თერმული დამუშავების რეჟიმს შემდეგი ძირითადი პარამეტრები ახასიათებს: გახურების ტემპერატურა $t_{გაქს}$. ეს არის ზედა ზღვრული ტემპერატურა, სადამდეც ხურდებანაკეთობა თერმული დამუშავების დროს; გახურების ტემპერატურაზე ნაკეთობის დაყოვნების დრო $\tau_{დაყ}$; გახურების სიჩქარე $v_{გაქ}$ და გაცივების სიჩქარე $v_{გაც}$. თერმული დამუშავების გრაფიკით შეიძლება ნებისმიერი სახის თერმული დამუშავების რეჟიმი გამოისახოს.

თერმული დამუშავების ძირითადი სახეები: მოწვა, წრთობა და მოშვება.

6.1. მოწვა

მოწვის პროცესი ორგვარია: პირველი გვარის და მეორე გვარის.

6.1.1. პირველი გვარის მოწვა

პირველი გვარის მოწვის პროცესი არ არის დაკავშირებული ფაზურ გადაკრისტალებასთან, ამიტომ ასეთ მოწვას ნებისმიერი შენადნობი ექვემდებარება. პირველი გვარის მოწვაში შედის სარეკრისტალიზაციო, საჰომოგენიზაციო და ძაბვების მოსახსნელი მოწვა.

როგორც ცნობილია, ცივჭედვას ლითონი სტრუქტურულად არაწონასწორულ მდგომარეობაში გადაჰყავს, რაც სისაღისა და სიმტკიცის მახასიათებლების ზრდასა და პლასტიკურობის შემცირებას იწვევს. ცივჭედვის მოსახსნელად მიმართავენ სარეკრისტალიზაციო მოწვას. ლითონის რეკრისტალიზაციისა და ღნობის ტემპერატურას შორის მარტივი დამოკიდებულება არსებობს:

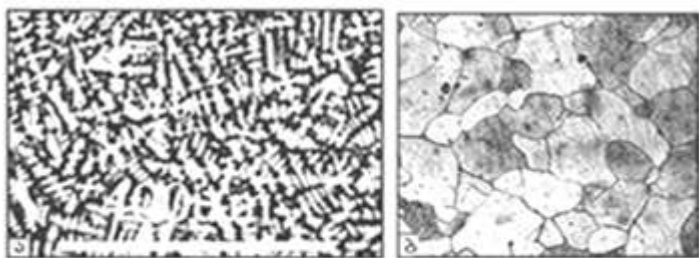
$$T_{რეკ} \approx aT_{ღნ}$$

სადაც $T_{რეკ}$ არის რეკრისტალიზაციის აბსოლუტური ტემპერატურა; $T_{ღნ}$ – ლითონის ღნობის აბსოლუტური ტემპერატურა; a – კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე ლითონის

სისუფთავეზეა დამოკიდებული. სუფთა ლითონებისათვის იგი 0,1–0,2 ტოლია, ჩვეულებრივი ტექნიკური ლითონებისათვის – 0,3–0,4; შენადნობებისათვის მისი მნიშვნელობა 0,8 აღწევს.

ნახშირბადიანი ფოლადის სარეკრისტალიზაციო მოწვის ტემპერატურა 600–700°C-ის ზღვრებშია, დაყოვნების დრო – 1–2 საათი. ამ დროს ცივანატედი ლითონის დამახინჯებული მარცვლების საზღვრებზე ჩაისახება და იზრდება ახალი წონასწორული მარცვლები.

შენადნობების კრისტალიზაციის დროს ხშირად ადგილი აქვს ქიმიურ არაერთგვაროვნებას ანუ დენდრიტულ ლიკვაციას (სურ. 6.2, ა), რომელიც ფოლადის თვისებების ანიზოტროპიას იწვევს. ლიკვაციის მოსპობა უნდა მოხდეს ქიმიური ელემენტების დიფუზიის ხარჯზე, ამიტომ პროცესი მაღალტემპერატურული მოწვის გზით ხორციელდება, რომელსაც ჰომოგენიზაციას უწოდებენ. ჰომოგენიზაციის შემდეგ ყალიბდება წონასწორული, პოლიედრული სტრუქტურა (ბ).



სურ. 6.2. 70% Cu 30% Ni შენადნობის მიკროსტრუქტურა.
ა – სხმულ მდგომარეობაში – დენდრიტული აგებულება;
ბ – ერთგვაროვანი სტრუქტურა ჰომოგენიზაციის შემდეგ

ჰომოგენიზაციის ტემპერატურა ფოლადებისათვის 1100–1200°C შეადგენს ხოლო დაყოვნების დრო – 10–20 საათს. გაცივება ხდება ძალიან ნელა, ისე რომ მთელი პროცესი ხშირად 80–100 საათს გრძელდება.

ჰომოგენიზაციის შედეგად ლითონის მარცვლები ინტენსიურად იზრდება, ამიტომ ხშირად აუცილებელი ხდება მისი სტრუქტურის გამოსწორება.

ნაკეთობათა დამზადების ტექნოლოგიური პროცესი შეიძლება ისეთი იყოს, რომ მსხვილ სხმულებში, ნატელებსა და შენადულ უბნებში ნარჩენი შიგა თერმული ძაბვები წარმოიქმნას. დაძაბულობა შეიძლება მოიხსნას ლითონის პლასტიკური დეფორმაციის ხარჯზე, რაც ნაკეთობის დაბრეცას ან დაბზარვას გამოიწვევს. ამ უარყოფითი მოვლენის ასაცილებლად ნაკეთობას უტარებენ მოწვას ძაბვების მოსახსნელად: ნაკეთობას ახურებენ 550–680°C-მდე და აყოვნებენ დაახლოებით 2,5 წუთს ნაკეთობის განივკვეთის ყოველ 1 მილიმეტრზე. გაცივება ნელა ხდება.

6.1.2. მეორე გვარის მოწვა

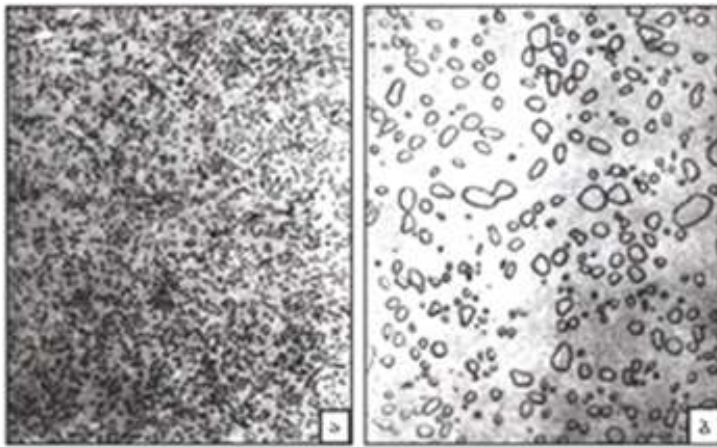
მოწვის ეს სახე დაკავშირებულია ფაზურ გადაკრისტალებასთან, ამიტომ იგი შეიძლება განხორციელდეს ისეთ შენადნობებში, რომლებიც გახურება-გაცივების დროს მეორეულ გარდაქმნას განიცდის.

მეორე გვარის მოწვის სახეებია: სრული მოწვა, არასრული მოწვა და ნორმალისაცია.

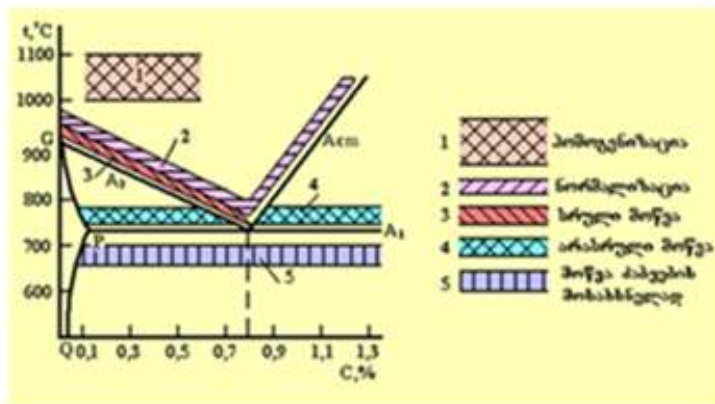
ფოლადი წონასწორულ მდგომარეობაში ფერიტ-პერლიტური სტრუქტურით ხასიათდება, რომელსაც შედარებით დაბალი სისაღე და სიმტკიცე აქვს, მაგრამ ხასიათდება გაზრდილი პლასტიკურობით. ფოლადის ნაკეთობათა დამზადების ტექნოლოგიური პროცესები არ გამოირიცხავს შედარებით აჩქარებულ გაცივებას, რის შედეგადაც შეიძლება ჩამოყალიბდეს გარდამავალი სტრუქტურები გაზრდილი სისაღით, რაც მნიშვნელოვნად აძნელებს ლითონის შემდგომ მექანიკურ დამუშავებას.

არასასურველი სტრუქტურის შესაცვლელად აუცილებელია ლითონის სრული გადაკრისტალება და ერთგვაროვანი აუსტენიტის მიღება. ამ მიზნით ქვევტექტოიდურ ფოლადს ახურებენ Ac_3 კრიტიკული წერტილის (GS ხაზი Fe-C დიაგრამაზე) ზემოთ $(30-50)^{\circ}C$ -ით, აყოვნებენ ნაკეთობის განივკვეთში ტემპერატურის გათანაბრებამდე და შემდეგ ნელი სიჩქარით აცივებენ. მოწვის შემდეგ არასასურველი სტრუქტურა წვრილმარცვლოვანი ფერიტ-პერლიტური სტრუქტურით იცვლება მისთვის დამახასიათებელი თვისებებით. ასეთი რეჟიმით მოწვას სრული მოწვა ეწოდება.

ზეევტექტოიდურ ფოლადს ძირითადად არასრული მოწვა უტარდება. ამ შემთხვევაში ნაკეთობას ახურებენ Ac_1 (PSK ჰორიზონტალი Fe-C დიაგრამაზე) ტემპერატურის ზემოთ $(740-770)^{\circ}C$ -მდე და დაყოვნების შემდეგ ნელა აცივებენ.



სურ. 6.3. მარცვლოვანი პერლიტი. ა- x500; ბ- x1500



სურ. 6.4. მოწვის ტემპერატურული არეები

მოწვის შემდეგ ცემენტიტი ფირფიტოვანის ნაცვლად მომრგვალებულ ფორმას ღებულობს. ასეთ სტრუქტურას მარცვლოვან პერლიტს უწოდებენ (სურ. 6.3), ხოლო პროცესს – სფეროიდიზაციას. მარცვლოვანი პერლიტი ფირფიტოვანთან შედარებით ნაკლები სისაღითა და სიმტკიცით, მაგრამ გაზრდილი პლასტიკურობითა და სიბლანტით ხასიათდება. სფეროიდიზაციას განსაკუთრებით ხშირად საიარაღო ნახშირბადიან ფოლადებს უტარებენ.

ნორმალიზაცია არსებითად სრული მოწვის სახესხვაობაა და იმაში მდგომარეობს, რომ Ac_3 (Ac_{cm} , SE ხაზი Fe-C

დიაგრამაზე) $+(30-50)^{\circ}C$ ტემპერატურამდე გახურებისა და დაყოვნების შემდეგ ნაკეთობას მშვიდ ჰაერზე აცივებენ. ნორმალიზაციის მიზანია სხმული, ნაჭედი ან ნატვიფრი ნაკეთობის მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურის შეცვლა წვრილმარცვლოვანით. ამ ოპერაციისათვის გაცივების სიჩქარეს გადამწყვეტი მნიშვნელობა არ ენიჭება, ამიტომ ჰაერზე გაცივებას მიმართავენ, რაც ღუმელში გაცივებასთან შედარებით უფრო ეკონომიურია. 6.4 სურათზე წარმოდგენილია მოწვის ტემპერატურული არეები.

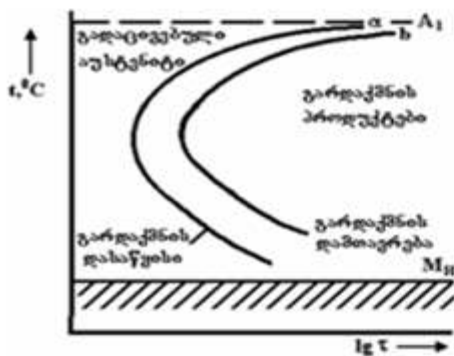
6.2. ფოლადის წრთობა

წრთობის მიზანია ნაკეთობის სისაღის, სიმტკიცისა და ცვეთამდებობის გაზრდა. ამ მიზნით ნაკეთობას ახურებენ ფაზური გარდაქმნების ტემპერატურის ზემოთ, აყოვნებენ და გადიდებული სიჩქარით აცივებენ, რა დროსაც ყალიბდება არა-

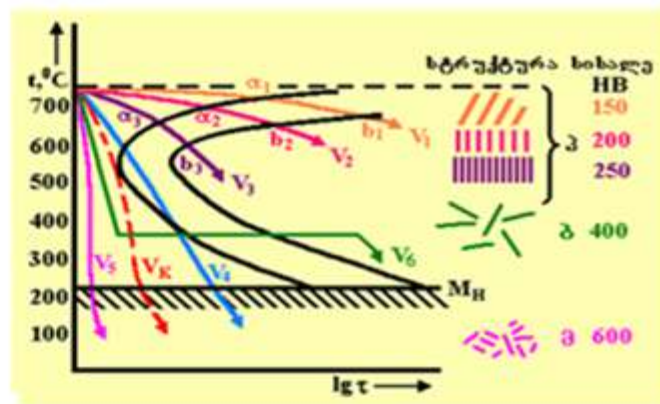
წონასწორული სტრუქტურა მისთვის დამახასიათებელი გაზრდილი სისხლისა და სიმტკიცის მახასიათებლებით.

6.2.1. აუსტენიტის დაშლა

როგორც ჩვენთვის უკვე ცნობილია, აუსტენიტი ოთახის ტემპერატურამდე მდგრადობას არ ინარჩუნებს და გაცივების პროცესში პერლიტურ გარდაქმნას განიცდის. გარდაქმნის შედეგად ფოლადში ჩამოყალიბებული სტრუქტურების ხასიათსა და თვისებებს გარდაქმნის ტემპერატურა (მუდმივ ტემპერატურაზე ანუ იზოთერმულ პირობებში გარდაქმნის შემთხვევაში) და გაცივების სიჩქარე (განუწყვეტელი გაცივების პირობებში) განსაზღვრავს. რადგან აუსტენიტის დაშლა დროში მიმდინარეობს, პროცესს აუსტენიტის იზოთერმული გარდაქმნის დიაგრამასთან კავშირში



სურ. 6.5. აუსტენიტის იზოთერმული გარდაქმნის დიაგრამა



სურ. 6.6. აუსტენიტის იზოთერმული გარდაქმნის დიაგრამა განუწყვეტელი გაცივების სიჩქარის მრუდებით

განიხილავენ, რომლის სქემა 6.5 სურათზეა წარმოდგენილი.

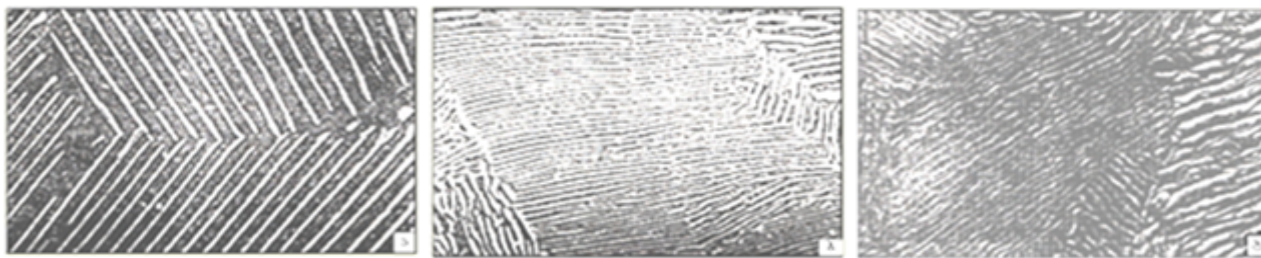
a მრუდი არის აუსტენიტის გარდაქმნის დაწყების, ხოლო *b* მრუდი – გარდაქმნის დამთავრების მრუდი. აქედან გამომდინარე, *a* მრუდის მარცხნივ შენარჩუნებულია გადაცივებული აუსტენიტი, ხოლო *b* მრუდის მარჯვნივ გვაქვს გარდაქმნის პროდუქტები. აუსტენიტის დაშლა ამ ორ მრუდს შორის მიმდინარეობს.

რადგან, უმრავლეს შემთხვევაში, ფოლადის სტრუქტურის ფორმირება განუწყვეტელი გაცივების პირობებში ხდება, მიმდინარე გარდაქმნების ასახსნელად აუსტენიტის იზოთერმული გარდაქმნის დიაგრამაზე გაცივების სიჩქარის მრუდებს ატარებენ (სურ. 6.6). ნახაზზე გაცივების მრუდები – $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$.

ნელი სიჩქარით გაცივების შემთხვევაში (V_1 მრუდი, სურ. 6.6) a_1 და b_1 წერტილების შესაბამის ტემპერატურებზე ($700-650^\circ\text{C}$) დაიწყება და დამთავრდება აუსტენიტის

გარდაქმნა, რის შედეგადაც წარმოიქმნება ფერიტისა და ცემენტიტის უხეში აგებულების მიკრომექანიკური ნარევი, რომელსაც პერლიტი ეწოდება. იგი დაბალი სისაღით ხასიათდება, აუსტენიტის დაშლის სხვა პროდუქტებთან შედარებით. კოლონიების ორფაზა აგებულება კარგად ჩანს 6.7, ა სურათზე წარმოდგენილი მიკროსტრუქტურიდან.

უფრო მაღალი სიჩქარით გაცივებისას (V_2, V_3) მრუდები აუსტენიტის დაშლის დიაგრამის ხაზებს უფრო დაბალ ტემპერატურებზე გადაკვეთს ($a_2, b_2, \sim 650-600^\circ\text{C}$; $a_3, b_3, \sim 600-500^\circ\text{C}$). შესაბამისად, წარმოიქმნება სულ უფრო და უფრო წერილფორფიტოვანი დაშლის პროდუქტები – სორბიტი და ტროსტიტი (სურ. 6.7, ბ, გ), რომლებიც პერლიტთან შედარებით უფრო გაზრდილი სისაღით ხასიათდება. პერლიტს, სორბიტსა და ტროსტიტს პერლიტური ოჯახის სტრუქტურებს უწოდებენ.



სურ. 6.7. პერლიტური ოჯახის სტრუქტურები. ა–პერლიტი, ბ–სორბიტი, x5000; გ–ტროსტიტი, x15000

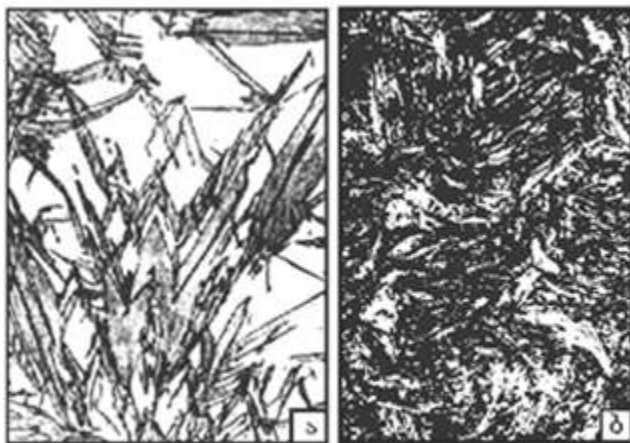
თუ ფოლადის გაცივება დიდი სიჩქარით მიმდინარეობს (V_5 , სურ. 6.6), მისი მრუდი იზოთერმული დიაგრამის ხაზებს არ გადაკვეთს. ეს იმას ნიშნავს, რომ ასეთი სიჩქარით გაცივებისას აუსტენიტის გარდაქმნა დიფუზიური მექანიზმით (პერლიტური ოჯახის სტრუქტურების წარმოქმნით) არ ხდება. გადაცივებული აუსტენიტი მოლიანად აღმოჩნდება შენარჩუნებული M_H ტემპერატურამდე, რომლის ქვემოთაც აუსტენიტი არადიფუზიური ე.წ. მარტენსიტული მექანიზმით განიცდის გარდაქმნას.

მარტენსიტული მექანიზმით გარდაქმნის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ აუსტენიტურ მდგომარეობამდე გახურებული ფოლადის დიდი სიჩქარით გაცივების შემთხვევაში (მაგალითად, წყალში), ალოტროპიული გარდაქმნა $\gamma \rightarrow \alpha$ მიმდინარეობს, მაგრამ რადგან დიფუზიური პროცესი დამუხრუჭებულია, ნახშირბადი ვერ გამოდის α რკინის კრისტალური გისოსიდან და იძულებით რჩება მასში ჩანერგილი იმ რაოდენობით, რამდენსაც ფოლადი შეიცავს. ამგვარად ყალიბდება ნახშირბადის გადაჯერებული მყარი ხსნარი რკინის α მოდიფიკაციაში, რომელსაც მარტენსიტი ეწო-

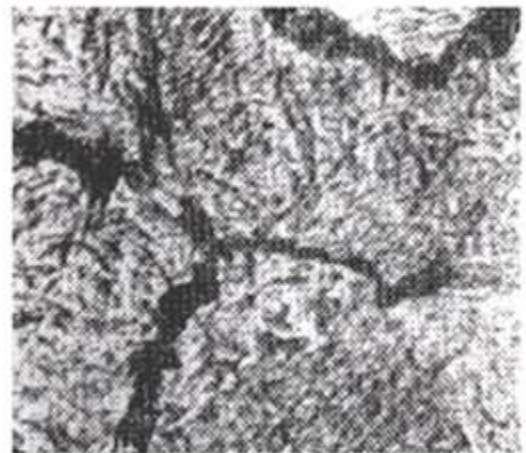
დება. მარტენსიტი ხასიათდება მაქსიმალური სისალით, გარდაქმნის სხვა პროდუქტებთან შედარებით.

გაცივების მინიმალურ სიჩქარეს, რომლის დროსაც არ ხდება აუსტენიტის დაშლა პერლიტური ოჯახის სტრუქტურების წარმოქმნით და აუსტენიტიდან მარტენსიტი მიიღება, წრთობის კრიტიკული სიჩქარე ეწოდება. იგი მხებია აუსტენიტის იზოთერმული დაშლის დიაგრამის a მრუდთან (V_k , სურ. 6.6).

მარტენსიტული სტრუქტურა ფოლადებში ძირითადად ფირფიტოვანია. მიკროხეხის ზედაპირზე მარტენსიტის ფირფიტები განივი კვეთით გამოდის და ნემსის ფორმა აქვს (სურ. 6.8). ამიტომ, მასალათმცოდნეობაში მარტენსიტული სტრუქტურის დასახასიათებლად მიღებულია ტერმინები: „მსხვილნემსა მარტენსიტი“, „წვრილნემსა მარტენსიტი“. რაც უფრო წვრილმარცვლოვანია საწყისი აუსტენიტი, მით უფრო წვრილნემსაა მისგან ჩამოყალიბებული მარტენსიტი.



სურ. 6.8. მარტენსიტული სტრუქტურა შადალნახშირბადიან (ა, $\times 1500$) და საშუალონახშირბადიან (ბ, $\times 500$) ფოლადებში



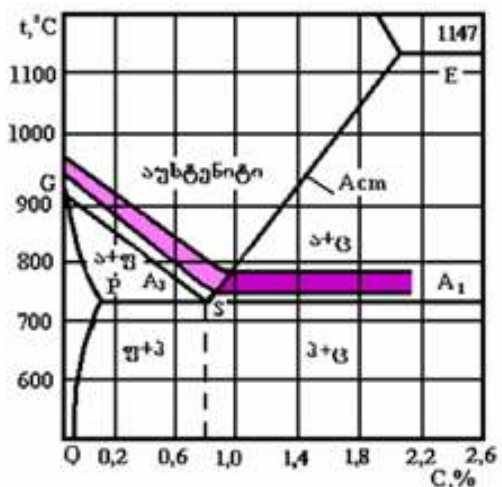
სურ. 6.9. მარტენსიტულ-ტროსტიტული (მუქი უბნები) სტრუქტურა. $\times 350$

თუ გაცივების სიჩქარე რამდენადმე ნაკლებია კრიტიკულთან შედარებით (მაგალითად, V_4 , სურ. 6.6), მაშინ ზედა ტემპერატურულ ინტერვალში a მრუდის გადაკვეთის შემდეგ დაიწყება აუსტენიტის ნაწილობრივი დაშლა ტროსტიტის წარმოქმნით. რადგან V_4 გაცივების სიჩქარის მრუდის მრუდს არ კვეთს, პროცესი ბოლომდე არ მიმდინარეობს, დარჩენილი აუსტენიტი გადაცივდება M_H ტემპერატურამდე და გარდაქმნა მარტენსიტული სტრუქტურის წარმოქმნით დამთავრდება. შედეგად ჩამოყალიბდება მარტენსიტულ-ტროსტიტული სტრუქტურა (სურ. 6.9).

დასასრულ, თუ აუსტენიტის დაშლა იზოთერმულ პირობებში (მუდმივ ტემპერატურაზე) მოხდა დიაგრამის მუხლს ქვემოთ, მაგრამ მარტენსიტული გარდაქმნის ინტერვალის ზემოთ (V_6 რეჟიმი, სურ. 6.6), ჩამოყალიბდება ტროსტიტთან შედარებით კიდევ უფრო წვრილდისპერსიული ფერიტისა და ცემენტიტის მიკრომექანიკური ნარევი, რომელსაც ბეინიტი ეწოდება. მისი სისაღე საგრძნობლად აღემატება პერლიტური ოჯახის სტრუქტურების სისაღეს.

6.2.2. წროობის რეჟიმის შერჩევა

ფოლადის წროობისათვის გახურების ტემპერატურა რკინა-ნახშირბადის დიაგრამის მიხედვით შეირჩევა (ნახ. 6.10) შემდეგი მოსაზრებიდან გამომდინარე: წროობის წინ გახურების მიზანია არსებული, ფერიტ-პერლიტური (ქვევტექტოიდური ფოლადებისათვის) სტრუქტურის გადაყვანა აუსტენიტში. ამისათვის ქვევტექტოიდურ ფოლადს ახურებენ $Ac_3 + (30-50)^{\circ}C$ ტემპერატურამდე, აყოვნებენ წინასწარ შერჩეული დროის განმავლობაში და წყალში აცივებენ, რაც მარტენსიტული სტრუქტურის ჩამოყალიბებას უზრუნველყოფს. ერთფაზა აუსტენიტური მდგომარეობიდან ნაკეთობის წროობას სრული წროობა ეწოდება.



სურ. 6.10. ნახშირბადიანი ფოლადების წროობის ტემპერატურული ინტერვალი

თუ ზევტექტოიდურ ფოლადს წროობის წინ გაგახურებთ მხოლოდ Ac_1 ტემპერატურის ზემოთ $(30-50)^{\circ}C$ -ით, სტრუქტურაში აუსტენიტ-თან ერთად შემონახული აღმოჩნდება მეორეული ცემენტიტიც. წყალში წროობის შემდეგ აუსტენიტი მარტენსიტს მოგვცემს. ამდენად, ოთახის ტემპერატურაზე ფიქსირებული სტრუქტურა შედგენილი იქნება მარტენსიტისა და ცემენტიტისაგან. ასეთი რეჟიმით წროობას არასრულს უწოდებენ. რადგან ცემენტიტის თანხლება (მისი სისაღეა 800 HB) არა მარტო აუარესებს

ფოლადის თვისებებს, არამედ ზრდის კიდევ მის სისაღესა და ცვეთამდებობას, ზევტექტოიდურ ფოლადებს ყოველთვის არასრულ წროობას უტარებენ.

6.3. მოშვება

მოშვება თერმული დამუშავების საბოლოო სახეა და ყოველთვის წრთობის შემდეგ ტარდება. ნაწრთობი ნაკეთობის საბოლოო თვისებებს მოშვების ტემპერატურა აყალიბებს.

მოშვების დროს ხდება ნაკეთობის გახურება A_1 ტემპერატურის ქვემოთ (სურ. 6.10), დაყვნება გარკვეული დროის განმავლობაში და გაცივება.

პრაქტიკულად მოშვების სამ სახეობას იყენებენ:

ა. დაბალ მოშვებას – გახურება $150-200^{\circ}\text{C}$ -მდე;

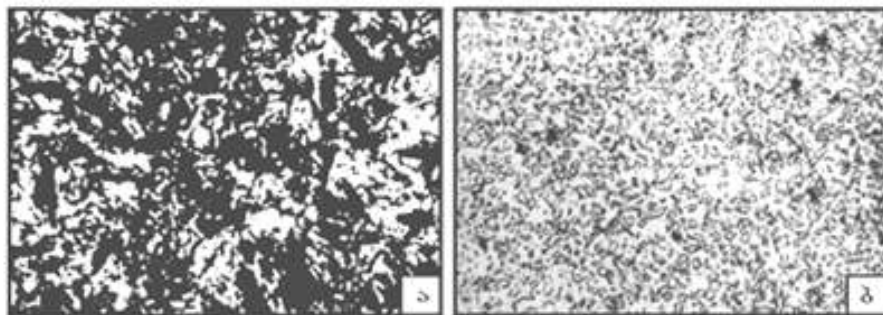
ბ. საშუალო მოშვებას – გახურება $300-500^{\circ}\text{C}$ -მდე;

გ. მაღალ მოშვებას – გახურება $500-700^{\circ}\text{C}$ -მდე.

დაბალი მოშვების მიზანია მხოლოდ ნარჩენი ძაბვების მოხსნა რაიმე მნიშვნელოვანი სტრუქტურული გარდაქმნების გარეშე. სისაღე თითქმის უცვლელი რჩება, ძაბვები კი მოიხსნება. დაბალ მოშვებას ძირითადად უტარებენ მჭრელ და საზომ იარაღებს, აგრეთვე ისეთ ნაკეთობას, სადაც აუცილებელია მაღალი სისაღე, სიმტკიცე და ცვეთამედეგობა.

საშუალო მოშვება ძირითადად ზამბარებსა და რესორებს უტარდება. ფოლადი ღებულობს მაღალ დრეკად თვისებებს. მოშვების შემდეგ გაცივება შეიძლება წყალში განხორციელდეს. ასეთ შემთხვევაში ზედაპირულ შრეებში მკუმშავი ნარჩენი ძაბვები წარმოიქმნება, რაც ზრდის ზამბარის დაღლილობისადმი გამძლეობას.

მაღალი მოშვების მიზანია წრთობით მიღებული სტრუქტურის ისეთნაირი შეცვლა, რომ სისაღე და სიმტკიცე რამდენადმე შემცირდეს, მაგრამ სიბლანტე და პლასტიკურობა – გაიზარდოს. მოშვების ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად სისა-



სურ. 6.11. მოშვების ტროსტიტი (ა) და მოშვების სორბიტი (ბ). $\times 1000$

ლისა და სიმტკიცის მახასიათებლები მცირდება, ხოლო პლასტიკურობა და სიბლანტე – მატულობს. მარტენსიტზე წრობას და მაღალ მოშვებას გაუმჯობესება ეწოდება.

მოშვების პროდუქტები – მოშვების ტროსტიტი და მოშვების სორბიტი (სურ. 6.11) ერთმანეთისგან განსხვავდება ცემენტის დისპერსიულობითა და ფერის რეკრისტალიზაციის ხარისხით, რაც ძირითადად ფოლადის მექანიკურ მახასიათებლებზე ახდენს გავლენას. უშუალოდ აუსტენიტის დაშლის შედეგად მიღებული ფირფიტოვანი სტრუქტურებისაგან განსხვავებით, მოშვების სტრუქტურები ხასიათდება მარცვლოვანი აგებულებით (სურ. 6.11, ბ), რაც მათ დიდ უპირატესობას ანიჭებს თვისებების კომპლექსის თვალსაზრისით – კარგად არის შეხამებული სისალე, სიმტკიცე და დარტყმითი სიბლანტის მაჩვენებლები.

თავი VII

ლეგიონური ფოლადი

ჩვეულებრივი ნახშირბადიანი ფოლადი თავისი თვისებებით სრულად ვერ აკმაყოფილებს თანამედროვე ტექნიკის სულ უფრო და უფრო მზარდ მოთხოვნებს. ეს განსაკუთრებით ეხება ტექნიკის ისეთ დარგებს, როგორიცაა: რეაქტიული ავიაცია, სარაკეტო ტექნიკა, ატომური ენერგეტიკა და ა.შ. ამიტომ, მიმართავენ ნახშირბადიანი ფოლადის თვისებათა შეცვლას ლეგირების გზით.

ლეგირება ეწოდება ისეთ პროცესს, როდესაც ძირითად ლითონში, მოცემულ შემთხვევაში ფოლადში, საგანგებოდ შეჰყავთ ერთი ან რამდენიმე ელემენტი სტრუქტურისა და თვისებების სასურველი მიმართულებით შეცვლის მიზნით. ასეთ ფოლადს ლეგირებული ეწოდება, შეტანილ ელემენტებს – მალეგირებელი ელემენტები.

7.1. მალეგირებული ელემენტების გავლენა ფოლადის თვისებებზე

თუ ლეგირებული ფოლადების ყველა ღირსებას მოვუყრით თავს, შემდეგ ზოგად სურათს მივიღებთ:

1. მალეგირებელი ელემენტები იწვევს ფერიტის განმტკიცებას, რაც იძლევა ფოლადის თვისებათა გაუმჯობესების შესაძლებლობას იმ შემთხვევაში, როდესაც სტრუქტურაში ფერიტი დიდი რაოდენობით არის წარმოდგენილი;

2. მალეგირებელი ელემენტების გავლენით უფრო მაღალი სიმტკიცის ფოლადის მიღებაა შესაძლებელი, რაც მანქანათა ნაწილების წონის შემცირებისა და ლითონის ეკონომიის შესაძლებლობას იძლევა;

3. მალეგირებელი ელემენტები ზრდის აუსტენიტის მდგრადობას ანუ აძნელებს მის დაშლას გაცივების პროცესში. ეს შესაძლებელს ხდის წრთობა ვაჭარმოთ ზეთში წყლის ნაცვლად, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს წრთობის ისეთ დეფექტებს, როგორიცაა დაბრეცა ან დაბზარვა;

4. მალეგირებელი ელემენტები აფერხებს მოშვების დროს მიმდინარე გარდაქმნებს (მაგალითად, მარტენსიტიდან ნახშირბადუხვი ფაზების გამოყოფას) ანუ ფოლადი მდგრადი ხდება მოშვების მიმართ. ეს საშუალებას იძლევა ლეგირებული ფოლადი გამოვიყენოთ უფრო მაღალი ტემპერატურის პირობებში;

5. უმრავლეს შემთხვევაში, მალეგირებელი ელემენტები უზრუნველყოფს განსაკუთრებით წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას. ეს, სხვა თანაბარ პირო-

ბებში, ზრდის დარტყმითი სიბლანტის მახასიათებლებს და დაბლა სწევს ფოლადის მეიფე მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურას;

6. კარბიდშემქმნელი მალეგირებელი ელემენტების თანხლებით ფოლადი იძენს მაღალ სისაღეს, ცვეთამდებობას და თბომდებობას, რაც ლეგირებულ ფოლადებს უპირატესობას ანიჭებს მჭრელი იარაღის დასამზადებლად;

7. მალეგირებელი ელემენტები, რომლებიც ფოლადის გაცივების პროცესში გამოიყოფა მეარი ხსნარიდან მეორეული, წერილდისპერსიული ჩანართების სახით, მნიშვნელოვნად აუმჯობესებენ ფოლადის სიმტკიცეს და მხურვალსიმტკიცის მახასიათებლებს;

8. მალეგირებელი ელემენტების გავლენით ფოლადი იძენს კიდევ ბევრ ღირსშესანიშნავ თვისებას – ელექტროწინააღობას, მაგნიტურ, თბურ, დრეკად და სხვა თვისებებს, რაც მას შეუცვლელს ხდის სპეციალური დანიშნულებით გამოყენებისათვის.

7.2. ლეგირებული ფოლადის კლასიფიკაცია და ნიშანდგება

ლეგირებული ფოლადის კლასიფიკაციას აწარმოებენ სტრუქტურის, ქიმიური შედგენილობისა და დანიშნულების მიხედვით.

მალეგირებელი ელემენტების შემცველობის მიხედვით არჩევენ მცირედ ლეგირებულ ფოლადს, სადაც მალეგირებელი ელემენტების ჯამური შემცველობა 2,5% არ აღემატება საშუალოდ ლეგირებულ ფოლადს მალეგირებელი ელემენტების შემცველობით 2,5–10%-ის ზღვრებში და უხვად ლეგირებულს, სადაც ელემენტების ჯამური რაოდენობა 10% აღემატება.

მომწვარ მდგომარეობაში ჩამოყალიბებული სტრუქტურის მიხედვით არჩევენ ოთხი კლასის ფოლადს:

1. ქვევებექტიოდურს სტრუქტურით – ფერიტი+პერლიტი;
2. ევბექტიოდურს – სუფთა პერლიტური სტრუქტურით;
3. ზეევბექტიოდურს, რომლის სტრუქტურაა პერლიტი+კარბიდი;
4. ლედებურიტულს, რომლის სტრუქტურაა პერლიტი+ლედებურიტი.

ნორმალიზებულ მდგომარეობაში ჩამოყალიბებული სტრუქტურის მიხედვით ლეგირებული ფოლადი სამ კლასად იყოფა:

1. პერლიტური კლასის ფოლადებად. ამ კლასს მიეკუთვნება მცირედ ლეგირებული ფოლადები, რომლებშიც მალეგირებელი ელემენტების გავლენა მეტად სუსტია;

2. მარტენსიტული კლასის ფოლადებად. ამ კლასის ფოლადები საშუალოდ ლეგირებულია;

3. აუსტენიტური კლასის ფოლადებად. მას მიეკუთვნება უხვად ლეგირებული ფოლადები.

ფოლადის ლეგირებისათვის ამჟამად გამოიყენება მენდელეევის პერიოდული სისტემის მრავალი ელემენტი, როგორიცაა: მანგანუმი, ქრომი, სილიციუმი, ვოლფრამი, ვანადიუმი, ტიტანი, მოლიბდენი, ნიკელი, კობალტი, ბორი და ა.შ. სილიციუმი და მანგანუმი მალეგირებელ ელემენტებს მიეკუთვნება იმ შემთხვევაში, თუ მათი რაოდენობა აღემატება ჩვეულებრივ ნახშირბადიან ფოლადში დასაშვებ ზღვარს. ფოლადის ლეგირება შესაძლებელია ერთი ან ერთდროულად რამდენიმე ელემენტით.

ქიმიური შედგენილობის მიხედვით კლასიფიკაცია ხდება გამოყენებული მალეგირებელი ელემენტების შესაბამისად. ამ თვალსაზრისით არჩევენ: ქრომიან, ქრომნიკელიან, ქრომმანგანუმიან, ქრომმანგანუმსილიციუმიან და ა.შ. ფოლადებს.

დანიშნულების მიხედვით ლეგირებული ფოლადები სამ ჯგუფად იყოფა:

1. საკონსტრუქციო (სამანქანო) ფოლადებად, რომლებიც განკუთვნილია მანქანათა ნაწილების და აგრეთვე სამშენებლო კონსტრუქციების დასამზადებლად;

2. საიარაღო ფოლადებად – მჭრელი, საზომი და დარტყმით-სატვიფრავი იარაღებისათვის;

3. სპეციალური დანიშნულების ფოლადებად, რომლებსაც რაიმე განსაკუთრებული თვისება ახასიათებს.

ლეგირებული ფოლადის ნიშანდება ხდება ნახშირბადის რაოდენობისა და მალეგირებელი ელემენტების მიხედვით.

მოქმედი სტანდარტების შესაბამისად, მალეგირებელი ელემენტების აღნიშვნისათვის შემდეგი რუსული ასოებია შემოღებული: ქრომი–X, სილიციუმი–C, კობალტი – K, ტიტანი– T, ნიკელი–H, მოლიბდენი –M, ვოლფრამი – B, ნიობიუმი – Б, მანგანუმი – Г, სპილენძი – Д, ვანადიუმი – Ф, ალუმინი – Ю, ფოსფორი – П, აზოტი – А (იწერება მარკის შიგნით, რადგან მარკის წინ А სიმბოლო აღნიშნავს საავტომატო ფოლადს, ხოლო მარკის ბოლოში – ფოლადის მაღალ ხარისხს).

ლეგირებული ფოლადის მარკაში პირველ ადგილზე იწერება რიცხვი, რომელიც მიუთითებს ნახშირბადის რაოდენობას პროცენტის მეასედებით ან მეათედებით. მაგალითად, ფოლადი 40X საშუალოდ შეიცავს 0,4%C, ამდენივე ნახშირბადს შეიცავს აგრეთვე ფოლადი 4XC. თუ რიცხვი მარკის წინ არ წერია, ეს არ მიუთითებს ნახშირბადის არარსებობაზე, უბრალოდ, ნახშირბადის რაოდენობა უნდა სტანდარტში ინახოს.

ნახშირბადის შემცველობის აღმნიშვნელი რიცხვის შემდეგ იწერება მალეგირებული ელემენტის სიმბოლო, შემდეგ – რიცხვი, რომელიც მიუთითებს მის შემცველობას პროცენტობით. თუ რიცხვი არ წერია, ეს ნიშნავს, რომ მალეგირებული ელემენტის რაოდენობა 1–1,5%-ის ზღვრებშია. მაგალითად, ფოლადი 40X შეიცავს 0,8–1,1% ქრომს, ხოლო ფოლადი X13 – საშუალოდ 13% ქრომს. 30XГC ფოლადში შედის: 0,32%C, 0,91%Cr, 0,95%Mn და 0,87%Si.

ლეგირებული ფოლადების ნიშანდების პრინციპი ისეთი ზუსტი კანონზომიერებით არ ხასიათდება, როგორც ჩვეულებრივი ნახშირბადიანი ფოლადებისა და გვხვდება გადახრები ზემოაღწერილი სისტემიდან. მაგალითად, ფოლადი ბურთულა საკისრებისათვის აღინიშნება ასოთი Ш (Шарикоподшипниковая) – ШХ6, ШХ9, ШХ15. ამასთან, ფოლადები შეიცავს არა 6, 9 და 15% ქრომს, არამედ საშუალოდ 0,6, 0,9 და 1,5%; E ასოთი აღინიშნება განსაკუთრებული მაგნიტური თვისებების მქონე ფოლადი, P-ით – სწრაფმჭრელი ფოლადი.

7.3. ლეგირებული ფოლადების გამოყენების ზოგიერთი სფერო

როგორც აღვნიშნეთ, ლეგირებული ფოლადი ხასიათდება უკეთესი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით ნახშირბადიან ფოლადებთან შედარებით. განსაკუთრებით ძლიერ არის გაზრდილი მხურვალეიმტკიცე, კოროზიისადმი წინააღობა, დარტყმითი სიბლანტე, დენადობის ზღვარი, ფარდობითი შევიწროება, ელექტრული წინააღობა და ა.შ. ამიტომ, მისი გამოყენების სფერო მნიშვნელოვნად არის გაზრდილი. თუმცა ამ უნიკალურ თვისებებს იგი თერმული დამუშავების (წრთობა და მოშვება) შემდეგ იძენს.

მცირედ ლეგირებული ფოლადები გამოიყენება შენობების ჩონჩხედის, ხიდების, ანძების, სხვადასხვა შენადული კონსტრუქციების, მაგისტრალური გაზსადენების

და ნავთობსადენების, დაარმატურებული რკინა ბეტონის და, იშვიათად, მანქანათა ნაწილების დასამზადებლად. როგორც წესი, აღნიშნულ ფოლადებს თერმულ დამუშავებას არ უტარებენ. ზემოაღნიშნული კონსტრუქციების დამზადება ძირითადად შედუღებით ხდება, რაც ფოლადში ნახშირბადის რაოდენობას 0,2–0,25%-მდე ზღუდავს. ნახშირბადის შემცირებით გამოწვეული სიმტკიცის მახასიათებლების დადაბლების კომპენსაცია მაღეგირებელი ელემენტების დამატებით ხდება. ამ ჯგუფის ფოლადებს მიეკუთვნება: 09Г2, 09Г2Д, 09Г2С, 15Г2СФ და სხვა.

გასაუმჯობესებელი ფოლადები შეიცავს 0,3–0,5% ნახშირბადს და 5%-მდე მაღეგირებელ ელემენტებს (30ХГСА, 38ХН3МФА, 38ХН3МА, 18Х2Н4МА). გაუმჯობესების შემდეგ მათი სტრუქტურა სორბიტია. ისინი გამოიყენება ლილვების, ბარბაცების, ჭოკების და სხვა ისეთი დეტალების დასამზადებლად, რომლებიც ციკლურ ან დარტყმით დატვირთვებს განიცდის.

ფოლადები, რომლებიც გამოირჩევა მდგრადობით კოროზიის მიმართ, კოროზიამდები (უჟანგავი) ფოლადების სახელწოდებითაა ცნობილი. კოროზიამდებობის უზრუნველსაყოფად ძირითად მაღეგირებელ ელემენტად ქრომი გამოიყენება. ნორმალიზაციის შედეგად მიღებული სტრუქტურის მიხედვით ქრომიანი ფოლადების შემდეგძირითად კლასებს ასხვავებენ: ფერიტულს (0Х13, 15Х25Т, 12Х17, 15Х28); მარტენსიტულ-ფერიტულს (12Х13) და მარტენსიტულს (20Х13, 30Х13, 40Х13). 30Х13 ფოლადისაგან ძირითადად მანქანათა ნაწილებს ამზადებენ, ხოლო 40Х13 ფოლადისაგან – მჭრელ, საზომ და ქირურგიულ იარაღებს.

ქრომნიკელიანი უჟანგავი ფოლადები სტრუქტურის მიხედვით იყოფა აუსტენიტურ, აუსტენიტურ-მარტენსიტულ და აუსტენიტურ-ფერიტულ კლასებად. სტრუქტურას განსაზღვრავს ნახშირბადის, ქრომისა და ნიკელის შემცველობა.

აუსტენიტური კლასის ფოლადები (12Х18Н9, 17Х18Н9) აუსტენიტურ სტრუქტურას ღებულობს წრთობის შემდეგ და ხასიათდება მაღალი პლასტიკურობით, ზომიერი სიმტკიცით, კარგი კოროზიამდებობით დამჟანგავ გარემოში. ამ ჯგუფის ფოლადები ტექნოლოგიურია – კარგად დუღდება, იტვიფრება, ექვემდებარება ცივად გლინვას.

აუსტენიტურ-მარტენსიტული კლასის ფოლადებმა (09Х15Н8Ю, 09Х17Н7Ю) გამოიყენება პოვა, როგორც მაღალმტკიცე შენადნობებმა. ისინი კარგად დუღდება და

ხასიათდება მდგრადობით ატმოსფერული კოროზიის მიმართ. ფოლადები განმტკიცებას შემდეგი თერმული დამუშავებით განიცდის – წრთობა აუსტენიტური სტრუქტურის მისაღებად, 975°C -დან+სიცივით დამუშავება (-175°C)-ზე+მოშვება $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ -ზე. ფოლადები გამოიყენება საფრენი აპარატების შემონაკერის, საქშენის კონსტრუქციების და ძალოვანი ელემენტების დასამზადებლად.

სპეციალური დანიშნულების ლეგირებული ფოლადები ქვემოთ იქნება განხილული.

თაზო VIII

შერადი ლითონები და შენადნობები

8.1. ალუმინი და მისი შენადნობები

8.1.1. ალუმინი. ალუმინის შენადნობების კლასიფიკაცია და ნიშანდება

მსუბუქი ლითონებიდან ალუმინს ყველაზე მეტი სამრეწველო მნიშვნელობა აქვს. მისი წარმოების მოცულობას მეორე ადგილი უკავია რკინის შემდეგ. ალუმინის დამახასიათებელ თვისებას მცირე სიმკვრივე ($\gamma=2,7\text{გ/სმ}^3$) და დაბალი დნობის ტემპერატურა (660°C) მიეკუთვნება. ალუმინი ხასიათდება დაბალი სიმტკიცით ($\sigma_{\text{მკლ.}}=60$ მგპა, HB 25) და გაზრდილი პლასტიკურობით ($\delta=40\%$, $\psi=85\%$). არ გააჩნია ალოტროპიული მოდიფიკაციები, კარგი თბო და ელექტროგამტარი მასალაა.

ალუმინი და მისი შენადნობები გამოირჩევა მაღალი ტექნოლოგიურობით, კარგად დეფორმირდება, მათგან ადვილად შეიძლება საკმაოდ რთული ფორმის ნაკეთობების მიღება.

ალუმინი ქიმიურად აქტიური ლითონია. მიუხედავად ამისა, იგი ჰაერზე და ზოგიერთ აგრესიულ გარემოში მეტად სუსტად განიცდის კოროზიას. ამის მიზეზია ალუმინის ზედაპირზე წარმოქმნილი ოქსიდის (Al_2O_3) მკვრივი ფურჩი, რომელიც ლითონს შემდგომი ჟანგვისაგან იცავს.

პირველადი (ტექნიკური) ალუმინის მარკა აღინიშნება A ასოთი, რომლის შემდეგ იწერება რიცხვი. იგი მიუთითებს ალუმინის სისუფთავეს მძიმის შემდეგ. მაგალითად, A995 შეიცავს 99,995% ალუმინს. განსაკუთრებული სისუფთავის ალუმინია A999; მაღალი სისუფთავისა – A995; A99; A97; A95, ხოლო ტექნიკური სისუფთავის – A85; A8; A7; . . . A0. ტექნიკური ალუმინისგან ამზადებენ ფურცლებს, ძელაკებს, მავთულს.

სასურველი თვისებების მისაღებად აწარმოებენ ალუმინის ლეგირებას სხვადასხვა ელემენტით. მაღლეირებელ დანამატებად ყველაზე ფართოდ გამოიყენება სპილენძი, მაგნიუმი, თუთია და სილიციუმი.

ნახევარფაბრიკატების მიღების ხერხის მიხედვით ასხვავებენ ალუმინის სამსხმელო და დეფორმირებად შენადნობებს. თითოეული მათგანი, თავის მხრივ, ორ ჯგუფად იყოფა: პირველი ჯგუფის შენადნობები არ ექვემდებარება თერმულ გან-

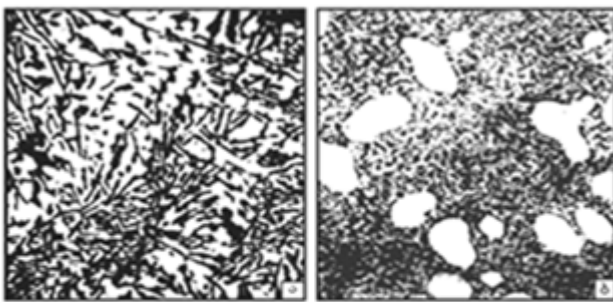
მტკიცებას, ხოლო მეორე ჯგუფის შენადნობების თვისებათა შეცვლა შესაძლებელია წრთობითა და შემდგომი ბუნებრივი ან ხელოვნური დაძველებით.

ალუმინის შენადნობების მარკა აღინიშნება ასოებით, რომლებიც ზოგადად მიუთითებს შენადნობის ტიპს, თვისებას, დანიშნულებას ან მდგომარეობას. მაგალითად, ასო Π (დეფორმირებადი) აღნიშნავს დურალუმინის ტიპის შენადნობებს, B – მაღალმტკიცე შენადნობებს, AK – ჭედად შენადნობებს, AL – სამსხმელო შენადნობებს. ასოების შემდეგ იწერება შენადნობის პირობითი ნომერი, რომელსაც არავითარი კავშირი არა აქვს მასალის შედგენილობასთან ან თვისებებთან. პირობით ნომერს შეიძლება მოსდევდეს სიმბოლო, რომელიც მიუთითებს შენადნობის მდგომარეობას. მაგალითად, M – რბილი, T – თერმულად დამუშავებული, H – მოპირსაღებული, Π – ნახევრადმოპირსაღებული.

ყველა სამრეწველო ალუმინის შენადნობი შეიძლება დაიყოს აგრეთვე ალუმინისა და იმ ძირითადი მალეგირებელი ელემენტების სისტემების მიხედვით, რომლებიც შენადნობის თვისებებს განსაზღვრავს. მაგალითად, Al-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mn, Al-Mg-Si-Cu და ა.შ. ასეთ შემთხვევაში შენადნობის მარკას ხშირად A ასოთი აღნიშნავენ, რომელსაც მოსდევს ძირითადი მალეგირებელი ელემენტის აღმნიშვნელი სიმბოლო. მაგალითად, Al-Mn სისტემის შენადნობი აღინიშნება სიმბოლოებით AMn, Al-Mg-ის სისტემისა – AMg და ა.შ. შემდეგ იწერება შენადნობის რიგითი ნომერი და, აუცილებლობის შემთხვევაში, შენადნობის მდგომარეობის აღმნიშვნელი ასო.

8.1.2. ალუმინის სამსხმელო შენადნობები

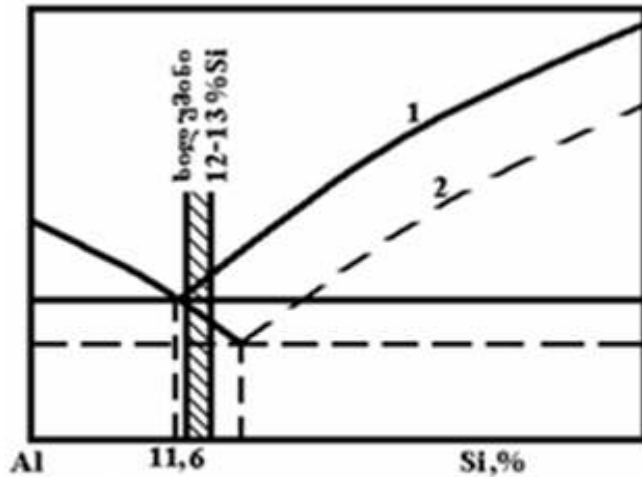
ალუმინის სამსხმელო შენადნობებიდან ყველაზე გავრცელებულია სილუმინი. იგი მიეკუთვნება Al-Si სისტემის შენადნობების რიცხვს. სილუმინი შეიცავს 12–13% სილიციუმს და სტრუქტურის მიხედვით ზევეტექტიკურ შენადნობს მიეკუთვნება. ასეთი შენადნობის სტრუქტურა შედგება ნემსისებრი აგებულების უხეში ევტექტიკისგან და პირველადი სილიციუმის ჩანართებისგან (სურ. 8.1, ა). ერთადერთი ხერხი, რომელიც სილუმინის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის გაზრდის საშუალებას



სურ. 8.1. სილუმინის (11,7% Si) მიკროსტრუქტურა მოდიფიცირებამდე (ა) და მოდიფიცირების შემდეგ (ბ). $\times 320$

უმს და სტრუქტურის მიხედვით ზევეტექტიკურ შენადნობს მიეკუთვნება. ასეთი შენადნობის სტრუქტურა შედგება ნემსისებრი აგებულების უხეში ევტექტიკისგან და პირველადი სილიციუმის ჩანართებისგან (სურ. 8.1, ა). ერთადერთი ხერხი, რომელიც სილუმინის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის გაზრდის საშუალებას

იძლევა, არის ევტექტიკაში შემაჯავლი სილიციუმის კრისტალების დაწერილმანება მოდიფიცირების გზით. უშუალოდ ჩასხმის წინ შენადნობში 0,01%-ის რაოდენობით ნატრიუმის ან სხვა მოდიფიკატორების (მაგალითად, $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$ -ის ნარევის) დამატებით მკვეთრად მცირდება ევტექტიკური სილიციუმის კრისტალების ზომები. გარდა ამისა, ევტექტიკური წერტილი სილიციუმის უფრო მეტი კონცენტრაციისუბნებისაკენ გადაადგილდება. ამასთან, მოდიფიკატორის შეტანააძნელებს სილიციუმის



სურ. 8.2. მოდიფიცირების გაუქმება Al-Si
სისტემის კრისტალიზაციის პროცესზე.
1 - მოდიფიცირების გარეშე;
2 - მოდიფიცირების შემდეგ

კრისტალიზაციას, რის გამოც სილიციუმის გამოყოფისა და ევტექტიკის კრისტალიზაციის ტემპერატურადაბლა იწევს (სურ. 8.2). შედეგად ჩამოყალიბდება შედარებით წერილდისპერსიული აგებულების პროდუქტები, ხოლო ზეევტექტიკური შედგენილობის შენადნობი ქვეევტექტიკური ხდება და მისი სტრუქტურა შედგენილი იქნება ღია ფერის პირველადი ალუმინის კრისტალებისა და წერილდისპერსიული ევტექტიკისაგან (სურ. 8.1,ბ). არამოდიფიცირებული

სილუმინისათვის $\sigma_{0.2} = 140$ მგპა, $\delta = 3\%$, მოდიფიცირების შემდეგ კი $\sigma_{0.2} = 180$ მგპა, $\delta = 8\%$.

სილუმინი გამოირჩევა საკმაოდ მაღალი სამსხმელო თვისებებით, მაგრამ სხმული ფოროვანია. ამიტომ იგი გამოიყენება მხოლოდ რთული მოყვანილობის ისეთი დეტალების დასამზადებლად, რომლებსაც მაღალი მექანიკური თვისებები არ მოეთხოვება.

გაზრდილი მექანიკური მახასიათებლებით, თუმცა გაუარესებული სამსხმელო თვისებებით, ხასიათდება Al-Mg (Al13, Al18, Al23, Al27, Al28) და უფრო რთული სისტემის (Al-Cu-Mg და Al-Zn-Mg) შენადნობები, როგორცაა Al11, Al21, Al19, Al23 მხურვალმტკიცე და Al24 შენადნობები, რომელთა ძირითადი თავისებურება მათ თვითწრთობაში მდგომარეობს.

8.1.3. დეფორმირებადი შენადნობები

დეფორმირებად შენადნობებს, რომლებიც თერმულ განმტკიცებას არ ექვემდებარება, მიეკუთვნება Al-Mn (AMn) და Al-Mg (AMg) სისტემის შენადნობები.

AMn შენადნობები 1-დან 6%-მდე მაგნიუმს შეიცავს. ისინი პრაქტიკულად მრავალკომპონენტიან შენადნობებს მიეკუთვნება, რადგან ყოველთვის შეიცავს რკინას და სილიციუმს მუდმივი მინარევების სახით. მრეწველობა ნახევარფაბრიკატებსრბილ (AMnM) და ნახევრადმოპირსაღებულ (AMnΠ) მდგომარეობაში უშვებს.

ნახევრადმოპირსაღებულ ფურცელს ორი ხერხით ღებულობენ: ა – მომწვარი ფურცლის არასრული ცივჭედვით და ბ – ცივნაჭედი ფურცლის არასრული მოწვით. პირველი ხერხი მიზანშეწონილია საშუალო სისქის (1,0–4,5 მმ), ხოლო მეორე – თხელი (0,6–0,8 მმ) ფურცლების წარმოებაში.

Al-Mg სისტემის შენადნობებს მიეკუთვნება: AMg1, AMg2, AMg3, AMg5 და AMg6. მაგნიუმის შემცველობა 11–12%-მდე უმნიშვნელოდ ზრდის ალუმინის სიმტკიცეს, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება საკმაოდ მაღალ დონეზე შენარჩუნებული. შენადნობებს ფართოდ იყენებენ შენადული კონსტრუქციების დასამზადებლად. თვისებათა გასაუმჯობესებლად დამატებით უტარებენ ლეგირებას მანგანუმით, ქრომით, ტიტანით და ვანადიუმით.

Al-Mg სისტემის შენადნობების დადებით მხარეს მიეკუთვნება დამაკმაყოფილებელი სიმტკიცის, მაღალი პლასტიკურობის, კოროზიამდგომარეობისა და შედუღებადობის კარგი ურთიერთშეხამება.

დეფორმირებად შენადნობებს, რომლებიც თერმულ განმტკიცებას ექვემდებარება, მიეკუთვნება Al-Cu-Mg (დურალუმინები), Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mn და უფრო რთული სისტემის შენადნობები. ყველა დურალუმინი, რომელიც მრეწველობაში გამოიყენება, შეიძლება ოთხ ჯგუფად დაიყოს:

- 1 – კლასიკური დურალუმინი (D1);
- 2 – დურალუმინი გაზრდილი სიმტკიცით (D16), რომელიც, D1 შენადნობისგან განსხვავებით, უფრო მეტ მაგნიუმს შეიცავს;
- 3 – დურალუმინები გაზრდილი მხურვალემდგომობით (D19, BAd1 და BD17);
- 4 – დურალუმინები გაზრდილი პლასტიკურობით (D18, B65).

დურალუმინისაგან დამზადებულ ნაკეთობას უტარებენ წრთობას და ბუნებრივ დაძველებას. თერმული დამუშავების ძირითადი მოთხოვნაა წრთობის დროს გახურების ტემპერატურის პირობების მკაცრად დაცვა: D1, D19 და BAl1 შენადნობებისათვის – $505\pm 5^{\circ}\text{C}$, ხოლო D16, BAl17 და D18 შენადნობებისათვის – $500\pm 5^{\circ}\text{C}$. წრთობას აწარმოებენ ცივ წყალში ღუმლიდან მაცივებელში გადატანის მინიმალური დროის უზრუნველყოფით. ყველა დურალუმინი, გარდა მცირედლეგირებული D18-ისა, ინტენსიურად განიცდის განმტკიცებას წრთობის შემდეგ ბუნებრივი დაძველების გზით.

ხელოვნურ დაძველებას შენადნობი უფრო სტაბილურ მდგომარეობაში გადაჰყავს. ხელოვნურ დაძველებას უტარებენ D16, D19 და BAl1 შენადნობებისაგან დამზადებულ ისეთ ნაკეთობას, რომელიც განკუთვნილია გაზრდილ ტემპერატურაზე ($125\text{--}200^{\circ}\text{C}$) საექსპლუატაციოდ. დაძველების ტემპერატურა შეადგენს 190°C , დაყოვნების დრო – 8–12 საათს.

ყველა დურალუმინი ხასიათდება კოროზიისადმი გაზრდილი მიდრეკილებით და საჭიროებს მისგან სპეციალურ დაცვას. მრეწველობაში ყველაზე გავრცელებულია დაცვის ორი ხერხი: მიტკეცა ტექნიკური ალუმინით და ელექტროქიმიური ოქსიდირება.

Al-Mg-Si სისტემის ფუძეზე დამზადებული შენადნობები ცნობილია სახელწოდებით „ავია“. გამოირჩევა ნაკლები სიმტკიცით, მაგრამ მაღალი პლასტიკურობითა და კოროზიამდებლობით, დურალუმინთან შედარებით. ამ ჯგუფის შენადნობებია: AB, AD31, AD33 და AD35. პირველი სამი შენადნობი ბუნებრივად დაძველებულ მდგომარეობაში გამოიყენება.

Al-Mg-Si-Cu მრავალკომპონენტისანი სამრეწველო შენადნობებიდან გამოიყენება AK6 და AK8. AK6 ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით და პლასტიკურობის კარგი შესაძლებლობით ცივ და ცხელ მდგომარეობაში, AK8 კი მიეკუთვნება ყველაზე მტკიცე შენადნობს და მისგან საპასუხისმგებლო ნაკეთობას ამზადებენ. უარყოფითი მხარეა დაბალი ტექნოლოგიურობა.

Al-Cu-Mn დეფორმირებადი შენადნობები (D20 და 1201) ტიტანის, ცირკონიუმისა და ვანადიუმის დანამატებით ხასიათდება მაღალი მექანიკური თვისებებით ოთახის, გაზრდილ (250°C) და კრიოგენულ (-250°C -მდე) ტემპერატურებზე. გამოირჩევა კარგი ტექნოლოგიურობით და შედუღებადობით. ორივე შენადნობს უტარდება

წრობა $535 \pm 5^{\circ}\text{C}$ -დან და შემდგომი დაძველება $170\text{--}190^{\circ}\text{C}$ -ზე 12–18 საათის განმავლობაში.

შედარებით ახალი შენადნობი 01205, რომელიც, 1201 შენადნობისაგან განსხვავებით, დამატებით შეიცავს კადმიუმს, ხასიათდება 30–50 მგპა-ით მეტი სიმტკიცის ზღვრით, მაგრამ გაუარესებული ტექნოლოგიურობით.

როული ფორმის ნაჭედების დასამზადებლად გამოიყენება შენადნობი AK4, რომელიც შეიცავს Cu, Mg, Mn, Si და Ni. ამავე სისტემას მიეკუთვნება AK4-1 და AK8 შენადნობები.

8.14. გამოყენების სფერო

ალუმინის შენადნობები დღემდე დომინირებული კონსტრუქციული მასალაა ავიაციაში. მისგან მზადდება თვითმფრინავის მზიდი კონსტრუქციების უმრავლესობა და ისეთი ძალოვანი ელემენტები, როგორიცაა გარსაცმი, გრძივძელი (ღონქერონი), შპანჰოუტი, ნერვიურა, სათბობისა და ზეთის ავზები. ამჟამად ალუმინის შენადნობებზე მოდის თვითმფრინავის მშრალი წონის (საწვავის გარეშე) 2/3-დან 3/4-მდე. ფართოდ გამოიყენება აგრეთვე რაკეტების კორპუსებისა და დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრების კონსტრუქციების დასამზადებლად, გემთმშენებლობაში, საკაბელო და საავტომობილო მრეწველობაში. ალუმინისა და მისი შენადნობების გამოყენების ერთ-ერთი სპეციფიკური სფეროა ატომური ენერგეტიკა.

ფოლადის შეცვლა ალუმინის შენადნობებით სატრანსპორტო საშუალებების წონას თითქმის სამჯერ ამცირებს, რაც გადასაზიდი ტვირთის რაოდენობას 2–2,5-ჯერ ზრდის, ხოლო 100 კგ ალუმინი, რომლითაც შეცვლილია მძიმე ლითონებისგან დამზადებული იგივე რაოდენობის საავტომობილო დეტალები, საწვავის ეკონომიას 15%-ით იძლევა

ალუმინის შენადნობების კოროზიამდევობა ათჯერ აღემატება ფოლადის კოროზიამდევობას ზღვის წყალში, ამიტომ წარმატებით გამოიყენება გემთმშენებლობასა და დიდ სიღრმეში მომუშავე აპარატურის დასამზადებლად.

8.2. სპილენძი და მისი შენადნობები

8.2.1. სპილენძი.

სპილენძი თავისი თვისებებით ახლოს დგას ვერცხლთან და ოქროსთან. ჰაერზე სუსტად იუანგება, გამოირჩევა მაღალი პლასტიკურობით, ელექტრო დათბოგამტარობით. კრისტალდება წახნაგდაცენტრებულ კუბურკრისტალურ გისოსში. არ ახასიათებს ალოტროპიული სახესხვაობები. სპილენძის დნობის ტემპერატურაა 1083°C , სიმკვრივე – $8,94 \text{ გ/სმ}^3$.

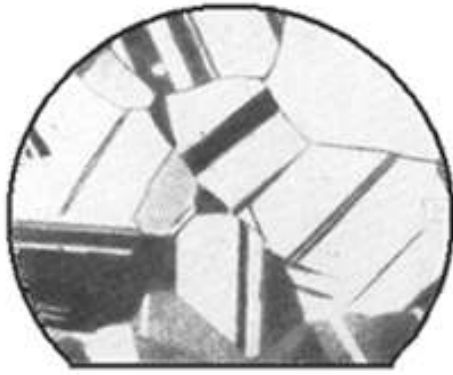
მინარეგები, რომლებსაც სპილენძი შეიცავს, ამცირებს მის ელექტროგამტარობას. ამ მიმართულებით განსაკუთრებით ძლიერად მოქმედებს ფოსფორი, დარიშხანი, სილიციუმი, რკინა, სტიბიუმი და კობალტი.

სისუფთავის მიხედვით არჩევენ რამდენიმე ხარისხის სპილენძს. სპილენძის მარკა Mასოთი აღინიშნება, რომლის შემდეგ, საჭიროების შემთხვევაში იწერება მისი გადადნობის ხერხის აღმნიშვნელი ასო (MB – ვაკუუმში გადადნობილი, MЭ – ელექტრონული სხივით გადადნობილი) და რიცხვი. რიცხვი მარკაში მიუთითებს სპილენძის სისუფთავეს. მაგალითად, M00 მარკა შეიცავს არანაკლებ $99,99\%$ სპილენძს; M0 – $99,95\%$; M1 – $99,90\%$; M2 – $99,7\%$; M3 – $99,5\%$; M4 – 99% . ყველაზე მაღალი სისუფთავით გამოირჩევა სპილენძი MB და MЭ, რომლებშიც მინარეგების ჯამური შემცველობა ნაკლებია შესაბამისად $0,01\%$ და $0,005\%$. ზესუფთა სპილენძი ხასიათდება დაბალი სიმტკიცით და მაღალი პლასტიკურობით. მისი დროებითი წინაღობა გაგლეჯაზე $\sigma_{\text{გაგლ}}=200 \text{ მგპა}$, დენადობის ზღვარი $\sigma_{\text{დენ}}=40-80 \text{ მგპა}$, ფარდობითი წაგრძელება $\delta=35\%$, ფარდობითი შევიწროება $\psi=80-95\%$.

სპილენძის მარკის აღმნიშვნელ სიმბოლოებს შეიძლება დამატებული ჰქონდეს რუსული ასოები ნ ან პ, რაც, შესაბამისად, მიუთითებს, რომ სპილენძი არის უუანგბადო ან განუანგული.

დეფორმირებული სპილენძისათვის დამახასიათებელია დეფორმაციის ტექსტურა, რაც იწვევს მექანიკური თვისებების ანიზოტროპიას. ძლიერად დეფორმირებულ სპილენძში რეკრისტალიზაცია $200-250^{\circ}\text{C}$ იწყება. რეკრისტალიზაციის შედეგად ყალიბდება პოლიედრული სტრუქტურა მოწვის ორეულების დიდი რაოდენობით (სურ. 8.3). სიმტკიცის მახასიათებლების შემცირება 150°C -ის ზემოთიწყება. სარეკრისტალიზაციო მოწვის ოპტიმალური ტემპერატურა $500-600^{\circ}\text{C}$ შეადგენს.

სუფთა სპილენძი და მისიმცირედ ლეგირებული შენადნობები გამოიყენება ელექტროტექნიკაში და ელექტროტრანსპორტზე. მაღალი თბოგამტარობის გამო, სპილენძი გამოიყენება აგრეთვე სხვადასხვა თბოგადამცემებსა და კრისტალიზატორში, როდესაც აუცილებელია სითბოს ინტენსიური გატანა დნობის ზონიდან.



სურ. 8.3. დეფორმირებული და რეკრისტალიზებული სპილენძის მიკროსტრუქტურა. $\times 200$

8.2.2. სპილენძის შენადნობების კლასიფიკაცია და ნიშანდება.

სპილენძის შენადნობების წარმოებისათვის ყველაზე გავრცელებულ მაღლეგირებელ ელემენტებს თუთია, ალუმინი, კალა, სილიციუმი, მანგანუმი, ბერილიუმი და ნიკელი მიეკუთვნება. თითოეული მათგანი ზრდის სპილენძის სიმტკიცის

მახასიათებლებს.

სპილენძის შენადნობებს სამ ძირითად ჯგუფად ყოფენ: თითბერად, ბრინჯაოდ და სპილენძნიკელის შენადნობებად.

თითბერში ძირითად მაღლეგირებელ ელემენტს თუთია წარმოადგენს. თითბერის მარკა აღინიშნება ასოთი Π და ციფრით, რომელიც მიუთითებს შენადნობში სპილენძის შემცველობას. მაგალითად, თითბერი $\Pi 80$ შეიცავს 80% სპილენძს და 20% თუთიას. ასეთ შენადნობებს უბრალო თითბერს უწოდებენ.

თუ შენადნობი ლეგირებულია სხვა ელემენტებითაც, მას სპეციალურ თითბერს მიაკუთვნებენ. სპეციალური თითბერის მარკის აღნიშვნაში მითითებულია გამოყენებული მაღლეგირებელი ელემენტების აღმნიშვნელი სიმბოლოები: C – ტყვია, O – კალა, $Ж$ – რკინა, A – ალუმინი, K – სილიციუმი, Mn – მანგანუმი, H – ნიკელი. მარკის ბოლოში იწერება რიცხვები, რომლებიც მიუთითებს სპილენძისა და მაღლეგირებელი ელემენტების საშუალო შემცველობას (თუთიის გამოკლებით). მაგალითად, $\Pi AЖMn66-6-3-2$ თითბერი 66%Cu, 6%Al, 3%Fe, 2%Mn შეიცავს დანარჩენი, 23% – Zn. თუ თითბერი გამოიყენება ფასონური სხმულის წარმოებისათვის, მარკის ბოლოში უმატებენ Π ასოს. მაგალითად, $\Pi AЖ60-1-1\Pi$.

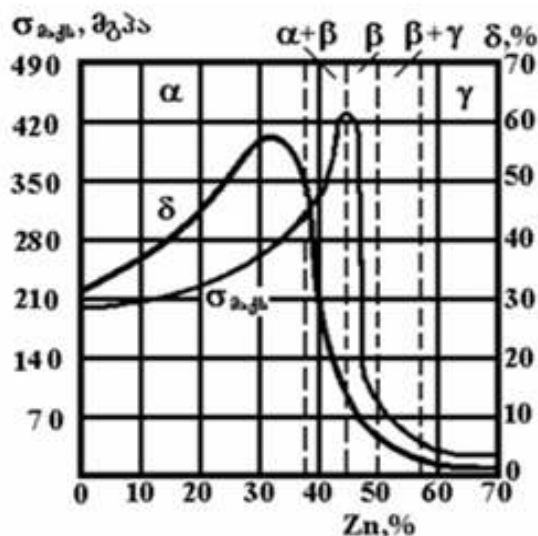
კლასიკურ ბრინჯაოს მიეკუთვნება სპილენძის შენადნობი კალასთან. მოგვიანებით შემუშავებულია სპილენძის შენადნობი ალუმინთან, სილიციუმთან, ბერილიუმთან და სხვა ელემენტებთან, რომლებსაც ასევე ბრინჯაოს უწოდებენ.

ძირითადი მალეგირებელი ელემენტების მიხედვით ბრინჯაოს ყოფენ კალიან, ალუმინიან, ბერილიუმიან და ა.შ. ბრინჯაოებად. ბრინჯაოში მალეგირებელი ელემენტების აღნიშვნისათვის დამატებით შემდეგი სიმბოლოებია შემოღებული: Φ – ფოსფორი, B – ბერილიუმი, X – ქრომი.

ბრინჯაოს მარკირება ხდება Bp ასოებით; შემდეგ იწერება მალეგირებელი ელემენტების აღმნიშვნელი სიმბოლოები და რიცხვები, რომლებიც მათ საშუალო პროცენტულ შემცველობას მიუთითებს. მაგალითად, $BpA\Phi M\mu 10-3-1,5$ ბრინჯაო 10%Al, 3%Fe, 1,5%Mn, შეიცავს დანარჩენი სპილენძია.

8.2.3. თითბერი

ტექნიკაში გამოყენებული თითბერისტრუქტურის მიხედვით ორ ჯგუფად იყოფა: ერთფაზა ე. წ. α შენადნობებად და ორფაზა, $\alpha+\beta$ შენადნობებად. თითბრის სტრუქტურა და მექანიკური თვისებები თუთიის შემცველობაზეა დამოკიდებული (სურ.8.4). პრაქტიკული გამოყენება პოვაშენადნობებმა თუთიის 45%-მდე შემცველობით.

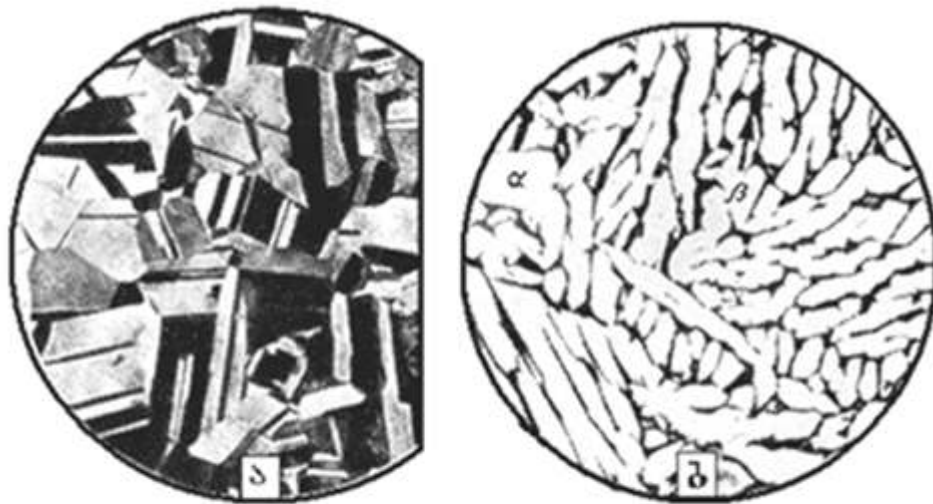


სურ. 8.4. Cu-Zn სისტემის შენადნობების ზოგიერთი მექანიკური თვისება

ათითბერი საკმაოდ პლასტიკური მასალაა, გამოირჩევა მაღალი ტექნოლოგიურობით და ადვილად ექვემდებარება ცივად და ცხლად წნევით დამუშავებას. 300–700°C ტემპერატურულ ინტერვალში, როგორც სპილენძში, შეინიშნება პლასტიკურობის ჩავარდნა. ამიტომ, წნევით დამუშავების დროს ამ ტემპერატურულ ინტერვალს უნდა მოვერიდოთ. თითბრის მიკროსტრუქტურა დეფორმაციისა

და მოწვის შემდეგ პოლიედრულია და შეიცავს გაორებული უბნების დიდ რაოდენობას (სურ. 8.5, ა).

Л96, Л90, Л85, Л80 ერთფაზა თითბერს მიეკუთვნება. მათ ტომპაკები ეწოდება. ორ-ფაზა $\alpha + \beta$ სამრეწველო თითბერი სპეციალურ შენადნობებს მიეკუთვნება, ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით, მაგრამ უფრო მყიფეა და მათგან ნაკეთობათა დამზადება ჩამოსხმით ხდება. ორფაზა თითბრის მიკროსტრუქტურა წარმოდგენილია α ფაზის ღია და β ფაზის მუქი კრისტალებით, რომლებიც უპირატესად α ფაზის საზღვრებშია განლაგებული (ნახ. 8.5, ბ). ორფაზა თითბერს მიეკუთვნება: ЛА77-2; ЛО70-1; ЛС59-1; ЛМЦ-58-2; ЛАЖ60-1-1.



სურ. 8.5. თითბრის მიკროსტრუქტურა.
ა- α თითბერი, $\times 75$; ბ- $(\alpha + \beta)$ თითბერი, $\times 150$

8.2.4. ბრინჯაო

კლასიკურ ბრინჯაოს კალიანი ბრინჯაო მიეკუთვნება. კალის მაქსიმალური ხსნადობის ზღვარი სპილენძში 16% შეადგენს. ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად ხსნადობის ზღვარიც მცირდება.

სხმულ მდგომარეობაში ერთფაზა ($\text{Sn} \leq 6\%$) ბრინჯაოს სტრუქტურა შედგება არაერთგვაროვანი α მყარი ხსნარისაგან, რომელიც დენდრიტული აგებულებით ხასიათდება (სურ. 8.6, ა).

კალიან ბრინჯაოში განსაკუთრებით ვითარდება ლიკვაციური პროცესები, ამიტომ კალის შედარებით მცირე რაოდენობით შემცველობის შემთხვევაში წარმოიქმნება მიკრომექანიკური ნარევი. 6%-ზე მეტი რაოდენობით კალის შემცველობისას



სურ. 8.6. ბრინჯაოს მიკროსტრუქტურა სხმულ მდგომარეობაში
(ა- 5% Sn, x 300; ბ- 10% Sn, x1000) და დეფორმაციისა და
სარეკრისტალიზაციო მოწვის შემდეგ (გ- 5% Sn, x200)

არაერთგვაროვანმყარ ხსნართან ერთად გვხვდება ევტექტოიდი ($\alpha+\delta$) (სურ.8.6, ბ).

სტრუქტურაში მყოფე ღვთის არსებობა გამორიცხავს ამ შედგენილობის შენადნობის წნევით დამუშავებას, ამასთან სალი ევტექტოიდის ჩანართები უზრუნველყოფს ბრინჯაოს მაღალ ცვეთამედევობას.

დეფორმაციისა და სარეკრისტალიზაციო მოწვის შემდეგ სტრუქტურა პოლიედრულ აგებულებაში გადადის α მყარი ხსნარისათვის დამახასიათებელი გაორებული უბნებით (სურ. 8.6, გ).

სასურველი თვისებების მისაღებად კალიან ბრინჯაოში დამატებით შეჰყავთ სხვადასხვა ელემენტი, როგორიცაა: ნიკელი, ალუმინი, თუთია და ფოსფორი.

არჩევენ სამსხმელო და დეფორმირებად ბრინჯაოებს.

დანიშნულების მიხედვით სამსხმელო კალიანი ბრინჯაო რამდენიმე ჯგუფად იყოფა. პირველში გაერთიანებულია ისეთი სტანდარტული სამსხმელო შენადნობები, როგორიცაა: БрОЦН3-7-5-1, БрОЦ3-12-5, БрОЦ5-5-5.მათგან ამზადებენ მანქანათა ნაწილებს.

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება საპასუხისმგებლო დანიშნულების სამსხმელოარა-სტანდარტულიბრინჯაო: БрО19, БрОФ 10-1, БрОС16-5 და ა.შ. ისინი ხასიათდება მაღალი ანტიფრიქციული თვისებებით და კარგი ცვეთამედევობით. მათგან მზადდება სრიალის საკისრები და ხახუნის პირობებში მომუშავე სხვა დეტალები.

მესამე ჯგუფის შენადნობები (БХ1, БХ2, БХ3) გამოირჩევა კარგი თხელდენადლობით, უმნიშვნელო ჩაჯდომით და კარგად ავსებს ყალიბის ყველაზე რთულ უბნებს. ისინიმხატვრული სხმულების წარმოებაში გამოიყენება.

დეფორმირებად შენადნობებს მიეკუთვნება: BrOIC 4-4-2,5 ; BrOF 6,5-0,4 და სხვა.

ბრინჯაოს თერმული დამუშავების ძირითადი სახეა ჰომოგენიზაცია და შუალედური მოწვა. ჰომოგენიზაციას აწარმოებენ $700-750^{\circ}\text{C}$ -ზე შემდგომი სწრაფი გაცივებით. ნარჩენი ძაბვების მოსახსნელად საკმარისია სხმულის გახურება 550°C -ზე 1 საათის განმავლობაში, ხოლო შუალედური მოწვა ცივად წნევით დამუშავების დროს $550-700^{\circ}\text{C}$ -ზე ტარდება.

ალუმინიან ბრინჯაოს გამოყენების თვალსაზრისით, მრეწველობაში დიდი ადგილი უკავია. იგი შეიცავს 11%-მდე ალუმინს.

ერთფაზა, α სტრუქტურის მქონე შენადნობები წნევით კარგად მუშავდება როგორც დაბალ, ისე მაღალ ტემპერატურაზე, მაგრამ მათი სიმტკიცე არ არის საკმარისი. სუფთა ალუმინიანი ბრინჯაო პრაქტიკულად 5–7% ალუმინს შეიცავს (BrA5 , BrA7). იგი წარმატებით ცვლის კალიან ბრინჯაოს. რკინითა და მანგანუმით დამატებითი ლეგირების შემთხვევაში იზრდება ალუმინიანი ბრინჯაოს ანტიფრიქციული თვისებები, ხოლო ნიკელი აუმჯობესებს სიმტკიცის მახასიათებლებს და კოროზიულ მდგომარეობას.

BrAMu10-2 ; BrAJH11-6-6 ; BrAJC7-1,5-1,5 და კიდევ ზოგიერთი სხვა ბრინჯაო გამოიყენება მხოლოდ სხმულის წარმოებაში, ხოლო BrA5 და BrA7 , როგორც დეფორმირებადი შენადნობები. ბრინჯაოს დიდი ჯგუფი კი (BrAMu9-2 ; BrAJ9-4 ; BrAJMu10-3-1,5 ; BrAJH10-4-4) გამოიყენება როგორც ერთი, ისე მეორე დანიშნულებით.

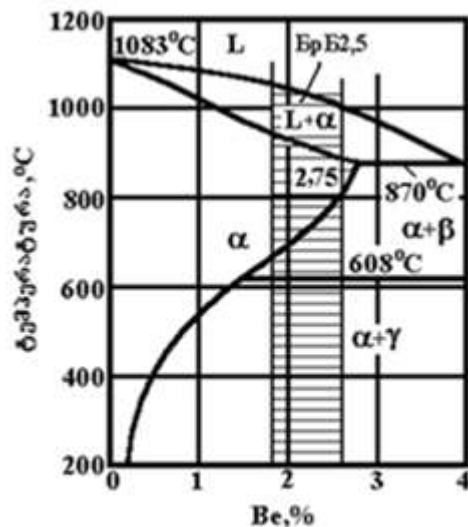
BrAJH 10-4-4 ბრინჯაო განიცდის დისპერსიულ განმტკიცებას. წრთობისა და დაძველების შემდეგ მისი სისაღე 400HB (150HB -ს ნაცვლად) შეადგენს და მაღალ მექანიკურ მახასიათებლებს ინარჩუნებს $400-500^{\circ}\text{C}$ -ზე.

ალუმინიანმა ბრინჯაომ ყველაზე ფართო გამოყენება გემთმშენებლობაში, ავტო და ავიამშენებლობაში პოვა.

მრეწველობისათვის განსაკუთრებით საყურადღებოა ბერილიუმიანი ბრინჯაო, რომელიც 2%-მდე ბერილიუმს შეიცავს. იგი ხასიათდება მაღალი სიმტკიცისა და დრეკადობის, ელექტრო და თბოგამტარობის, დაღლილობისადმი წინააღობისა და კოროზიული მდგომარეობის საუკეთესო შესაძლებლობით. გამოირჩევა კარგი შედუღებადობით და ჭრით დამუშავებადობით. აქედან გამომდინარე, ბერილიუმიანი ბრინჯაო მეტად

ძვირფასი მასალაა საპასუხისმგებლო ზამბარების, მემბრანებისა და ზუსტი ხელსაწყოთმშენებლობის მზამბარავი ელექტროკონტაქტებისა და სხვა ელემენტების დასამზადებლად.

ბერილიუმი სპილენძში განსაზღვრული რიგის მყარ სნარებს წარმოქმნის. ტემპერატურის შემცირებისას ხსნადობის ზღვარი 2,7-დან 0,16%-მდე (სურ. 8.7) მცირდება. ამდენად, შენადნობი ექვემდებარება თერმულ განმტკიცებას.



სურ. 8.7. Cu-Be შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამა

ნაწოთობ მდგომარეობაში ბერილიუმიანი ბრინჯაო გამოირჩევა მაღალი პლასტიკურობითა და ტექნოლოგიურობით, რაც ცივად წნეგით დამუშავების შესაძლებლობას იძლევა. განმტკიცების საუკეთესო ეფექტი მიიღწევა 780°C-დან წოთობისა და 320–340°C-ზე 2–5 საათის განმავლობაში დაძველების გზით. ახლად ნაწოთობ მდგომარეობაში $\sigma_{0.2} = 540$ მგპა, $\delta = 25\%$, HB120. დაძველების შემდეგ კი იგივე მახასიათებლები ღებულობს მნიშვნელობებს: $\sigma_{0.2} = 1000-1200$ მგპა, $\delta = 2-3\%$, HB400.

პრაქტიკულად გამოიყენება შენადნობი სილიციუმის 2–5% შემცველობით, რომელიც დამატებით ლეგირებულია ნიკელითა და მანგანუმით. ეს დანამატები აუმაჯობებს სილიციუმიანი ბრინჯაოს მექანიკურ თვისებებსა და კოროზიამდევობას. სამრეწველო ბრინჯაოებს მიეკუთვნება: БрКН3-1, БрКН1-3 და БрКН0,5-2. უკანასკნელი ორი ექვემდებარება თერმულ განმტკიცებას.

სილიციუმიანი ბრინჯაო გამოირჩევა მზამბარავი და ანტიფრიქციული თვისებებით, აგრეთვე კარგი კოროზიამდევობით. ადვილად მუშავდება წნეგით ცხელ და ცივ მდგომარეობაში, დუღდება ბრინჯაოსა და ფოლადთან, ადვილად ირჩილება სალი სარჩილით, გამოირჩევა კარგი თხელდენადობით.

ტყვიანი ბრინჯაო კარგი ანტიფრიქციული მასალაა. მან ფართო გამოყენება პოვა ისეთი მძიმედდატვირთული, საპასუხისმგებლო სრიალა საკისრების დამზადებაში, რომლებიც საკმაოდ მაღალი ხვედრითი წნევისა (2500-3000 მგპა) და გაზრდილი წრიული სიჩქარეების (8-10 მ/წმ) პირობებში მუშაობს. ასეთებია: საყრდენი და ბარბაცა საკისრები მძლავრ ტურბინებში, საავიაციო ძრავებში, დიზელში და

სხვა სწრაფმავალ მანქანებში. ტყვიანი ბრინჯაო კარგი თბოგამტარი მასალაა, რაც ექსპლუატაციის პროცესში საკისრის ტემპერატურის 300–320⁰C-მდე გაზრდის შესაძლებლობას იძლევა.

სასაკისრე შენადნობებს მიეკუთვნება: БрС30 (სასაკისრე), БрОС5-25 (საკისარი, მიღისი, ზეთსამჭიდროებელი რგოლები), БрОС8-12 (მაღალი ხვედრითი წნევის საკისარი), БрСН60-2,5 (საკისარი, ფასონური სხმული).

თავი IX

ბანსაკუთრებული ფიზიკური თვისებების მასალები

9.1. ბანსაკუთრებული ელექტრული თვისებების მასალები

ტექნიკაში გამოყენებული მასალები ელექტრული თვისებების მიხედვით სამ ჯგუფად იყოფა: ელექტროგამტარ, ნახევარგამტარ და დიელექტრიკულ მასალებად. ისინი ერთმანეთისგან განსხვავდება ელექტროწინააღობით, ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით, მისი ცვლილების ხასიათით და გამტარობის ტიპით.

გამტარების ხვედრითი ელექტროწინააღობა იცვლება 10^{-8} – 10^{-5} ომი·მ ზღვრებში. ტემპერატურის გაზრდით მათი ელექტროწინააღობა იზრდება. გამოყენების სფეროა მუდმივი და ცვლადი დენის გამტარების, რეზისტორების, მახურებელი ელემენტების, კონტაქტებისა და სხვა ანალოგიური ელემენტების წარმოება.

ნახევარგამტარების ხვედრითი ელექტროწინააღობა 10^{-5} – 10^8 ომი·მ. ზღვრებში იცვლება ტემპერატურის გაზრდით ელექტრული წინააღობა მცირდება. გამოიყენება ელექტრული სიგნალების გამმართველად და გამაძლიერებლად, სხვადასხვა სახის ენერგიის ელექტროენერგიად გარდაქმნელებში და ა.შ.

დიელექტრიკული მასალის ხვედრითი ელექტრული წინააღობა 10^8 -დან 10^{16} ომი·მ დიაპაზონში იცვლება. დიელექტრიკი ელექტროიზოლატორად გამოიყენება.

9.1.1 მაღალი ელექტროგამტარობის მასალები

ლითონურ ელექტროგამტარებს დამატებით მოეთხოვებაკარგი პლასტიკურობა, კოროზიამდევობა და, ზოგ შემთხვევაში, ცვეთამდევობა. გარდაამისა, ხასიათდება რჩილვისა და შედუღებისკარგი უნარით, რათა შეერთების ზონამ კარგ საიმედოობასთან ერთად მაღალი ელექტროგამტარობაც უზრუნველყოს.

აღნიშნულ თვისებებს ყველაზე მეტად აკმაყოფილებს წახნაგდაცენტრებული კუბური გისოსის მქონე ლითონები მომწვარ მდგომარეობაში. დეფორმაცია და ნარჩენი ძაბვები, რომლებიც ტექნოლოგიური დამუშავების დროს წარმოიქმნება, იწვევს კრისტალური გისოსის დამახინჯებას და ყველანაირი დეფექტის კონცენტრაციის გაზრდას, რაც ელექტროგამტარობის შემცირებას განაპირობებს.

ელექტროგამტარებად გამოიყენება ქიმიურად სუფთა სპილენძი, ალუმინი და რკინა.

აღნიშნული ლითონებიდან ყველაზე კარგი ელექტროგამტარობით უჯანგბადო MOON სპილენძი ხასიათდება. გამოიყენება აგრეთვე MO და M1 მარკის სპილენძი. მათგან მზადდება სხვადასხვა დიამეტრის მავთული, სალტე, ზოლი და ძელაკი. M1 მარკის ნაგლინი მომხმარებელს მიეწოდება როგორც მომწვარ, ისე მოპირსაღებულ მდგომარეობაში. მომწვარი სპილენძი მაღალი ელექტროგამტარობით ხასიათდება, ხოლო მოპირსაღებული – მაღალი სიმტკიცით. მომწვარ სპილენძს იყენებენ საგ-რაგნილე მავთულის და საკაბელო ნაკეთობის, ხოლო მოპირსაღებულს – კიდული დენგამტარების და კოლექტორის ფირფიტების დასამზადებლად.

ისეთი დენგამტარი კონსტრუქციებისათვის, რომელსაც 400 მკპა-ზე მეტი სიმტკიცე მოეთხოვება, თითბერი და კადმიუმიანი ან ბერილიუმიანი ბრინჯაო გამოიყენება. ამ მასალების ელექტროგამტარობა მცირეა სპილენძთან შედარებით. კადმიუმიანი ბრინჯაოსაგან ამზადებენ კოლექტორის ფირფიტებს, ხოლო ბერილიუმიანი ბრინჯაოსაგან – დენგამტარ ზამბარებს, სრიალა კონტაქტებს, ფეხით ჩამრთველებს. თითბერი ისეთი დენგამტარი დეტალების დასამზადებლად გამოიყენება, რომელთა წარმოება მასალისაგან მაღალ პლასტიკურ მახასიათებლებს მოითხოვს.

ვერცხლი და ოქრო კეთილშობილი ლითონებია. ჰაერზე ისინი არ იუანგება, ამიტომ, მიუხედავად სიძვირისა, შეუცვლელ მასალას წარმოადგენს უჯანგავი კონტაქტებისათვის. გამოიყენება ხელსაწყოებში წვრილი გამტარებისა და მიკროელექტრონული სქემების დასამზადებლად.

ალუმინის ელექტროგამტარობა სპილენძის ელექტროგამტარობის 2/3-ს შეადგენს, ხოლო სიმტკიცე სამჯერ უფრო დაბალია. თანაბარი გამტარობის შემთხვევაში, სპილენძთან შედარებით, ალუმინის მავთულის დიამეტრი 22%-ით მეტია, მაგრამ მცირე კუთრი წონის გამო – 2-ჯერ უფრო მსუბუქი.

ალუმინის მავთულმა თითქმის მთლიანად გამოდევნა სპილენძი ელექტროკავშირის საჰაერო ხაზებიდან და ძალოვანი კაბელებიდან.

ელექტროტექნიკური მიზნებისათვის გამოიყენება როგორც მაღალი სისუფთავის ალუმინი (AD04), რომელშიც მინარევების საერთო რაოდენობა 0,02% შეადგენს, ისე ტექნიკური სისუფთავის ალუმინი AD000, AD00 AD0, სადაც მინარევების საერ-

თო რაოდენობა, შესაბამისად, 0,2%, 0,3% და 0,5% შეადგენს. მაღალი სისუფთავის ალუმინი ხასიათდება კარგი პლასტიკურობით, ამიტომ მისგან ამზადებენ 6–7 მიკრონის სისქის კილიტას კონდენსატორებისათვის. ტექნიკურად სუფთა ალუმინი გამოიყენება მავთულის სახით კაბელებსა და დენგადამტან მავთულებში.

საჰაერო ელექტროგადამცემ ხაზებში, სადაც საყრდენებს შორის მანძილი დიდია, დენგადამტანებად იყენებენ მაგნიუმისა და სილიციუმის შემცველ ალუმინის შენადნობს, რომელიც უფრო გაზრდილი სიმტკიცით ხასიათდება სუფთა ალუმინთან შედარებით. აღნიშნული ელემენტებით მცირედ ლეგირების შემთხვევაში (1%-ზე ნაკლები თითოეული) რამდენადმე უარესდება ელექტროგამტარობა, მაგრამ იზრდება სიმტკიცე და პრაქტიკულად არ უარესდება კოროზიამდევობა და პლასტიკურობა.

რკინა მნიშვნელოვნად ჩამოუვარდება სპილენძსა და ალუმინს ელექტროგამტარობის თვალსაზრისით, მაგრამ მაღალი სიმტკიცე, ზოგიერთ შემთხვევაში, ამართლებს მის გამოყენებას აღნიშნული დანიშნულებით. ასეთ შემთხვევაში ნახშირბადმცირე ხარისხოვანი (0,8, 10) და ჩვეულებრივი ხარისხის (Cm3, Cm4, Cm5) ფოლადები გამოიყენება. მისგან ამზადებენ: სალტეს, ტრამვაის, მეტროს და რკინიგზის რელსებს, მცირე სიმძლავრის საჰაერო დენგადამტანებს. მავთულის დიამეტრი განისაზღვრება არა ელექტროგამტარობის, არამედ მასალის სიმტკიცის მახასიათებლების მიხედვით.

ბიმეტალურ გამტარებს (ფოლადის მავთული, რომლის ზედაპირი დაფარულია სპილენძით) იყენებენ მაღალი სიხშირის დენის გადასაცემად. ასეთი კონსტრუქცია ამცირებს როგორც ელექტროდანაკარგებს, რაც რკინის ფერომაგნეტიზმთან არის დაკავშირებული, ისე დეფიციტური სპილენძის ხარჯს. ელექტროგამტარობას სპილენძის დანაფარი განაპირობებს, ხოლო ფოლადის გული მექანიკურ დატვირთვას ღებულობს.

9.1.2. სარჩილი

სარჩილი, რომელიც გამოიყენება მაღალი გამტარობის მასალების რჩილვით შეერთებისათვის, უნდა ხასიათდებოდეს: უმნიშვნელო გარდამავალი (კონტაქტის) წინააღობით, დაბალი დნობის ტემპერატურით, შესაერთებელ ლითონებთან შედარებით, კარგი დასველების უნარით, მაღალი სიმტკიცითა და პლასტიკურობით. სარჩილის თბური გაფართოების კოეფიციენტი ახლოს უნდა იყოს ძირითადი ლი-

თონების თბური გაფართოების კოეფიციენტთან. შესაერთებელ მასალებთან არ უნდა წარმოქმნას კოროზიული წყვილი. ამ მიზნით გამოიყენება Sn, Pb, Zn და Ag ფუძეზე დამზადებული შენადნობები.

არჩევენ დაბალტემპერატურულ ანუ რბილ და მაღალტემპერატურულ ანუ მტკიცე სარჩილ მასალებს.

ხელსაწყოთმშენებლობაში დაბალტემპერატურულ სარჩილად გამოიყენება კალა-ტყვიისა და კალა-თუთიის სისტემის შენადნობები. Sn-Pb სისტემის ევტექტიკური ანუ ადვილდნობადი შენადნობი შეიცავს 61% Sn და 39% Pb (ПОС-61). მისი დნობის ტემპერატურაა 183°C. სარჩილი ხასიათდება კარგი თხელდენადობით, რაც ხელს უწყობს ხარისხოვანი და მაღალი მექანიკური თვისებების მქონე ნაკერის ჩამოყალიბებას. ამავე მიზნით გამოიყენება აგრეთვე როგორც ქვეევტექტიკური (ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50), ისე ზევევტექტიკური (ПОС-90) შენადნობები. ციფრი მარკაში მიუთითებს კალის შემცველობას. ასეთი ტიპის სარჩილის გარდამავალი ელექტრული წინაღობა 0,14–0,21 მკომი-მ შეადგენს და გამოიყენება სპილენძისა და მისი შენადნობების მეტად წვრილი მავთულების მისარჩილად და ისეთ შემთხვევაში, როდესაც დაუშვებელია რჩილვის ზონის მაღალ ტემპერატურამდე გახურება.

ალუმინისა და მისი შენადნობების რჩილვისათვის სარგებლობენ კალა-თუთიის სისტემის შენადნობებით. ამ მხრივ საუკეთესოა ევტექტიკური შედგენილობის შენადნობი ПОЦ-90, რომლის დნობის ტემპერატურა 199°C შეადგენს. გამოყენებას პოულობს აგრეთვე შენადნობები: ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40.

იმ შემთხვევაში, თუ მისარჩილი ბოლოების გახურება დაუშვებელია მაღალ ტემპერატურამდე (<100°C), სარგებლობენ ბისმუტის შენადნობით ტყვიასთან, კალასთან, კადმიუმთან და ვერცხლთან. თუმცა ასეთი სარჩილი ვერ უზრუნველყოფს მტკიცე შეერთებას. შენადნობები ბისმუტთან გაზრდილი სიმყიფით ხასიათდება.

მაღალტემპერატურული სარჩილით სარგებლობისას მიმდინარეობს დიფუზია ძირითადი ლითონისა და სარჩილის ელემენტებს შორის, რაც უზრუნველყოფს უფრო მტკიცე და საიმედო შეერთებას. ამ დანიშნულებით გამოიყენება სპილენძი, სპილენძოთუთიანი, სპილენძოვსფორიანი და ვერცხლის შემცველი სარჩილები.

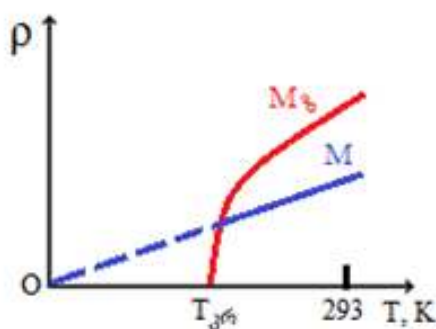
სპილენძოთუთიანი სარჩილი ПМЦ-36, ПМЦ-48 და ПМЦ-54 (ციფრი მიუთითებს სპილენძის შემცველობას) ხასიათდება 0,03–0,04 მკომი-მ გარდამავალი წინაღობით. დნობის ტემპერატურა სპილენძის შემცველობის გაზრდასთან ერთად იზრდება 825-

დან 880°C-მდე. ПМФ-7 სპილენძოფოსფორიანი სარჩილით (ციფრი აღნიშნავს ფოსფორის შემცველობას) შესაძლებელია რჩილვა წიდის გარეშე განხორციელდეს, რაც ტექნოლოგიურ პროცესს ამარტივებს.

ვერცხლის შემცველი სარჩილი მეტად ტექნოლოგიურია, რადგან კარგად ასველებს მისარჩილ ზედაპირებს და კარგი ხსნადობის უნარით ხასიათდება. იგი გამოსადგვია ნებისმიერი ლითონისა და შენადნობის რჩილვისათვის; უზრუნველყოფს მაღალი მექანიკური თვისებების მქონე ნარჩილი ზონის ფორმირებას და დაბალ გარდამავალ წინაღობას. მაგალითად, ПСр-72, ПСр-61, ПСр45 და ПСр-10 სარჩილებში გარდამავალი წინაღობა, შესაბამისად, იზრდება 0,022-დან 0,065 მკომი-მ ზღვრებში. დნობის ტემპერატურა 779-დან 920°C-მდე იცვლება.

9.1.3. ზეგამტარები

მაღალი ელექტროგამტარობის მასალების განსაკუთრებულ ჯგუფს ზეგამტარები მიეკუთვნება. ტემპერატურის შემცირებით ყველა ლითონის ელექტრული წინაღობა მდოვრედ ეცემა (სურ. 9.1). ზოგიერთ ლითონსა და შენადნობებში კი რაღაც $T_{კრ}$ ტემპერატურის მიღწევისას მკვეთრად ეცემა ნულამდე – მასალა იქნეს ზეგამტარობის თვისებას. ზეგამტარობა აღმოჩენილია 30-მდე ელემენტსა და 1000-მდე შენადნობში. მათ შორის ტანტალში (ზეგამტარობაში გადასვლის კრიტიკული ტემპერატურა $T_{კრ}=4,13K$), ინდიუმში ($T_{კრ}=3,37K$), თეთრ კალაში ($T_{კრ}=3,69K$), ალუმინში ($T_{კრ}=1,14K$), ნიობიუმში ($T_{კრ}=9,17K$).



სურ. 9.1 ელექტრული წინაღობის ცვლილების ხასიათი ლითონებში (M) და ზეგამტარებში (Mზ) დაბალ ტემპერატურულ არეებში

როგორც წარმოდგენილი მონაცემებიდან გამომდინარეობს, ზესუფთა (0,0001%) ნიობიუმში ყველაზე კარგი ზეგამტარი მასალაა. პრაქტიკული გამოყენება პოვა 65BT(22,0-26,0%Ti, 63,0-68%Nb და 8,5-11,5%Zr) და 35BT(60-64Ti, 33,5-36,5%Nb, 1,7-4,3%Zr) ზეგამტარმა შენადნობებმა ნიობიუმის გაზრდილი შემცველობით. შენადნობები გა-

მოიყენება მძლავრი გენერატორების, დიდი სიმძლავრის მაგნიტების (მაგალითად, მაგნიტურ ბალიშებზე მოძრავი მატარებლის) და ხვრელური დიოდის გრაგნილების დასამზადებლად.

ზეგამტარული მდგომარეობა ინგრევა არა მარტო გახურების შედეგად, არამედ ძლიერი მაგნიტური ველის ზემოქმედებით და დიდი ძალის დენის გატარებითაც (ველისა და დენის კრიტიკული მნიშვნელობები).

9.1.4. საკონტაქტო მასალები

მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე, ელექტრული კონტაქტები იყოფა გამოთიშავ, სრიალა და უძრავ კონტაქტებად. ყველა სახის საკონტაქტო მასალის ძირითადი მოთხოვნაა დაბალი გარდამავალი ელექტრული წინაღობა.

გამთიში კონტაქტები გამოიყენება ელექტრული წრედის პერიოდული ჩართვა-გამორთვისათვის და მუშაობს შედარებით მძიმე პირობებში. ექსპლუატაციის დროსმათში ნაპერწკალი ან ელექტრული რკალი წარმოიქმნება, რაც კოროზიას ან ელექტრულ ეროზიას იწვევს. შედეგად კონტაქტები იუანგება, იზრდება გარდამავალი ელექტრული წინაღობა, ხურდება და ხდება მათი მიღუდება ან შეწყობება.

ელექტროეროზიული ცვეთა ერთ-ერთ საკონტაქტო ზედაპირზე კრატერის, ხოლო მეორეზე – შვერილის გაჩენას იწვევს. ეს იმით აიხსნება, რომ საკონტაქტო მასალა დნება, ორთქლდება, გაიფრქვევა მუშა ზედაპირზე და ერთი კონტაქტიდან მეორეზე გადადის. ელექტროეროზიისადმი წინააღმდეგობა იზრდება მასალის დნობის ტემპერატურის, სისაღისა და სიმტკიცის მახასიათებლების გაზრდასთან ერთად.

ელექტრულ სიმძლავრეზე დამოკიდებულებით არჩევენ სუსტად დატვირთულ და ძლიერად დატვირთულ გამთიშ კონტაქტებს.

სუსტად დატვირთულ კონტაქტს ამზადებენ კეთილშობილი ლითონებისაგან – ოქროსგან, ვერცხლისგან, პლატინისგან, პალადიუმისა და მისი შენადნობებისაგან. ახასიათებს დაბალი მედეგობა ეროზიის მიმართ, დაბალი გარდამავალი წინაღობა და მაღალი კოროზიამდეგობა.

ფართოდ გამოიყენება აგრეთვე სპილენძის შენადნობი ვერცხლთან. ასეთი შენადნობი ინარჩუნებს მაღალ ელექტროგამტარობას და ხასიათდება უფრო მაღალი სისაღით და წინააღობით ელექტრული ცვეთისადმი, თუმცა სპილენძის დანამატები ამცირებს უანგვისადმი მდგრადობას.

მძიმედ დატვირთულ კონტაქტს ამზადებენ ვოლფრამის, მოლიბდენისა და მათი შენადნობებისაგან. ვოლფრამი, მაღალი დნობის ტემპერატურის გამო, ხასიათდება კარგი წინაღობით ელექტროეროზიული ცვეთისადმი. ჟანგვისადმი მიდრეკილების მიუხედავად, ვოლფრამი ხასიათდება მცირე და მდგრადი გარდამავალი წინაღობით, ხოლო დაჟანგვის შედეგად წარმოქმნილი ფურჩი კონტაქტის მუშაობის პროცესში ირღვევა. ამიტომ შეიძლება მისი გამოყენება დიდი სიხშირით ჩართვა-გამორთვისა და მაღალი საკონტაქტო წნევების ელემენტებში.

ამავე მიზნით იყენებენ ვოლფრამ-მოლიბდენის შენადნობებს. 40–50% მოლიბდენის შემცველი შენადნობი მდგრადია კოროზიისადმი, მაგრამ მისი ელექტრული წინაღობა დიდია და ადვილად იჟანგება ჰაერზე. ამიტომ ამ შენადნობებს იყენებენ მძლავრ კონტაქტებში ინერტულ აირში ან ვაკუუმში მუშაობისას.

უფრო მძლავრ კონტაქტებში გამოიყენება ვოლფრამისა და ვერცხლის ან სპილენძის შეცხობილი კომბინაცია, ან შეცხობილი ვოლფრამი, რომელიც ვაკუუმში თხევადი სპილენძით ან ვერცხლით არის გაჟღენთილი.

პერსპექტიულია შინაგანი დაჟანგვის მეთოდით მიღებული ვერცხლისა და სპილენძის კომპოზიციური კონტაქტები. COM-10 შენადნობს (10% Cu) დაახლოებით 50 საათის განმავლობაში ჰაერზე ჟანგავენ 700°C ტემპერატურაზე. ვერცხლში ჟანგბადის მაღალი ხსნადობისა და დიფუზიის დიდი სიჩქარის გამო, ლითონში შეღწეული ჟანგბადი ჟანგავს ნაკლებად კეთილშობილ სპილენძს, რის შედეგადაც მიიღება კომპოზიციური მასალა – ვერცხლის ფუძეში თანაბრად განაწილებული სპილენძის ჟანგი. ეს ზრდის შედუღებადობისადმი წინააღმდეგობას და ამცირებს ეროზიას. ასეთ შენადნობებს იყენებენ ძლიერად დატვირთულ კონტაქტებში. შეიძლება მათი გამოყენება აგრეთვე სრიალა კონტაქტების დასამზადებლად.

სრიალაკონტაქტებს იგივე თვისებები წაეყენება, რაც გამოთიშს, მაგრამ ძირითადი მოთხოვნაა წინაღობა შედუღებისადმი. გარდა დაჟანგული ვერცხლისპილენძის შენადნობისა, სრიალა კონტაქტების დასამზადებლად გამოიყენება სპილენძის ან ვერცხლის ფხვნილზე დამზადებული MF_3 , MF_5 , CF_3 და CF_5 კომპოზიცია გრაფიტის მცირე დანამატებით, რომელიც აფერხებს კონტაქტების ერთმანეთთან მიდუღებას. ციფრი მარკაში მიუთითებს გრაფიტის შემცველობას პროცენტებში.

ამჟამად კოლექტორის სეგმენტებში უმთავრესად გამოიყენება ციფნაგლინი ელექტროლიტური სპილენძი ან კადმიუმიუნი ბრინჯაო, ხოლო ზუსტი მანქანების

მცირე კოლექტორებში – ვერცხლი. სრიალა კონტაქტებისათვის კარგ მასალას გრაფიტი წარმოადგენს, რადგან იგი პრაქტიკულად არ იჟანგება და ელექტრორკალსაც უფრო მაღალ ძაბვებზე წარმოქმნის ნებისმიერ ლითონთან შედარებით. ცვეთამედევობით გამოირჩევა გრაფიტლითონიანი კონტაქტებიც.

სამსხმელო წარმოება ელექტრული მანქანების სრიალა კონტაქტების (საღტეების) ოთხ ჯგუფს აწარმოებს:

ნახშირგრაფიტის	$T, YT;$
გრაფიტისას	$G;$
ელექტროგრაფიტიზებულს	$\Xi G;$
ლითონგრაფიტის	M, MG (სპილენძგრაფიტის), BF (ბრინჯაო- ანი), MFC (სპილენძგრაფიტითიანი).

ყველა ჯგუფის საღტე შეიძლება განსხვავდებოდეს შედგენილობით, სტრუქტურით, ხარისხითა და ზომებით.

უძრავისაკონტაქტო მასალა უნდა ხასიათდებოდეს დაბალი გარდამავალი წინააღობითა და სტაბილურობით მცირე საკონტაქტი ძალის პირობებში. ამიტომ, მომჭერი კონტაქტებისათვის გამოიყენება ისეთი კოროზიამედეგი მასალები, რომლებიც კონტაქტის ზედაპირზე არ წარმოქმნის მაღალი ელექტროწინააღობის ოქსიდურ ფირს. ასეთ პირობებს აკმაყოფილებს სპილენძი, თითბერი და თუთია. თუთიით ფარავნ რკინის ფუძეზე დამზადებული შენადნობის საკონტაქტო მომჭერებს.

9.2. მაღალი ელექტროწინააღობის შენადნოები

მაღალი ელექტროწინააღობის შენადნოები გამოიყენება წინააღობის პრეციზიული ელემენტების (პოტენციომეტრის ხვიების, შუნტის, წინააღობის კოჭების, რეზისტორების, თერმოწვილების, ტენზომეტრული მიმწოდების), ელექტრული ხელსაწყოების მახურებელი ელემენტებისა და ღუმელების დასამზადებლად. ძირითადი მოთხოვნა, რასაც ეს მასალები უნდა აკმაყოფილებდეს, მაღალ ხვედრით ელექტრულ წინააღობასთან ერთად, არის წინააღობის ცვლილების მცირე ტემპერატურული კოეფიციენტი და მხურვალმედევობა, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მახურებელი ელემენტებისათვის.

მაღალი ელექტრული წინაღობით ხასიათდება ლითონური შენადნობები მყარი ხსნარის სტრუქტურით. საექსპლუატაციო ტემპერატურის მიხედვით შენადნობები სამ ჯგუფად იყოფა:

1. შენადნობები, რომელთა მუშა ტემპერატურა 500°C არ აღემატება. მათ მიეკუთვნება ნიკელითა და მანგანუმით ლეგირებული სპილენძის შენადნობები. სპილენძი და ნიკელი განუსაზღვრელი რიგის მყარ ხსნარებს წარმოქმნის. ამ სისტემის შენადნობი 40–50% ნიკელს შეიცავს და ხასიათდება მაქსიმალური ელექტროწინააღობით, ხოლო ელექტროწინააღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი თითქმის ნულის ტოლია.

ამ ტიპის შენადნობებს მიეკუთვნება МНМц 3-12 (მანგანიანი), რომელიც 2,5–3,5%Ni და 11,5–13,5%Mn შეიცავს; МНМц 40-1,5 (კონსტანტანი), МНМц 43-0,5 (კოპელი). შენადნობებში დანარჩენი სპილენძია. მათგან კონსტანტანს ძირითადად თერმოწვევების დასამზადებლად იყენებენ.

ელექტრული წინააღობის კოეფიციენტის სტაბილური მნიშვნელობების უზრუნველსაყოფად მანგანიანის მავთულს უტარებენ სარეკრისტალიზაციო მოწვას ვაკუუმში 400°C -ზე, ხოლო წინააღობის ელემენტებს დამზადების შემდეგ განმეორებით ახურებენ 250°C -მდე ნარჩენი ძაბვების მოსახსნელად.

2. შენადნობები, რომელთა მუშა ტემპერატურა 1200°C -ზე ნაკლებია. ისინი ასევე გამოიყენება წინააღობისა და მახურებელი ელემენტების დასამზადებლად. შენადნობები რკინისა და ნიკელის ფუძეზე მზადდება. ქრომით და ალუმინით დამატებითი ლეგირება უზრუნველყოფს მათ მაღალ ელექტროწინააღობას და მხურვალ-მედევობას. ამ ჯგუფის შენადნობებს მიეკუთვნება: ფექრალი X13Ю4, ნიქრომი X20H80 და X15H60, შენადნობი 1 – X17Ю5 და შენადნობი 2 – X25Ю5. მათი მუშა ტემპერატურული ჯერი 1000 – 1150°C აღწევს. გამოიყენება რეოსტატების, მძლავრი ელექტრომახურებელი დანადგარების და სამრეწველო ღუმლების დასამზადებლად.

3. 1200°C -ზე მაღალ ტემპერატურულ პირობებში (ვაკუუმში) ექსპლუატაციისათვის შენადნობებს ძნელდნობადი ლითონების – W, Mo და Ta-ის ფუძეზე ამზადებენ. 1500°C -მდე მომუშავე ღუმლებში გამოიყენება კერამიკული მასალებიც, მაგალითად, სილიცის ღეროები, რომელსაც სილიციუმის კარბიდის შეცხოვრებით ღებულობენ. მუშაობის ტემპერატურული ჯერი 1500°C -ს შეადგენს. სილიცი ნახევარგამ-

ტარია და მაღალი კუთრი ელექტრული წინააღობით (0,1–10 ომი·მ) ხასიათდება. გავრცელებულია აგრეთვე მოლიბდენის დიოქსიდის (MoSi_2) მახურებელი.

9.3. ნახევარგამტარები

ნახევარგამტარებს ელექტრული თვისებების მიხედვით გარდამავალი მდგომარეობა უკავია ლითონებსა და იზოლატორებს შორის. მათი ელექტრული წინააღობა 10^{-5} – 10^8 ომი·მ ზღვრებში იცვლება. ნახევარგამტარებს 12 ელემენტი მიეკუთვნება (ბორი, ნახშირბადი (აღმასი), სილიციუმი, გერმანიუმი, კალა, ფოსფორი, დარიშხანი, სტიბიუმი, გოგირდი, სელენი, ტელური და იოდი, რომლებსაც უბრალო ნახევარგამტარებს უწოდებენ) და მენდელეევის პერიოდული სისტემის სხვადასხვა ჯგუფის მრავალი ელემენტის ქიმიური ნაერთი.

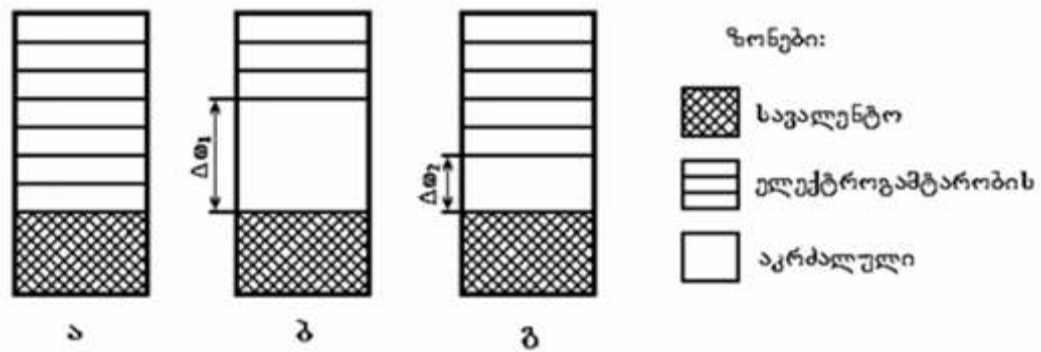
ნახევარგამტარები გამოიყენება გამმართველ ელემენტებად, მაღალი თ.ე.მ. ძალის გენერატორებისთვის, დენის გამაძლიერებლად. იგი ამცირებს ხელსაწყოთა გაბარიტებს, წონას და ელექტროენერგიის ხარჯს. მნიშვნელოვანია, რომ შესაძლებელია ამ თვისებების მართვა. ყოველივე ამან გააფართოვა ნახევარგამტარების სფერო ხელსაწყოთმშენებლობაში.

ნახევარგამტარზე დამზადებული ხელსაწყოების ძირითადი ნაკლია:

1. თვისებათა შედარებით მკვეთრი ცვლილება ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით;
2. სამუშაო ტემპერატურის შეზღუდვია (გერმანიუმის ხელსაწყოებისათვის -60-დან $+70^{\circ}\text{C}$, სილიციუმის ხელსაწყოებისათვის -60-დან $+150^{\circ}\text{C}$);
3. პარამეტრების გაბნევა და არასტაბილურობა.

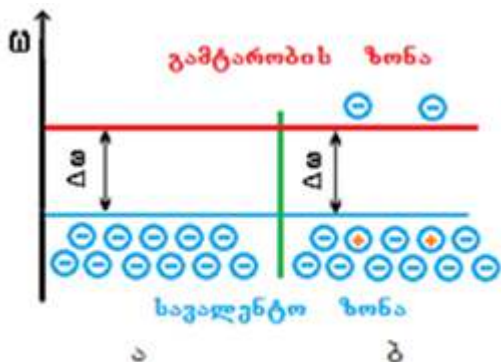
უბრალო ნახევარგამტარებიდან პრაქტიკული გამოყენება გერმანიუმმა და სილიციუმმა პოვა. ისინი მიეკუთვნება IV ჯგუფის ელემენტებს, აქვს აღმასის ტიპის კრისტალური გისოსი კოვალენტური ბმით.

დენგამტარ მასალებში (ლითონებში) სავალენტო ზონას უშუალოდ ემიჯნება ელექტროგამტარობის ანუ აგზნებული დონის ზონა (სურ. 9.2, ა). აღნიშნულმა ზონებმა შეიძლება გადაფაროს კიდევ ერთმანეთი. იზოლატორის ელექტრონების სპექტრი ხასიათდება მნიშვნელოვანი ენერგეტიკული წყვეტით ($\Delta\varphi=1,5\text{--}10$ ევ) ნებადართულ მდგომარე-



სურ. 9.2. ელექტროგამტარობის (ა), იზოლაციისა (ბ) და ნახევრადგამტარის (გ) ელექტრონების სპექტრის ენერგეტიკული სტრუქტურის სქემა

ობასა და აგზნებულ ზონებს შორის (ბ). ნახევარგამტარისათვის ეს მახასიათებელი შემცირებულია (გ, ΔE_2) და 0,1–1,5 ევ შეადგენს. აქედან გამომდინარე, ნახევარგამტარებში ელექტრული დენი აღიძვრება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ელექტრონების ნაწილი დატოვებს შევსებულ სავალენტო ზონას, გადალახავს ΔE_2 ენერგეტიკულ ბარიერს და გადავა გამტარობის ზონაში, სადაც ელექტრული დენის გადამტანებად გადაიქცევა. ენერგეტიკული ზონის გადასალახად აუცილებელია გარკვეული ენერგია, რაც ნახევარგამტარში შეიძლება სინათლის ან სითბოს სახით შეიძინოს.



სურ. 9.3. მუხტის მატარებლებისა და „ხვრელების“ წარმოქმნა ნახევარგამტარებში

ენერგია შეიძინოს, რაც საკმარისი აღმოჩნდება იმისათვის, რომ ზოგიერთმა გადალახოს აკრძალული ზონა და მუხტის მატარებლად გადაიქცეს (სურ. 9.3, ბ). ტემპერატურის შემდგომი მატებით იზრდება მუხტის მატარებლების კონცენტრაცია და ნახევარგამტარის ელექტრული წინაღობა მცირდება.

ელექტრული ველის გავლენით გამტარობის ზონაში ელექტრონების მოძრაობა განაპირობებს ელექტრულ ანუი-გამტარობას (negative). რაც უფრო მეტია აკრძალული ზონის სიგანე, მით უფრო მაღალი ტემპერატურაა საჭირო კოვალენტუ-

რი ბმის დარღვევისათვის. სილიციუმისათვის ეს სიდიდე 1,12 ევ შეადგენს, გერმანიუმისათვის – 0,72 ევ, ამიტომ სილიციუმი მაღალ ტემპერატურაზე სტაბილურ ელექტროწინააღობას ინარჩუნებს, რაც საშუალებას იძლევა სილიციუმის ნახევარგამტარისაგან დამზადებული ელემენტები მაღალ ტემპერატურულ პირობებში მუშაობისათვის გამოვიყენოთ.

სავალენტო ზონაში ელექტრონების მიერ დატოვებულ ადგილას ვაკანსია ანუ „ხვრელი“ წარმოიქმნება, რომელიც დადებით მუხტს ატარებს. იგი შეიძლება შთანთქას იმ ელექტრონმა, რომელიც მეზობელ ატომთან ბმას ახორციელებს. მიიღება ახალი „ხვრელი“, რომელსაც, თავის მხრივ, სხვა ელექტრონი შთანთქავს და ა.შ. ამდენად, სავალენტო ზონაში „ხვრელი“ დიფუზიას განიცდის. ელექტროგამტარობა, რომელიც აღიძვრება „ხვრელების“ დიფუზიით სავალენტო ზონაში ატომიდან ატომზე ელექტრონების გადაადგილების შედეგად, რაც იწვევს კოვალენტური კავშირის რღვევას და აღდგენას, ხვრელურ ანუ P(positive) გამტარობას უწოდებენ.

გამტარობა, რომელიც განპირობებულია ქიმიურად სუფთა ნახევარგამტარებში კოვალენტური ბმის დარღვევით, საკუთარი გამტარობა ეწოდება. ნახევარგამტარების უმრავლესობისათვის საკუთარი გამტარობა საგრძნობი ხდება მხოლოდ 500°C ტემპერატურის ზემოთ.

მინარევები მკვეთრად ცვლის ნახევარგამტარის საკუთარ გამტარობას, რადგან მათი აკრძალული ზონის სიგანე საგრძნობლად ნაკლებია. რადგან ქიმიურად სუფთა ელემენტების მიღება მეტად ძნელია, ნახევარგამტარები ყოველთვის შეიცავს მინარევების გარკვეულ რაოდენობას, რომლებიც ცვლის გამტარობის ხასიათსა და სიდიდეს. ელექტრული გამტარობა, რომელიც ნახევარგამტარებში მინარევების არსებობით არის განპირობებული, მინარევიან გამტარობას უწოდებენ.

პერიოდული სისტემის V ჯგუფის ელემენტის მინარევი ატომები გერმანიუმსა და სილიციუმში გამტარობის ელექტრონულ ტიპს განაპირობებს, რადგან ნახევარგამტარის კრისტალის სავალენტო ზონას ოთხ ელექტრონს გადასცემს, ხოლო მეხუთე ელექტრული დენის მატარებელი ხდება. ასეთ მინარევს დონორს უწოდებენ. გერმანიუმისთვის დონორს დარიშხანი და სტიბიუმი წარმოადგენს, ხოლო სილიციუმისთვის – ფოსფორი და სტიბიუმი. ნახევარგამტარს, რომელშიც დონორული მინარევი ჭარბობს, ელექტრონულს ანუ n ტიპის ნახევარგამტარს უწოდებენ.

III ჯგუფის მინარევი ელემენტები ხვრელური ტიპის გამტარობას განაპირო-

ბებს, რადგან ნახევარგამტარის კრისტალის სავალენტო ზონაში მხოლოდ სამ ელექტონება, რაც მეზობელი ელექტრონების თანამიმდევრულ გადაადგილებას იწვევს. შედეგად ხვრელი დადებითი მუხტის ანალოგიურად გადაადგილდება. ასეთ მინარევებს აქცეპტორულს უწოდებენ. გერმანიუმში მათ გალიუმში და ინდიუმში მიეკუთვნება, ხოლო სილიციუმში – ბორი და ალუმინი. ნახევარგამტარს, რომელშიც აქცეპტორული მინარევი ჭარბობს ხვრელურ, ანუ p ტიპის ნახევარგამტარს უწოდებენ.

ნახევარგამტარებში მინარევი ატომების შემცველობა 10^{-4} – $10^{-9}\%$ არ უნდა აღემატებოდეს განსაკუთრებით არასასურველია Al, B, W, V, Fe, Co და Mn-ის მინარევები. გერმანიუმში აკონტროლებენ 40 ელემენტს, ხოლო სილიციუმში – 27.

ნახევარგამტარების ტექნიკაში, გარდა სუფთა ელემენტებისა, რთული ნახევარგამტარული ნაერთები გამოიყენება. ესენია პერიოდული სისტემის სხვადასხვა ჯგუფის ელემენტების შუალედური ფაზები: მეოთხე ჯგუფის ელემენტების – $A^{IV}B^{IV}$, მესამე და მეხუთე ჯგუფის ელემენტების – $A^{III}B^V$ და მეორე და მეექვსე ჯგუფის ელემენტების – $A^{II}B^{VI}$ ნაერთები (იხ. ცხრილი 9.1). სილიციუმის კარბიდი წარმოადგენს ფაზას, სადაც მკაცრად არის დაცული სტექიომეტრიული პროპორცია. ამიტომ მის გამტარობას სტრუქტურის წერტილოვანი დეფექტები, კრისტალურ გისოსში ატომების ნაწილობრივი მოუწესრიგებლობის ხარისხი ან მინარევები განსაზღვრავს. II და III ჯგუფის მინარევები მისთვის აქცეპტორებს წარმოადგენს, ხოლო V და VI ჯგუფისა – დონორებს. $A^{III}B^V$ ტიპის ნაერთებში ატომებს შორის კოვალენტურ კავშირთან ერთად იონური კავშირიც აღიძვრება. ნაერთები გარკვეული ქიმიური შედგენილობით ხასიათდება, ამიტომ ელექტრული დენის არაუმთავრესი მატარებლები აღიძვრება მინარევების, წერტილოვანი დეფექტების და კრისტალურ გისოსში ატომების განლაგების მოუწესრიგებლობის შედეგად. II ჯგუფის მინარევები არის აქცეპტორები, ხოლო VI ჯგუფისა – დონორები. იმ შემთხვევაში, თუ IV ჯგუფის ელემენტები კრისტალურ გისოსში ცვლის A ატომებს, წარმოადგენს დონორებს, ხოლო თუ ცვლის B ატომებს – აქცეპტორებს.

$A^{II}B^{VI}$ ტიპის ნახევარგამტარებში უპირატესია ატომებს შორის იონური ტიპის კავშირი და ახასიათებს ცვალებადი შედგენილობა. ლითონის იონების სიჭარბე განაპირობებს ელექტრულ გამტარობას, ხოლო არალითონური იონებისა – ხვრელურ გამტარობას.

ცხრილი 9.1

ნახევარგამტარი ფაზების სტრუქტურა და აკრძალული ზონის სიგანე

ნაერთი			კრისტალური გისოსი	კავშირის ტიპი	აკრძალული ზონის სიგანე, 10 ⁻¹⁹ ჯოული
დასახელება	ფორმულა	ტიპი			
სილიციუმის კარბიდი	SiC	A ^{IV} B ^{IV}	ჰექსაგონური	კოვალენტური	4,5
ანტიმონიდები	ZnSb	A ^{III} B ^V	კუბური	იონურ-	0,43
არსენიდები	GaAs			კოვალენტური	2,4
სულფიდები	ZnS	A ^{II} B ^{VI}	ჰექსაგონური	იონური	5,9
	CdS				კუბური
ოქსიდები	ZnO				
	FeO			2,4	

მიუხედავად GaAs ნახევარგამტარის წარმოების დიდი ტექნოლოგიური სირთულეებისა, იგი ყველაზე პერსპექტიულ ნახევარგამტარს წარმოადგენს. სილიციუმთან შედარებით მასში ელექტრონების მოძრაობის სიჩქარე მნიშვნელოვნად მაღალია, ამიტომ მეტად ეფექტურია მისი გამოყენება სრაფმოქმედ სისტემებში.

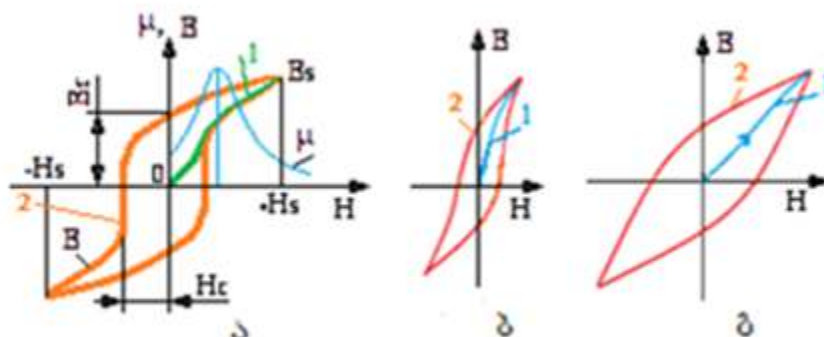
ნახევარგამტარების მარკა აღინიშნება ასოებითა და ციფრებით. თავდაპირველად იწერება ასო, რომელიც მიუთითებს გამოსავალ მასალას (K – სილიციუმი, BK – უტიგელო სილიციუმი, Γ – გერმანიუმი, AΓ – გალიუმის არსენიდი და ა.შ.). შემდეგი ასო მიუთითებს გამტარობის ტიპს (N – ელექტრონული, D – ხვრელური). შემდეგი მიუთითებს მალეგირებელ ელემენტებს (A – ალუმინი, B – ბორი, Γ – გალიუმი, Φ – ფოსფორი და ა.შ.). ციფრები იწერება ასოების შემდეგ წილადის სახით, რომლის მრიცხველი გვიჩვენებს ხვედრით ელექტროწინააღმდეგობას ომი-სმ, მნიშვნელი – არაწონასწორული მატარებლების გარბენის დიფუზურ სიგრძეს მმ-ში. ნახევარგამტარის მარკებია: ΓC27/1,5; ΓDΓ5/1,0; ΓC 40/3; ΓDB 7,5/0,5; BKΦ 7/0,5.

9.4. მაგნიტური მასალები

მაგნიტური თვისებებისა და გამოყენების თვალსაზრისით, მასალები პირობითად შეიძლება ფერომაგნიტურ და არამაგნიტურ მასალებად დაიყოს. ტექნიკაში გამოყენებული ლითონებიდან მხოლოდ რკინა, კობალტი, ნიკელი და გადოლინიუმი ხასიათდება ფერომაგნიტური თვისებებით.

მაგნიტური თვისებების შესახებ ძირითად ინფორმაციას დამაგნიტების მრუდი ანუ ჰისტერეზისის მარყუი იძლევა (სურ. 9.4, ა). მრუდი 1 არის დამაგნიტების საწყისი მრუდი, ხოლო მრუდი 2 მაგნიტური ინდუქციის ცვლილების ხასიათს გვიჩ-

ვენებს ველის დაძაბულობაზე დამოკიდებულებით, შემდგომი დამაგნიტება-განმაგნიტების დროს. ამ მრუდით შემოსაზღვრული ფართობი ე.წ. ჰისტერეზისის მარყუქი



სურ. 9.4. დამაგნიტების მრუდი (ჰისტერეზისის მარყუქი)

გვიჩვენებს ენერგიას, რომელიც დამაგნიტებაზე იხარჯება.

როგორც დამაგნიტებისას წყისი მრუდის ხასიათიდან ჩანს, მაგნიტური ინდუქცია B მაგნიტური ველის H სიდიდის ზრდასთან ერთად იცვლება და ველის გარკვეული მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ მაქსიმალურ B_s მნიშვნელობას აღწევს, რომელსაც გაჯერების ინდუქცია ეწოდება (სურ. 9.4 ა, მრუდი 1). მაგნიტური ველის შემცირებასთან ერთად იწყება განმაგნიტების პროცესი – ინდუქცია მცირდება, მაგრამ განმაგნიტების მრუდი 2 დამაგნიტების მრუდს არ მიჰყვება. როდესაც მაგნიტური ველის სიდიდე ნულს გაუტოლდება, მასალაში B_r სიდიდის ინდუქცია რჩება. ნარჩენი ინდუქციის მოსახსნელად საჭიროა უარყოფითი მაგნიტური ველის მოდება. უარყოფითი მაგნიტური ველის H_c სიდიდეს, რომელიც ნარჩენი ინდუქციის მოსახსნელად არის საჭირო, კოერციტიული ძალა ეწოდება.

ინდუქციის მატების ინტენსიურობას დამაგნიტებელი ველის დაძაბულობის ზრდისას ახასიათებს მაგნიტური შეღწევადობა μ და განისაზღვრება პირველადი დამაგნიტების მრუდის დახრის კუთხის ტანგენსით $B=f(H)$ (სურ. 9.4, ა).

ამგვარად, დამაგნიტების მრუდით შემდეგი უმთავრესი მაგნიტური მახასიათებლები განისაზღვრება:

- ნარჩენი ინდუქცია B_r – მაგნიტური ინდუქცია, რომელიც ნიმუშში რჩება მისი დამაგნიტებისა და მაგნიტური ველის მოხსნის შემდეგ. მისი განზომილებაა ტესლა (ტლ ან ჰაუსი. $1 \text{ ჰა} = 10^{-4} \text{ ტლ}$).

- კოერციტიული ძალა H_c – მაგნიტურიველის დაძაბულობა, რომელიც უზრუნველყოფს წინასწარდამაგნიტებული ნიმუშის განმაგნიტებას. მისი განზომილებაა ამპერი/მეტრი (ა/მ ან ერსტედი. 1 ერსტედი=79,5 ა/მ).

ჰისტერეზისის მარყუჟის ფორმა სხვადასხვანაირი შეიძლება იყოს, რაც ფერომაგნიტური მასალების ორ ჯგუფად დაყოფას განაპირობებს: მაგნიტურბილ და მაგნიტურსაღ მასალებად.

9.4.1. მაგნიტურბილი მასალები

მაგნიტურბილი მასალები უნდა ხასიათდებოდეს მაღალი მაგნიტური შეღწევადობით (μ) სუსტ, საშუალო და ძლიერ ველებში, გაჯერების ინდუქციით (B_s), მცირე ნარჩენი ინდუქციით (B_r) და მცირე კოერციტიული ძალით (H_c) (სურ. 9.4, ბ). რბილმაგნიტური მასალისაგან ამზადებენ ისეთ ელემენტებს, რომლებიც დამაგნიტება-განმაგნიტების რეჟიმში მუშაობს. მაგალითად, ტრანსფორმატორის, ელექტრომაგნიტის და დინამოს გულარებს.

მაგნიტურბილ თვისებებს განაპირობებს ლითონის მაქსიმალური წონასწორობილი მდგომარეობა, გისოსის სწორი გეომეტრიული ფორმა დეფექტების გარეშე და მსხვილმარცვლოვანი აგებულება.

დანიშნულების მიხედვით მაგნიტურბილი მასალა ორ ჯგუფად იყოფა, რომლებიც ერთმანეთისგან მკვეთრად განსხვავდება ელექტრული პარამეტრებით. პირველს მიეკუთვნება დაბალი სიხშირის, მეორეს – მაღალი სიხშირის მასალები. უკანასკნელი ხასიათდება შედარებით უფრო მაღალი ხვედრითი ელექტრული წინააღობით და ხშირად ნახევარგამტარის თვისებებს ამჟღავნებს.

დაბალი სიხშირის მაგნიტურბილი მასალები, თავის მხრივ სამ ჯგუფად იყოფა:

ა) მასალები, რომლებსაც აქვს მაღალი ინდუქციური გაჯერება და გამოიყენება ძლიერ მაგნიტურ ველში მუშაობისათვის;

ბ) მასალები მაღალი მაგნიტური შეღწევადობით, რომლებიც ასევე გამოიყენება ძლიერ მაგნიტურ ველში მუშაობისათვის;

გ) განსაკუთრებული მაგნიტური თვისებების მასალები.

პირველი ჯგუფის საუკეთესო მაგნიტურბილ მასალას სუფთა ფერომაგნი-

ტური ლითონები წარმოადგენს. ყველაზე კარგი მაგნიტურობილი თვისებებით სუფთა, კარბონილური ან ელექტროლიტური რკინა ხასიათდება, სადაც მინარევების რაოდენობა 0,04–0,06%-ს არ აღემატება.

გარდა სისუფთავისა, რკინის მაგნიტურ თვისებებს მისი სტრუქტურა განსაზღვრავს. საუკეთესო თვისებებით გამოირჩევა ყოველგვარი დაძაბულობისაგან თავისუფალი, მსხვილმარცვლოვანი აგებულების რკინა. ასეთი სტრუქტურის მისაღებად, როგორც წესი, მიმართავენ მაღალტემპერატურულ მოწვას. აქვე აღსანიშნავია, რომ რკინის ცივად დეფორმაცია (ცივჭედვა) მნიშვნელოვნად ზრდის კოერციტიული ძალის მნიშვნელობას. ჩვეულებრივი მარცვლოვნებისა და სისუფთავის რკინის კოერციტიული ძალა 1 ერსტედს, შეადგენს მაშინ, როდესაც მინიმალური კოერციტიული ძალა 0,01 ერსტედი, დაფიქსირებულია მეტად მსხვილმარცვლოვან სუფთა რკინაში.

ტექნიკური რკინა ხასიათდება მცირე ელექტრული წინააღობით, რაც განაპირობებს გაზრდილ ელექტრულ დანაკარგებს გადამაგნიტების დროს. ამიტომ მისი გამოყენება რეკომენდებულია მუდმივი ან სუსტად პულსირებული დენის მოწყობილობაში, როგორიცაა, მაგალითად, გულარები, რელე და მუდმივი დენის ელექტრომაგნიტები, მაგნიტური ეკრანები, ელექტრული მანქანების პოლუსები და სხვა.

ელექტროგამტარობის შესამცირებლად რკინას სილიციუმს უმატებენ. სილიციუმში იხსნება ფერიტში, რაც მკვეთრად ზრდის ელექტროწინააღობას, ხელს უწყობს რკინის მარცვლის გამსხვილებას და ასუსტებს სხვა მინარევების მავნე გავლენას. 2%-ზე მეტი სილიციუმის შემცველობის შემთხვევაში, მოწვის დროს, შენადნობი არ განიცდის γ -გარდაქმნას, რაც უზრუნველყოფს მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას. უმჯობესდება მაგნიტური თვისებებიც: იზრდება მაგნიტური შეღწევადობა და მცირდება კოერციტიული ძალა. რკინის შენადნობს სილიციუმთან ელექტროტექნიკური ფოლადი ეწოდება.

ელექტროტექნიკურ ფოლადში ელექტრული დანაკარგები დენის სიხშირისა და ფურცლის სისქის კვადრატის პროპორციულად იზრდება. ამიტომ ყველა სილიციუმისანი ფოლადი ტრანსფორმატორებისა და დინამომანქანების წარმოებაში 1 მმ-მდე სისქის თხელი ფურცლებისა და ლენტის სახით გამოიყენება. ფურცლებს შორის დააქვთ საიზოლაციო შუაშრე (პოლიმერი ან ოქსიდი).

ელექტროტექნიკური ფოლადის მარკაში პირველი ციფრი დამზადების ხერხს მიუთითებს: 1 – ცხლად გლინული; 2 – ცივად გლინული იზოტროპიული; 3 – ცივად გლინული, ანიზოტროპიული; მეორე ციფრი მიუთითებს სილიციუმის რაოდენო-

ბას: 0 – $\text{Si} \leq 0,03\%$; 1 – სილიციუმი 0,4–0,8%; 2 – სილიციუმი 0,8–1,8%; 3 – სილიციუმი 1,8–2,8%; 4 – სილიციუმი 2,8–3,8%; 5 – სილიციუმი 3,8–4,8%. მესამე ციფრი განსაზღვრავს ქარხნის მიერ გარანტირებულ ძირითად თვისებას, ხოლო მომდევნო ორი ციფრი – ამ თვისების რაოდენობრივ მნიშვნელობას. მაგალითად, მარკა 20895 შემდგენიარად გაიშიფრება: 2 – შენადნობი ცივად გლინული, იზოტროპიულია; 0 – სილიციუმის შემცველობა $\leq 0,03\%$; 8 – მიუთითებს, რომ ქარხანა გარანტიას იძლევა კოერციტიულძალაზე და მისი მნიშვნელობაა 95 ა/მ.

ლეგირებული ელექტროტექნიკური ფოლადის მარკირების პრინციპი რამდენადმე განსხვავებულია: პირველი ციფრი მარკაში განსაზღვრავს გლინვის სახეობას და სტრუქტურას: 1 – ცხლად გლინული, იზოტროპიული; 2 – ცივად გლინული, იზოტროპიული; 3 – ცივად გლინული, ანიზოტროპიული ტექსტურირებული კრისტალოგრაფიული მიმართულებით [100]. მეორე ციფრი მარკაში მიუთითებს სილიციუმის შემცველობას %-ში: 0 – $\text{Si} \leq 0,4\%$; 1 – (0,4–0,8%); 2 – (0,8–1,8%); 3 – (1,8–2,8%); 4 – (2,8–3,8%); 5 – (3,8–4,8%). მესამე ციფრი განსაზღვრავს დანაკარგებს ჰისტერეზისზე და ნარჩენი ინდუქციისა თბურ დანაკარგებს (B, ტლ) და დენის სიხშირის (f, ჰც) გარკვეული მნიშვნელობისას. მაგალითად, 1 – კუთრი დანაკარგები $B=1,5$ ტლ და $f \leq 50$ ჰც-ის შემთხვევაში ($P_{1,5/50}$). მეოთხე ციფრი არის ნორმირებული პარამეტრის კოდის რიცხვითი მნიშვნელობა. რაც მეტია ციფრი, მით ნაკლებია კუთრი დანაკარგები $P_{1,5/50}$. მაგალითად, მარკა 2311 შემდგენიარად გაიშიფრება: 2 – შენადნობი არის ცივად გლინული, იზოტროპიული; 3 – სილიციუმის შემცველობა 1,8–2,8%; 1 – კუთრი დანაკარგები $B=1,5$ ტლ და $f \leq 50$ ჰც-ის შემთხვევაში, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა $P_{1,5/50}=5,8$ ვტ/კგ.

ძალოვან ტრანსფორმატორებში ტექსტურირებული ანიზოტროპიული სტრუქტურის მქონე ფოლადის გამოყენებისას, თუ გლინვის მიმართულება ტრანსფორმატორის გულარას ღერძის ხაზს ემთხვევა, დანაკარგები მინიმალურია, ძალოვანი ტრანსფორმატორის წონა და გაბარიტული ზომები 20–25%-ით, ხოლო რადიოტრანსფორმატორებისა – 40%-ით მცირდება.

მაღალი მაგნიტური შეღწევადობისა და ინდუქციის (Bs) შენადნობთა ჯგუფში გაერთიანებულია ნიკელით ლეგირებული შენადნობები 45H და 50H (რიცხვი პირველ ადგილზე მიუთითებს ნიკელის შემცველობას პროცენტებში), რომლებიც პერმადლის სახელწოდებითაა ცნობილი. ფართოდ მიმართავენ აგრეთვე მათ ლეგირებას ქრო-

მით, სილიციუმით, მოლიბდენით და კობალტით. ამ ტიპის შენადნობებია: 50HXC, 50HII, 79HMP. პერმალის ტიპის შენადნობებს ახასიათებს განსაკუთრებით მაღალი მაგნიტური შეღწევადობა სუსტ ველში (ათჯერ და ასჯერ უფრო მეტი, ვიდრე სუფთა რკინას და ელექტროტექნიკურ ფოლადს), ამიტომ ფართოდ გამოიყენება სუსტი დენით მომუშავე მოწყობილობაში, როგორიცაა, მაგალითად, ტელეფონი, ტელეგრაფი, რადიო და ა.შ.

სუსტ მაგნიტურ ველში მაღალი ინდუქციის მისაღებად გამოიყენება აგრეთვე Al-Si-Fe სისტემის შენადნობები, რომელსაც აღსიფერი ეწოდება. იგი შეიცავს 5,4%Al, 9,6%Si და 85% Fe და ხასიათდება მაღალი მაგნიტური შეღწევადობით. მისი გამოყენება იგივე დანიშნულებით შეიძლება, როგორც ძვირად ღირებული ნიკელის შემცველი შენადნობისა – პერმალის. თუმცა აღსიფერის პრაქტიკულ გამოყენებას ზღუდავს მისი მაღალი სისაღე და სიმყიფე, მაგრამ ხასიათდება კარგი სამსხმელო თვისებებით, ამიტომ მისგან თხელკედლიან ფასონურ სხმულებს ამზადებენ.

მაგნიტურბილს მიეკუთვნება აგრეთვე Fe_2O_3 -ის და ზოგიერთი სხვა ჟანგულის (NiO, MnO, ZnO, MgO და სხვა) ფხვნილთა შეცხობით მიღებული შენადნობები. მათ ფერიტებს ეწოდებენ. ფერიტები ხასიათდება დიდი მაგნიტური შეღწევადობით, მცირე კოერციტიული ძალით და მაღალი ელექტრული წინააღობით. ისინი ფართოდ გამოიყენება გამომთვლელ ტექნიკაში და სხვა უახლეს მოწყობილობაში. ფერიტების უარყოფით მხარედ მიჩნეულია მათი დიდი მგრძნობიარობა ნარჩენი ძაბვებისადმი. ახასიათებს კერამიკის ყველა თვისება: სისაღე, სიმყიფე, დიდი ჩაჯდომა შეცხობის დროს. მათი დამუშავება შესაძლებელია მხოლოდ აღმასის ინსტრუმენტით. ფერიტის თვისებები სხვადასხვა ტექნოლოგიურ ფაქტორზე დამოკიდებული (ოქსიდების ფხვნილთა მარცვლის ზომებსა და მათი ერთგვაროვნების ხარისხზე, დაწნევის კუთრი ძალის სიდიდეზე, შეცხობის ტემპერატურაზე, გაცივების რეჟიმზე და ა.შ). ყოველივე ეს აძნელებს ფერიტების მიღების პროცესს მოცემული და განმეორებადი თვისებებით.

9.4.2. მაგნიტურსალი მასალები

მაგნიტურსალი ფოლადები და შენადნობები უნდა ხასიათდებოდეს დიდი მაგნიტური შეღწევადობით, ნარჩები ინდუქციით და კოერციტიული ძალით (სურ. 9.4, გ). მათ მუდმივი მაგნიტების დასამზადებლად იყენებენ. შენადნობებს ძლიერ ველში ამაგნიტებენ ($H > 1000$ კა/მ). მაგნიტურსალი შენადნობები ხასიათდება დიდი დანაკარგებით გადამაგნიტებაზე; ნარჩენი ინდუქცია $Br = 0,5-1$ ტლ, ხოლო კოერციტიული ძალა $Hc \leq 560$ კა/მ.

ასეთი თვისებების ფორმირებას უზრუნველყოფს ლითონის დამუშავების ისეთი ხერხების გამოყენება, რომელიც მისი წონასწორული მდგომარეობიდან მაქსიმალურ გადახრას განაპირობებს – წრთობა, გისოსის დაძაბულობა (ციკლედევა), დაწვრილმარცვლოვნება და ა.შ. აქედან გამომდინარე, ცვლილებები შინაგან აგებულებაში, რომელიც მასალის მექანიკური სისხლის გაზრდას იწვევს, ზრდის მაგნიტურ სისხლესაც.

მაგნიტურსალი შენადნობებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს, უპირველეს ყოვლისა, მარტენსიტზე ნაწრთობი Y10-Y12 ნახშირბადუხვი ფოლადები აკმაყოფილებს. მათი ნარჩენი ინდუქცია $Br = 800$ ჰაუსს, ხოლო კოერციტიული ძალა $Hc = 60$ ერსტედს. თუმცა ამ ფოლადებს უდიდესი ნაკლი ახასიათებს – მცირე შეწრთობადობა, რაც ზღუდავს ნაკეთობის განივკვეთს გამჭოლი მარტენსიტული სტრუქტურით. შეწრთობადობის გასაზრდელად აწარმოებენ ფოლადის ლეგირებას ძირითადად ქრომით, ვოლფრამით და კობალტით. ლეგირების შედეგად შეწრთობადობასთან ერთად უმჯობესდება ფოლადის მაგნიტურსალი თვისებებიც. კერძოდ, ნარჩენი ინდუქცია იზრდება 8000–10000 ჰაუსამდე, ხოლო კოერციტიული ძალა 170 ერსტედს აღწევს.

ლეგირებული მაგნიტურსალი ფოლადები გამოიყენება თერმულად დამუშავებულ მდგომარეობაში, რომელიც საკმაოდ რთული რეჟიმით ტარდება. მისი საბოლოო ოპერაციებია წრთობა მარტენსიტზე 800–1000°C-დან ზეთში და დაბალი მოშვება. თვისებების სტაბილიზაციისათვის ხშირად მიმართავენ ხანგრძლივ, შედარებით დაბალტემპერატურულ დამუშავებას (დუღებას).

ამ ჯგუფის მაგნიტურსალი ფოლადების მარკა E ასოთი აღინიშნება, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ფოლადი მაგნიტურსალია. დანარჩენი ასოები და რიცხვები აღნიშნავს მალეგირებელ ელემენტებს და მათ შემცველობას პროცენტებში. მაგალითად, EX3, EX5K5, EX9K15M2. კობალტიან ფოლადებს ყველაზე მაღალი მაგნიტუ-

რი მახასიათებლები გააჩნია ($H_c=100-170$ ერსტედი, $Br=8000-8500$ ჰაუსი), მაგრამ კობალტის დეფიციტურობა ზღუდავს მათი გამოყენების სფეროს.

ასხვავებენ სამსხმელო, დეფორმირებად და ფხვნილისებრ მაგნიტურსაღ შენადნობებს.

სამსხმელო მაგნიტურსაღ შენადნობებს მიეკუთვნება რკინის ფუძეზე დამზადებული Fe-Ni-Al სისტემის შენადნობები. იგი შეიცავს $12-35\%Ni$ და $6,5-16\%Al$, დანარჩენი რკინაა. დამატებით Co, Cu, Ti და Nb-ის შეყვანა აუმჯობესებს შენადნობის მაგნიტურ თვისებებს. მაგნიტების 80% ამ სისტემის შენადნობებისგან მზადდება. მათ აერთიანებენ სახელწოდებით ალნი. მარკირება ხდება იგივე პრინციპით, როგორც ფოლადებისა. ამ ჯგუფს მიეკუთვნება ЮНД4, ЮНДК18, ЮНДК35Т5Б და ЮНДК35Т5БА. 1% სილიციუმის დამატებით მიიღება შენადნობი ალნისი (ЮНС).

მაღალი სისაღისა და დაბალი პლასტიკურობის გამო აღნიშნული შენადნობები არ ექვემდებარება პლასტიკურ დეფორმაციას, ამიტომ მათ ჩამოსხმითა და შემდგომ ხეხვით ამუშავებენ. განსაკუთრებით მაღალი მაგნიტური თვისებები მიიღწევა 35% -მდე კობალტის შემცველ შენადნობებში თერმომაგნიტური დამუშავების შემდეგ. ამ დროს მაგნიტს $1300^{\circ}C$ -მდე ახურებენ და კრიტიკული სიჩქარით აცივებენ ძლიერ მაგნიტურ ველში (1000 ერსტედი). გაცივების პროცესში მიმდინარეობს დისპერსიული ფერომაგნიტური ფაზის ორიენტირებული გამოყოფა. თერმომაგნიტური დამუშავება ზრდის როგორც კოერციტიულ ძალას, ისე ნარჩენ ინდუქციას და, შესაბამისად, მაგნიტის სიმძლავრეს.

დეფორმირებად მაგნიტურსაღ შენადნობებს პლასტიკური ლითონების (Fe, Co და Cu) ბაზაზე ამზადებენ. მათი მარკებია: 30ХК25, 52К13Ф, ПЛК78, აგრეთვე შენადნობები კუნიკო ($50\%Cu$, $21\%Ni$, $29\%Co$) და კუნიფე ($60\%Cu$, $20\%Ni$, $20\%Fe$). შაუკეთესო მაგნიტური თვისებები მიიღება წრთობისა და დაძველების შემდეგ, რა დროსაც ყალიბდება წვრილდისპერსიული ფერომაგნიტური ფაზები არამაგნიტურ ძირითად მატრიცაში.

ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ შენადნობებში მაღალი მაგნიტური თვისებები რთული თერმული დამუშავების შედეგად მიიღწევა, რომელიც მდგომარეობს ნორმალისაში (ჭარბი კარბიდების გასახსნელად აუსტენიტში), ოპტიმალური ტემპერატურიდან წყალში ან ზეთში წრთობასა და დაბალ მოშვებაში. სასურველია მოშ-

ვების წინ -70°C -ზე სიცივით დამუშავება. სიცივით დამუშავება ამცირებს ნარჩენი პარამაგნიტური ფაზის – აუსტენიტის რაოდენობას. მართალია, მოშვების დროს რამდენადმე მცირდება კოერციტიული ძალა, მაგრამ სტაბილურს ხდის მის მნიშვნელობას დროში. შესაძლებელია თერმული დამუშავება სხვა რეჟიმითაც ჩატარდეს, რასაც მასალის შედგენილობა განსაზღვრავს.

Fe-Ni-Al მაგნიტურსაღ შენადნობებს ღებულობენ აგრეთვე შემადგენელი მასალების ფხვნილთა ნარევის შეცხოვით. წინასწარ მომზადებულ კაზმს წნეხავენ სასურველი ფორმის წნეხეალებში და აცხობენ 1300°C -ზე წყალბადის ან სხვა დამცავ ატმოსფეროში. მიღებული ნაკეთობა ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით, ზუსტი ზომებითა და ზედაპირის მაღალი სისუფთავით. მაგნიტურსაღი თვისებების მისანიჭებლად ნაკეთობას ისეთივე თერმულ ან თერმომამაგნიტურ დამუშავებას უტარებენ, რომელიც სხმული შენადნობებისთვის არის მიღებული.

შეცხოვილი მაგნიტურსაღი შენადნობის მარკა აღინიშნება MMK-ასოებით, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ მაგნიტი ღითონკერამიკულია. შემდეგ იწერება რიგითი ნომრის აღმნიშვნელი რიცხვი. ტექნიკაში შემდეგი შეცხოვილი მაგნიტურსაღი მასალები გამოიყენება: MMK1 (Hc – 24 კა/მ, Br – 0,6 ტლ); MMK6 (Hc – 44 კა/მ, Br – 0,65 ტლ); MMK7 (Hc – 44 კა/მ, Br – 0,95 ტლ); MMK11 (Hc – 118 კა/მ, Br – 0,7 ტლ).

საღმაგნიტური ფერიტის მაგნიტებს Fe, Ba და Co-ისოქსიდების ფხვნილთა შეცხოვით ღებულობენ. მათი მაგნიტური თვისებები უფრო დაბალია სხმულ Fe-Ni-Al შენადნობებთან შედარებით, თუმცა, როგორც დიელექტრიკები, შესაძლებელია მათი გამოყენება მუდმივ მაგნიტებად მაღალი სიხშირის მაგნიტურ ველებში თბური დანაკარგების გარეშე. მათი მარკებია: 6БН240, 28БА190 ($\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$); 10КА165, 14КА135 ($\text{CoO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). მარკაში პირველი ციფრი მიუთითებს მაგნიტის მაქსიმალურ სიმძლავრეს, ასო – ღითონის ოქსიდში, ხოლო И და А-ასოები – შესაბამისად, მაგნიტის იზოტროპიულობასა და ანიზოტროპიულობას.

უკანასკნელ ხანებში ყურადღებას იმსახურებს ახალი მაგნიტური მასალები, რომლებიც იშვიათი მიწაღითონების ნაერთებია Co, Fe ან Cu-თან.

9.4.3. მაგნიტოპლასტიკი და მაგნიტოელასტიკი

მაგნიტოპლასტიკი მზადდება მაგნიტური მასალის ნაწილაკებისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან სინთეტიკური ფისით არის დაკავშირებული. დამზადებისას

მაგნიტურსაღ ფხვნილს წნეხენ, გაუდენთენ სინთეტიკური ფისით და ეს უკანასკნელი მყარ მდგომარეობაში პოლიმერიზაციით გადაჰყავთ. ნაკეთობა სხვა დამატებით მექანიკურ დამუშავებას არ მოითხოვს. უმეტესწილად გამოყენებას პოულობს აღნის სისტემის ფხვნილები. მაგნიტოპლასტიკი გამოიყენება ელექტრომრიცხველში, სპიდომეტრსა და სხვა ანალოგიურ ხელსაწყოებში.

მაგნიტოელასტიკი შედგება მაგნიტურსაღი მასალისა და ელასტიკური შემაკავშირებელი მასისაგან – კაუჩუკის ან თერმოპლასტიკური ფისისაგან. საღმაგნიტურ მასაღად პრაქტიკული გამოყენება პოვა ბარიუმის ფერიტმა, რომლის კოერციტიული ძალა 1500–2500 ერსტედს აღწევს. ბარიუმის ფერიტის მნიშვნელოვანი თვისებაა ის, რომ შესაძლებელია მისი ნაწილაკების ორიენტაცია მაგნიტურ ველში, რაც ანიზოტროპიული მაგნიტოელასტიკის მიღების შესაძლებლობას იძლევა. მექანიკური თვისებების მიხედვით მაგნიტოელასტიკი რეზინს უახლოვდება, ხოლო მაგნიტური თვისებებით – ფერიტს.

9.4.4. განსაკუთრებული თვისებების მაგნიტური მასაღები

მაგნიტური მასაღების ჯგუფის შენაღნობებს მიეკუთვნება:

ა) პენმინვარი. პენმინვარი ხასიათდება მუღმივი მაგნიტური შეღწევადობით 0-დან 80-160 ა/მ ველის დიაპაზონში. ამ სისტემის შენაღნობებია: 45HK (45%Ni, 25%Co, დანარჩენი რკინა), 45 HKM (45%Ni, 25%Co, 7,5% Mo, დანარჩენი რკინა), 70HK (70%Ni, 7%Co, დანარჩენი რკინა). აღნიშნული შენაღნობების მაქსიმალური მაგნიტური შეღწევადობა შესაბამისად 1800, 4000 და 3800 ჰს/ე შეაღგენს.

ბ) პერმენდიური, 50K რომელიც შეიცავს 50%Co და 1,8%V, დანარჩენი რკინაა. ხასიათდება მაღალი ინდუქციური გაჯერებით. გამოიყენება ისეთი ხელსაწყოების დასამზადებლად, საღაც აუცილებელია მცირე გარემოში ძაღოვანი ხაზების მძღავრი ნაკაღის კონცენტრირება.

გ) პერმაღოი, H33IO1– რომლის ინდუქცია -60-დან +50°C ტემპერატურულ ინტერვალში მკვეთრად იცვლება, გამოიყენება მაგნიტოელექტრული ხელსაწყოების ცღომიღებათა ავტომატური კორეღაციისათვის. პრაქტიკული გამოყენება პოვა შენაღნობმა 30%Ni, დანარჩენი რკინა.

რადგან ინდუქციური გაჯერება და კიურის წერტილი სტრუქტურულად არამგრძნობიარე თვისებებია, პერმენდიურისა და პერმალოის უმთავრეს სამუშაო მახასიათებლებს განსაზღვრავს შენადნობის შედგენილობა და არა დამუშავების ხასიათი.

9.4.5. არამაგნიტური მასალები

ელექტრომანქანათმშენებლობაში მასალას ხშირად არამაგნიტური ($\mu < 1,05$) და მექანიკური სიმტკიცე მოეთხოვება. ამ მიზნით ფერადი ლითონების ნაცვლად უფრო იაფ არამაგნიტურ აუსტენიტურ ფოლადს იყენებენ. აუსტენიტური უჟანგავი და ცვეთამედვეი ფოლადები გამოსადეგია როგორც არამაგნიტური მასალები იმ შემთხვევაში, თუ ისინი სიმტკიცის მახასიათებლით აკმაყოფილებს ტექნიკურ მოთხოვნებს. თუმცა ხშირად ფოლადი Γ13 არაღამაკმაყოფილებელია სიმტკიცისა და ტექნოლოგიურობის თვალსაზრისით, აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადები კი საკმაოდ ძვირად ღირებულია განსაკუთრებით დიდი მასის დეტალების დასამზადებლად (მაგალითად, გენერატორების არამაგნიტური არტახის რგოლებისათვის). ასეთ შემთხვევაში იყენებენ მანგანუმით, ქრომით და ალუმინით ლეგირებულ ფოლადს ნახშირბადის გაზრდილი ($\sim 0,4\%$) და ნიკელის შეზღუდული შემცველობით.

აუსტენიტური სტრუქტურა წრობის შედეგად მიიღება, ხოლო განმტკიცების ეფექტი – ცივჭედვით, თუ ნაწრობ მდგომარეობაში სიმტკიცის მახასიათებელი არასაკმარისია. ფოლადი უნდა ხასიათდებოდეს მდგრადი აუსტენიტური სტრუქტურით, რათა ოთახის ტემპერატურაზე დეფორმაციამ არ გამოიწვიოს მარტენსიტის წარმოქმნა.

არამაგნიტურ სამრეწველო შენადნობებს მიეკუთვნება: ЭИ269 (0,50-60Ni, 4,0-5,5%Mn, 0,25%Cr, 18,5-21,5Ni); 55Г9Н9Х3; 45Г17Ю3.

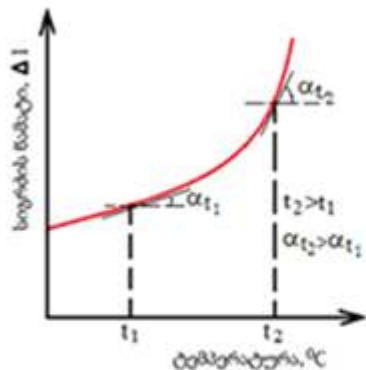
9.5. თბური და ღრეპადი თვისებების შენადნობები

ელექტროტექნიკა და ხელსაწყოთმშენებლობა სრულიად განსხვავებული თვისებების მქონე შენადნობებს მოითხოვს. ერთ შემთხვევაში ეს შეიძლება იყოს მინასთან მიახლოებული წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი, სხვა შემთხვევაში პირიქით – რაც შეიძლება დიდ მნიშვნელობას უნდა აღწევდეს. ამ მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, ყველა კონკრეტულ შემთხვევაში, აუცილებელია მკაცრად განსაზ-

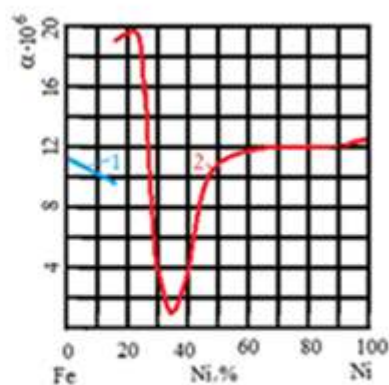
ღერული, ზუსტი შედგენილობის შენადნობის დამზადება. ასეთ შენადნობებს პრეციპიტაციულს უწოდებენ.

9.5.1. შენადნობები მოცემული თბური გაფართოების კოეფიციენტით

ლითონის გაფართოების ხარისხი ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით მრუდ-ხაზოვანი კანონით განისაზღვრება (სურ. 9.5) – წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი α იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად: $\alpha_2 > \alpha_1$, როდესაც $t_2 > t_1$.



სურ. 9.5. სუფთა ლითონის გაფართოების კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე



სურ. 9.6. წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის დამოკიდებულება ნიკელის შემცველობაზე.
1- α ფაზა; 2- γ ფაზა

სუფთა ლითონში მეორე კომპონენტის შეყვანით წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის ხასიათი იცვლება. ამასთან, თუ კომპონენტები მიკრომექანიკურ ნარევს წარმოქმნის, წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი ადიტიურად იცვლება. მეარი ხსნარის წარმოქმნის შემთხვევაში დამოკიდებულება მრუდხაზოვანია, მაგრამ შენადნობის შემადგენელი კომპონენტების წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის ზღვრები იცვლება.

თუმცა არსებობს ორი ანომალიური სისტემა – Fe-Ni და Fe-Pt, რომლებშიც წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის ცვლილების ხასიათი ზოგად კანონებს არ ემორჩილება. რკინა-ნიკელის შენადნობებში ტემპერატურასა და წრფივი გაფართოების კოეფიციენტს შორის რთული დამოკიდებულებაა (სურ. 9.6), რაც მცირე თბური გაფართოების კოეფიციენტის მქონე ე. წ. ინვარული შენადნობების შექმნის შესაძლებლობას იძლევა. ჭარმოდგენილი დიაგრამიდან გამომდინარე, რკინისათვის $\alpha = 11,6 \cdot 10^{-6}$. შენადნობში, რომელიც 25% ნიკელს შეიცავს, წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი თითქმის ორმაგდება ($\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$), ხოლო შენადნობი 36% ნიკელის შემ-

ცველობით რვაჯერ უფრო ნაკლები წრფივი გაფართოების კოეფიციენტით ხასიათდება ($\alpha=1,5 \cdot 10^{-6}$).

შენადნობს, რომელიც 36% ნიკელს შეიცავს, ინვარს (უცვლელი) უწოდებენ. მისი მარკაა 36H. ინვარი პრაქტიკულად არ განიცდის გაფართოებას -60°C -დან $+100^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში. აღნიშნულ ზღვრებს გარეთ მისი გაფართოების კოეფიციენტი მკვეთრად იზრდება. უმნიშვნელო გაფართოების კოეფიციენტთან ერთად შენადნობის კარგი მექანიკური, ტექნოლოგიური და ანტიკოროზიული თვისებები საშუალებას იძლევა იგი გამოვიყენოთ, როგორც საკონსტრუქციო მასალა ხელსაწყოთა ისეთი ნაწილების დასამზადებლად, რომელსაც სტაბილური ზომები მოეთხოვება ტემპერატურის ცვლილების პირობებში.

α კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია შენადნობში მინარევების, და განსაკუთრებით, ნახშირბადის რაოდენობაზე. ამიტომ, მისი შემცველობა შენადნობში შეზღუდულია 0,05%-მდე. α კოეფიციენტის მინიმალური მნიშვნელობა მიიღწევა თერმული დამუშავების შედეგად, რომლის რეჟიმი ასეთია: წრთობა 830°C -დან. ამ დროს ყველა მინარევი, რომელსაც შენადნობი შეიცავს, მყარ ხსნარში გადადის; მოშვება 315°C ტემპერატურაზე 1 საათის განმავლობაში, რაც უზრუნველყოფს წვრილდისპერსიული ჭარბი ფაზის გამოყოფას; დაძველება 95°C ტემპერატურაზე 48 საათის განმავლობაში, რომლის მიზანია ტექნოლოგიური პროცესების დროს წარმოქმნილი ნარჩენი ძაბვების მოხსნა და α კოეფიციენტის სტაბილიზაცია. დამუშავების შემდეგ $\alpha=1,5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

თვისებების გასაუმჯობესებლად ინვარს სპილენძსა და კობალტს უმატებენ. ეს უკანასკნელი ნიკელს ნაწილობრივ ცვლის. შენადნობს სუპერინვარი (32HKД) ეწოდება და კიდევ უფრო მცირე α კოეფიციენტის მნიშვნელობით გამოირჩევა ($\alpha=1 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$).

მუდმივი წრფივი გაფართოების კოეფიციენტით ხასიათდება შენადნობი 42%Ni - ის შემცველობით ($\sim 7,5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) 20-დან 200°C ტემპერატურულ ინტერვალში.

განსაკუთრებულ ჯგუფშია გაერთიანებული შენადნობები, რომლებიც გამოიყენება მოლიბდენიან მინაზე რჩილვისა და შედუღებისათვის. ამ ჯგუფს მიეკუთვნება კოვარი H29K18, რომელიც 29%Ni და 18% Co შეიცავს. მისი წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი $\alpha=5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. α -ს ასეთი მნიშვნელობა აქვს მხურვალმტკიცე მინას,

W-სა და Mo-ს. შენადნობი პლასტიკურია, ჭრით კარგად მუშავდება. მან წარმატებით შეცვალა ნაკლებად პლასტიკური ვოლფრამი და არამხურვალმტკიცე მოლიბდენი ელექტროვაკუუმურ წარმოებაში.

47Hf შენადნობი პლატინიტის სახელწოდებითაა ცნობილი. მას ისეთივე წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი აქვს, როგორიც მინასა და პლატინას ($9 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$), ამიტომ უპირატესად მინასთან ლითონის რჩილვისთვის გამოიყენება.

ხელსაწყოთმშენებლობაში ფართოდ გამოიყენება ბიმეტალები, რომლებიც სხვადასხვა წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის მქონე ორი ფირფიტისგან მზადდება, მაგალითად, ინვარისა და 25H შენადნობისაგან დამზადებული ბიმეტალი. ინვარის წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი მცირეა, 25H შენადნობისა – მაქსიმალური და $20 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ -ს შეადგენს. ამიტომ, გახურებისას ბიმეტალის ფირფიტა იღუნება და ჩართავს ან გამორთავს ელექტრულ წრედს. ბიმეტალის შენადნობები რკინის ფუძეზე მზადდება.

9.5.2. შენადნობები მუდმივი დრეკადობის მოდულით

Fe-Ni სისტემის შენადნობები, ნიკელის გარკვეული რაოდენობით შემცველობის შემთხვევაში, კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი თვისებით – დრეკადობის მოდულის მცირე ტემპერატურული კოეფიციენტით ხასიათდება.

ველა მყარ სხეულში, მათ შორის ლითონშიც, გახურებისას დრეკადობის მოდული მცირდება ატომთშორისი კავშირების ენერგიის შემცირების გამო. Fe-Ni სისტემის ზოგიერთ შენადნობში, რომლებსაც ელინვარს უწოდებენ (მუდმივი დრეკადობა), გახურებისას დრეკადობის მოდულის ცვლილებაში ანომალია შეიმჩნევა – დრეკადობის მოდული იზრდება ან უმნიშვნელოდ მცირდება. ამ ტიპის შენადნობების დრეკადობის მოდული იცვლება $(18-23) \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ზღვრებშირაც დაახლოებით ათჯერ ნაკლებია ნახშირბადიან ფოლადთან შედარებით და 20-ჯერ ნაკლებია აუსტენიტურ ფოლადთან შედარებით.

ელინვარულ შენადნობებს ფართოდ იყენებენ ზუსტი ხელსაწყოებისა და მექანიზმების ზამბარებისა და დრეკადი ელემენტების დასამზადებლად (მათ შორის კამერტონის, ელექტრომექანიკური ფილტრის და ა.შ). დრეკადობის მოდულის უცვ-

ლელობა ხელსაწყოს მცირე ტემპერატურულ ცდომილებას უზრუნველყოფს ექსპლუატაციის პირობებში.

Fe–Ni სისტემის შენადნობებში Y თერმოდრეკადობის კოეფიციენტის მნიშვნელობას ნიკელის შემცველობა განსაზღვრავს. შენადნობები 29% და 45% ნიკელის შემცველობით ხასიათდება Y კოეფიციენტის ნულოვანი მნიშვნელობით. ამ კონცენტრაციიდან მცირედენი გადახრაც კი (რაც გარდაუვალია მეტალურგიულ პროცესებში) მკვეთრად სცვლის Y-ს მნიშვნელობას. ამიტომ, Fe–Ni სისტემის შენადნობებს დამატებით უტარებენ ქრომით ლეგირებას, რაც აღნიშნულ დამოკიდებულებას მდოვრე ხასიათს ანიჭებს. ასეთი ტიპის პირველი შენადნობია 36HX (36% Ni, 12%Cr), რომელსაც ელინგარი ეწოდება. მისი პრაქტიკული გამოყენება შეზღუდულია დაბალი მექანიკური თვისებების გამო, რომლის გაუმჯობესება შეუძლებელია თერმული დამუშავებით, რადგან იგი ერთფაზა, მდგრადი აუსტენიტური სტრუქტურით ხასიათდება. ამასთან, შენადნობს აქვს კიურის წერტილის დაბალი მნიშვნელობა ($\sim 100^{\circ}\text{C}$), რაც ამცირებს მის მუშა ტემპერატურულ ინტერვალს.

აღნიშნული უარყოფითი მხარეები გამოსწორებულია ნიკელის შემცველობის 42–44%-მდე გაზრდით და Al და Ti-ის დამატებითი ლეგირებით, რაც თერმულ განმტკიცებას და კიურის წერტილის დაბლა დაწევას უზრუნველყოფს.

42HXTIO და 44HXTIO შენადნობების თერმული დამუშავების რეჟიმი შემდეგია: წრთობა 950°C -დან და დაძველება 700°C ტემპერატურაზე 4 საათის განმავლობაში. სწორად ჩატარებული თერმული დამუშავების შედეგად $20\text{--}100^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში დრეკადობისმოდულირებულიობს $\pm 1,5 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ მნიშვნელობას.

ელინგარს მიეკუთვნება აგრეთვე შენადნობი 35HXMB, რომლის დრეკადობის მოდულის ტემპერატურული კოეფიციენტი იმდენად მცირეა, რომ უზრუნველყოფს საათის სვლის ტემპერატურულ ცდომილებას – 0,5 წამს დღე-ღამეში ტემპერატურის 1°C -ითცვლილების შემთხვევაში.

9.6. შენადნობები განსაკუთრებული ელექტრული წინააღობით

მაღალი ელექტრული წინააღობის შენადნობები გამოიყენება რეოსტატებისა და ელექტრული ღუმელების სახურებელი ელემენტების დასამზადებლად. აქედან გამომდინარე, ამ მიზნით ისეთი კომპონენტების შენადნობებს იყენებენ, რომლებიც

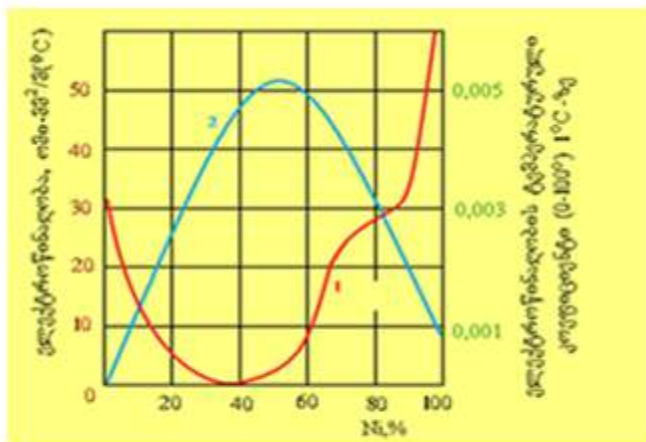
მყარ ხსნარებს წარმოქმნის. როგორც წესი, ასეთი შენადნობები მაღალი კონცენტრაციის მყარ ხსნარებს მიეკუთვნება.

მაღალი ელექტრული წინააღობის შენადნობებს შემდეგი მოთხოვნები აქვს წაყენებული:

1. მაღალი ელექტროწინააღობა;
2. შესაძლებლობის ფარგლებში დაბალი ელექტროწინააღობის კოეფიციენტი;
3. მაღალი ხენჯმდებობა.

სარეოსტატო შენადნობისთვის, რომლებიც 300–500°C-ის ზემოთ გახურებას არ განიცდის, უკანასკნელი მოთხოვნა გადამწყვეტ მნიშვნელობას არ ღებულობს. ღუმელებისა და ხელსაწყოების მახურებელი ელემენტებისათვის, რომელთა საექსპლუატაციო ტემპერატურა მნიშვნელოვნად უფრო მაღალია, სწორედ ხენჯმდებობა განსაზღვრავს მახურებელი ელემენტის მუშაობის ხანგრძლივობას.

სარეოსტატო შენადნობებისთვის გამოიყენება სპილენძის შენადნობები – ნიკელინი, კონსტანტანი და მანგანინი, რომლებიც წარმოადგენს სპილენძის შენადნობს ნიკელთან, თუთიასა და მანგანუმთან.



სურ. 9.7. Cu-Ni შენადნობების ელექტრული თვისებები
1- ტემპერატურული კოეფიციენტი;
2- ელექტროწინააღობა

სპილენძი და ნიკელიგანუსაზღვრელად იხსნება ერთმანეთში მყარ მდგომარეობაში. შენადნობი 40–50% ნიკელის შემცველობით ხასიათდება მოცემული სისტემისათვის მაქსიმალური ელექტროწინააღობით, თითქმის ნულოვანი ტემპერატურული კოეფიციენტის უზრუნველყოფით (სურ. 9.7). ამისიტემის შენადნობებია: МНМц40-1,5 (კონ-

სტანტანი), МНМц43-0,5 (კოპელი) და МНМц3-12 (მანგანინი). სარეოსტატო შენადნობების სამუშაო ტემპერატურაა 200–500°C.

მაღალი ელექტროწინააღობის შენადნობებად ძირითადად გამოიყენება ნიქრომის სახელწოდებით ცნობილი შენადნობები (X20H80, X15H60). ქრომიტა და ალუმინით ლეგირებული მხურვალმდებელი შენადნობები – ფექრალი X13Ю4, აგრეთვე –

X23H05T გამოიყენება, როგორც მაღალი ელექტროწინააღობის მასალები 1000–1400°C ტემპერატურულ ინტერვალში.

9.7. მხურვალმედები და მხურვალმეტალები შენადნობები

ტექნიკის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე მნიშვნელოვნად არის გაზრდილი კონსტრუქციების საექსპლუატაციო პირობები. მათ უნდა გაუძღონ მაღალ ტემპერატურას, წნევას და დაძაბულობას. ასე, მაგალითად, გასული საუკუნის 20-იან წლებში საქვაბე მოწყობილობაში 350°C ტემპერატურისა და 17,5 ატმოსფერული წნევის პირობებში საათში 1 კვტ ელექტროენერგიის გამომუშავებისათვის საჭირო იყო 0,7 კგ ნახშირის დაწვა. 40-იან წლებში საქვაბე მოწყობილობაში ორთქლის ტემპერატურა 400°C-მდე გაიზარდა, ხოლო წნევა – 80–100 ატმოსფერომდე და იგივე რაოდენობის ელექტროენერგიის გამოსაძლევად საჭირო იყო 0,5 კგ ნახშირის დაწვა. თანამედროვე ქვაბებში ორთქლის ტემპერატურა 580°C აღემატება, წნევა 300 ატმოსფეროს შეადგენს, ხოლო ნახშირის ხარჯი 0,3 კგ-მდეა შემცირებული. დადგენილია, რომ მაღალ ტემპერატურებზე ლითონის ქცევა განსხვავებულია არა მარტო ნორმალურ, არამედ 300–350°C პირობებთან შედარებით. ამ მოითხოვნების დაკმაყოფილება მხურვალმედები, მხურვალმეტალები ფოლადებისა და სპეციალური შენადნობების გამოყენებას მოითხოვს.

მხურვალმედებობა (ხენჯმედებობა) ეწოდება ლითონის უნარს, წინააღმდეგობა გაუწიოს ჟანგვას მაღალ ტემპერატურაზე. ლითონები ჟანგბადის მიმართ გარკვეული ნათესაობით ხასიათდებიან, რაც მათი ზედაპირის ჟანგვას იწვევს. თუ ზედაპირზე წარმოქმნილი პირველი ჟანგეულის ფენა მკვრივი და მდგრადია, ჟანგბადის შემდგომი შეჭრა ლითონის სიღრმეში ძნელდება. მაღალ ტემპერატურაზე დიფუზიური პროცესები გაცილებით უფრო გააღვივებულია. გარდა ამისა, შესაძლებელია ჟანგეულის ფურჩი დასკდეს და ინტენსიური ჟანგვა შიგა ფენებშიც განვითარდეს. აქედან გამომდინარე, მხურვალმედებობის გასაზრდელად ცდილობენ ლითონის ზედაპირზე ისეთი მტკიცე ჟანგეულის ფურჩის შექმნას, რომელიც მაღალ ტემპერატურაზე მთლიანობას და ძირითად ლითონთან მტკიცე კავშირს შეინარჩუნებს. ასეთები: Cr₂O₃, Al₂O₃, SiO₂. ამდენად, მხურვალმედები ფოლადების მისაღებად ძირითად მალეგირებელ ელემენტებს ქრომი, ალუმინი და სილიციუმი წარმოადგენს. მათგან უპირატესი მნიშვნელობა ქრომს ენიჭება, რადგან ალუმინი და სილიციუმი აუარესე-

ბენ ფოლადის ტექნოლოგიურ თვისებებს. 5%Cr უკვე უზრუნველყოფს მხურვალმედგობას 700°C ტემპერატურაზე, 7% – 800°C-ზე, 15% – 900°C-ზე, 20% – 1000°C-ზე, ხოლო 25% – 1100°C-ზე. სილიციუმისა (1,5-2,5%) და ალუმინის (2,5%-მდე) დამატებით მხურვალმედგობა 1200°C-მდე იზრდება, ხოლო ნიკელის დამატებით 1400°C აღწევს. 9.2 ცხრილში წარმოდგენილია ზოგიერთი მხურვალმედგობი ფოლადის შედგენილობა და მუშა ტემპერატურები.

მხურვალმედგობი ფოლადები მაღალი სიმტკიცით არ ხასიათდება, ამიტომ მათი გამოყენება დასაშვებია მხოლოდ იქ, სადაც ნაკეთობათა საექსპლუატაციო დავირთვები შედარებით მცირეა, მაგალითად, საქვაბე დანადგარებში, მილებში, ტუმ-

ცხრილი 9.2

ზოგიერთი მხურვალმედგობი ფოლადის შედგენილობა და მუშა ტემპერატურები

ფოლადის მარკა	ქიმიური შედგენილობა, %						სამუშაო ტემპერატურა, °C
	C	Si	Mn	Cr	Ni	სხვა ელემენტები	
12X17	0,12	0,8	0,8	16–18	–	–	900
12X18H9	0,10	0,8	2,0	17–19	9–10	–	850
10X23H18	0,10	1,0	2,0	22–25	17–20	–	1050
30X24H12CЛ	0,40	0,5–1,5	0,3–0,8	22–26	11–13	–	1050
15X25H19C2Л	0,15	2,0–3,0	0,5–1,5	23–27	18–20	–	1150
XH45Ю	0,10	1,0	1,0	15–17	44–46	2,9–3,9Al	1400

ბოებში, ურდულეებში და ა.შ.

მაღალი მხურვალმედგობით ხასიათდება შენადნობები ნიკელის ფუძეზე, რომლებიც ლეგირებულია ქრომით, ტიტანით და ალუმინით. მხურვალმედგობებს მიეკუთვნება აგრეთვე: 12X17, XH78T, 12X18H9, 10X23H18, 10X45Ю. მათგან მზადდება, მაგალითად, მილები, ტუმბოები და ურდულეები.

საქვაბე მილგაყვანილობაში გადამხურებლებისა და სხვა დეტალების დასამზადებლად გამოიყენება აგრეთვე ხარისხოვანი ნახშირბადიანი ფოლადები: 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, და 25. წნევით მათი მუშაობის ტემპერატურული დიაპაზონი–40°C-დან 425°C-მდე შემოიფარგლება. აღნიშნული შენადნობებიდან ფოლადი

15 და 20 გამოიყენება ნორმალიზებულ მდგომარეობაში, ხოლო ფოლადი 25 – ქარხნიდან მიწოდებულ მდგომარეობაში.

მხურვალმტკიცობა არის ლითონის უნარი, წინააღმდეგობა გაუწიოს მექანიკურ დატვირთვებს მაღალ ტემპერატურებზე.

ცნობილია, რომ მაღალ ტემპერატურაზე საგრძნობლად ეცემა ფოლადის ყველა მექანიკური მახასიათებელი. ძაბვა, რომელიც იწვევს ლითონის ნგრევას გაზრდილ ტემპერატურაზე, დამოკიდებულია დატვირთვის მოდების ხანგრძლივობაზე. ამასთან, რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, მით უფრო მცირეა დამანგრეველი ძაბვის სიდიდე მისი ზემოქმედების მოცემული ხანგრძლივობის პერიოდში. აქედან გამომდინარე, ტემპერატურის მატებისას ლითონის სიმტკიცე ორი ფაქტორით განისაზღვრება – ტემპერატურით და დროით. ამიტომ, მოცემულ შემთხვევაში, ლითონის სიმტკიცე განიხილება, როგორც სიმტკიცის ზღვარი (დროებითი წინააღმდეგობა) გამოცდის მოცემული ხანგრძლივობის პერიოდში. სხვა სიტყვებით, იგი არის ძაბვა, რომელიც განაპირობებს ლითონის ნგრევას დროის მოცემული პერიოდში დატვირთვის ზემოქმედებისას. მას ხანგრძლივი სიმტკიცის ზღვარს უწოდებენ.

ხანგრძლივი სიმტკიცე σ სიმბოლოთი აღინიშნება რომელსაც ეწერება ტემპერატურა და ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობის აღმნიშვნელი ინდექსი საათებში. მაგალითად, $\sigma_{600}^{10000}=130$ მგპა ნიშნავს, რომ 600°C ტემპერატურაზე მასალა უძლებს 130 მგპა ძაბვის ზემოქმედებას 10000 საათის განმავლობაში.

როდესაც ლითონი ხანგრძლივი დროის განმავლობაში განიცდის ექსპლუატაციას მაღალი ტემპერატურისა და დატვირთვის პირობებში, მასალის ქცევა დიფუზიური პროცესებით განისაზღვრება. ასეთი პირობებისათვის დამახასიათებელია ცოცვადობისა და ძაბვების რელაქსაციის პროცესები. ცოცვადობა გულისხმობს პლასტიკური დეფორმაციის ნელი სიჩქარით მატებას დენადობის ზღვარზე უფრო ნაკლები სიდიდით უცვლელი ძაბვის ზემოქმედების პირობებში. საბოლოო ჯამში ცოცვადობა ლითონის რღვევას განაპირობებს, რომელიც უმეტესად მარცვლის საზღვრებზე ვითარდება.

მაღალ ტემპერატურაზე მომუშავე ნაკეთობათა ექსპლუატაციის ხანგრძლივობა სრულიად განსაზღვრულია. ამასთან, რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა და ძაბვა, მით უფრო მეტია დეფორმაცია დროში და უფრო ნაკლებია ნაკეთობის საექსპლუატაციო პერიოდი.

ცოცვადობის ზღვარი არის დაბვა, რომლის ზემოქმედებითაც მასალა მოცემულ ტემპერატურაზე გარკვეული ხარისხით დეფორმირდება ასევე გარკვეული დროის განმავლობაში. ცოცვადობის ზღვარის აღნიშვნაში მითითებულია ტემპერატურა, დეფორმაციის სიდიდე და დრო, რომლის განმავლობაშიც იგი ვითარდება. მაგალითად, $\sigma_{1/100000}^{550}=100$ მგპა ნიშნავს, რომ 100 მგპა დაბვის ზემოქმედებით 550°C ტემპერატურაზე მასალაში განვითარდება 1% პლასტიკური დეფორმაცია.

ცოცვადობას ამა თუ იმ ხარისხით ყველა მყარი სხეული განიცდის, როგორც კრისტალური, ისე ამორფული.

ლითონის ცოცვადობის დასახასიათებლად სწავლობენ დეფორმაციას დროში, გარკვეული დაბვისა და ტემპერატურის პირობებში, რის შედეგადაც ცოცვადობის მრუდს აგებენ (სურ. 9.8). მრუდზე შემდეგი უბნებია მითითებული:

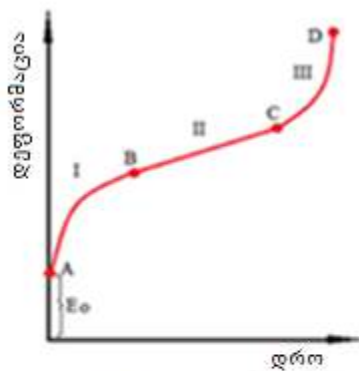
AB – ცვალებადი ცოცვადობის უბანი (I სტადია);

BC – დამყარებული ცოცვადობის ანუ დეფორმაციის უბანი, რომელიც მუდმივი სიჩქარით ხასიათდება (II სტადია);

CD – აჩქარებული ცოცვადობის უბანი (III სტადია);

E_0 – დეფორმაცია დატვირთვის მოდების მომენტში;

D წერტილი – ნგრევის მომენტი.



სურ. 9.8. ცოცვადობის მრუდი

- I- ცვალებადი ცოცვადობის უბანი (არადამყარებული სტადია);
- II- დამყარებული ცოცვადობის უბანი;
- III- აჩქარებული ცოცვადობის უბანი (ნგრევის სტადია)

A წერტილი შეესაბამება იმ დეფორმაციას, რომელსაც მეტად მცირე დროის განმავლობაში მიიღებს ლითონი მასზე მოქმედი დაბვის მოდებისას. ამ მომენტიდან იწყება დროის გავლენა დეფორმაციის სიდიდეზე და იწყება ცოცვადობის პროცესი.

AB უბანი გამოირჩევა დეფორმაციის სიჩქარის თანდათანობითი შენელებით გარკვეულ მუდმივ მნიშვნელობამდე. BC უბანი სწორხაზოვანია და დეფორმაციის მუდმივი სიჩქარით ხასიათდება (ლითონის დეფორმაცია დროის პროპორციულად

მატულობს). მესამე სტადიაში (CD უბანი) დეფორმაციის სიჩქარე განუხრელად მატულობს ლითონის რღვევის მომენტამდე. ცოცვადობის მესამე სტადია, როგორც წე-

სი, ხანმოკლეა და დაუშვებელია დეტალებში მისი განვითარება, რადგან ასეთ შემთხვევაში შეუძლებელია სწრაფი რღვევის არიდება.

ცოცვადობის ბუნება ბოლომდე შესწავლილი არ არის. თუმცა მიღებულია ვარაუდი, რომ იგი იმ შემთხვევაში ვითარდება, როდესაც მოქმედი ძაბვის ზეგავლენით ლითონში პლასტიკური დეფორმაცია მიმდინარეობს, მაგრამ მაღალი ტემპერატურის გამო (როდესაც ეს უკანასკნელი აღემატება რეკრისტალიზაციის ზღურბლს), ლითონის განმტკიცებას (ცივჭედვას) ადგილი არა აქვს.

მხურვალმტკიცობის უზრუნველსაყოფად საჭიროა დისლოკაციების ძვრადობის შეზღუდვა და დიფუზიის სიჩქარის შემცირება. ამის მიღწევა შესაძლებელია ატომთა შორის კავშირის ძალების გაზრდით, დისლოკაციების გადაადგილების საწინააღმდეგო წინაღობების შექმნით და მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებით წვრილდისპერსიული განმამტკიცებელი ფაზის თანაბრად განაწილების უზრუნველყოფით მარცვალში და მათ საზღვრებში.

მხურვალმტკიცე მასალებად ლეგირებული ფოლადები გამოიყენება. სტრუქტურის მიხედვით ისინი სამ ჯგუფად იყოფა: პერლიტური, მარტენსიტული და აუსტენიტური.

მცირედ ლეგირებული პერლიტური კლასის ე.წ. საქვაბე ფოლადების მუშაობის ტემპერატურული დიაპაზონია $500-580^{\circ}\text{C}$. მალეგირებელი ელემენტები – ქრომი, მოლიბდენი და ვანადიუმი, ზრდის ფერიტის რეკრისტალიზაციის ტემპერატურას და აძნელებს დიფუზიურ პროცესებს, რითაც მაღლდება ფოლადის მხურვალსიმტკიცის მახასიათებლები. ამ ჯგუფიდან ფართოდ გამოიყენება 12X1MΦ და 25X2M1Φ ფოლადები. ნახშირბადის მცირე შემცველობის გამო, ფოლადები კარგი შედუღებადობით გამოიჩევა.

მარტენსიტულ და მარტენსიტ-ფერიტული კლასის ფოლადებს მიეკუთვნება უხვად ლეგირებული მხურვალმტკიცე ფოლადები. მათგან მზადდება აირტურბინებისა და ორთქლის მანქანების დეტალები, რომელთა მუშა ტემპერატურაა $600-620^{\circ}\text{C}$. ეს ფოლადებია: 15X5M, 40X10C2M, 15X11MΦ, 12X2MΦCP, 12X2MΦБ, 1X12BHMΦ.

აღნიშნული ფოლადების შედგენილობაშია: W, V, Mo, Nb, Ti, რომლებიც ზრდის რეკრისტალიზაციის ტემპერატურას. ამასთან, წარმოქმნის Me_{23}C_6 , Me_6C , Me_2C MeC ტიპის კარბიდებსა და Fe_2Mo -ის ლითონთშორის ნაერთს, რაც ზრდის ფოლადის მხურვალსიმტკიცის მახასიათებლებს.

ოპტიმალური მხურვალსიმტკიცე მიიღება მაღალქრომიანი ფოლადების მარტენსიტზე წრთობით (გაცივება ხდება ზეთში).

კარბიდების დიდი რაოდენობით არსებობის გამო წრთობის ტემპერატურა შედარებით მაღალია ($1000-1050^{\circ}\text{C}$), რათა აუსტენიტში კარბიდები მაქსიმალურად გაიხსნას. მოშვება, ჩვეულებრივ, ხდება სორბიტზე ან ტროსტიტზე.

ცალკე ჯგუფს მიეკუთვნება ქრომიტა და სილიციუმით უხვად ლეგირებული ფოლადები ე.წ. სილქრომები (მაგალითად, 40X9C2 და 40X10C2M), რომლებიც ხასიათდება მაღალი მხურვალმედვეობითა და მხურვალმტკიცეობით. მათ ძირითადად შიგაწვის ძრავების გამომშვები სარქველების დასამზადებლად იყენებენ, თუმცა $500-600^{\circ}\text{C}$ -ის ზემოთ გახურებისას სილქრომების სიმტკიცე მკვეთრად ეცემა.

აუსტენიტური კლასის მხურვალმტკიცე ფოლადებს მიეკუთვნება Mo, W, V, Nb და B ლეგირებული ფოლადები, რომლებიც შედარებით უფრო მაღალი მხურვალსიმტკიცით ხასიათდება. ეს ფოლადები გამოიყენება $500-750^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ პირობებში მომუშავე დეტალების დასამზადებლად, როგორცაა აირტურბინების კორპუსები, ორთქლის მანქანებისა და ორთქლის გადამახურებელი მოწყობილობების დეტალები.

აუსტენიტური კლასის მხურვალმტკიცე ფოლადები კარგი პლასტიკურობითა და შედუღებადობით ხასიათდება. მიუხედავად ამისა, მათი ჭრით დამუშავება შედარებით გაძნელებულია და შენადული ნაკერი გაზრდილი სიმეიფით ხასიათდება. აუსტენიტური კლასის ფოლადებს მიეკუთვნება: 12X18H10T, 45X14H14I2M, 10X11H20T3P.

ნიკელის ფუძეზე წარმოებული მხურვალმტკიცე შენადნობების ტიპური წარმომადგენელია ნიმონიკები: H77TiO, XH70MBTiO. ნიმონიკს უტარებენ წრთობას $1050-1150^{\circ}\text{C}$ -დან ჰაერზე და დაძველებას $700-750^{\circ}\text{C}$ -ზე. სამუშაო ტემპერატურაა $950-1000^{\circ}\text{C}$.

კობალტის მხურვალმტკიცე შენადნობს მიეკუთვნება ვიტალიუმის ტიპის სამსხმელო შენადნობი (0,2%C, 1,5-3,5%Ni, 25-30%Cr, 4,5-6,5%Mo, 2%Fe, 0,3%Mn, 0,6%Si. დანარჩენი კობალტია). $900-1000^{\circ}\text{C}$ მისი მუშა ტემპერატურაა.

ნახშირბადიანი ფოლადი 10 ფართოდ გამოიყენება ისეთი საქვებე მიღგაყვანილობის დასამზადებლად, რომელიც განკუთვნილია 350°C ტემპერატურამდე ხანგრძლივი მუშაობისათვის.

თაზო X

სპეციალური ღანიშნულების მასალები

10.1. ცვეთამედები მასალები

თანამედროვე მანქანა-დანადგარებში ნაკეთობის ზედაპირს ყველაზე რთულ პირობებში უწევს მუშაობა, რადგან ექსპლუატაციის ადრეულ სტადიაში განიცდის თავის თავზე სამუშაო გარემოსა თუ მასთან კონტაქტში მყოფი დეტალების ზემოქმედებას. ზედაპირის და, ბუნებრივია, მოლიანად ნაკეთობის მწყობრიდან გამოსვლის ძირითადი მიზეზები შეიძლება იყოს:

- აბრაზიული ცვეთა, რაც განპირობებულია მექანიკური ხახუნით;
- კოროზიულ-მექანიკური ცვეთა, რასაც მოხახუნე ზედაპირისა და ქიმიურად აგრესიული გარემოს ზემოქმედება იწვევს;
- გამდინარე სითხესა და აირთან კონტაქტის ადგილებში მასალის ეროზიული (კავიტაციური) ცვეთა;
- ვაკუუმში მომუშავე დეტალის ზედაპირიდან ელემენტების სელექციური აორთქლება;
- ცვეთა და ჟანგვა მაღალ ტემპერატურულ პირობებში და ა.შ.

ამგვარად, ნაკეთობის მუშაობის უნარისა და ხანმედგობის გასაზრდელად აუცილებელი ხდება ამა თუ იმ ფაქტორის ზემოქმედებისაგან მისი ზედაპირის დაცვა ან სათანადო თვისებების მქონე საკონსტრუქციო მასალის გამოყენება.

აბრაზიული ცვეთის შემთხვევაში ხდება ლოკალური უბნების პლასტიკური დეფორმაცია და ნაკეთობის ზედაპირიდან მიკრონაწილაკების ამოგლეჯა. აქედან გამომდინარე, რაც უფრო მაღალია მასალის სისაღე, მით უფრო მაღალი იქნება მისი ცვეთამედგობაც.

ცვეთამედები ფოლადებიდან ყველაზე ფართოდაა ცნობილი გრაფიტიზებული ფოლადი და აუსტენიტური კლასის ე.წ. ჰადფილდის ფოლადი Γ13, რომელიც 1,4%C და 11–14% Mn შეიცავს.

ფოლადი Γ13 როგორც კონტაქტური, ისე აბრაზიული ცვეთის პირობებში მეტად მაღალი მახასიათებლებით გამოირჩევა წნევით მუშაობის პირობებში, რადროსაც აუსტენიტი ცივჭედვასთან ერთად ნაწილობრივ მარტენსიტულ გარდაქმნასაც განიცდის, ამიტომ მისგან ისეთ დეტალებს ამზადებენ, რომლებიც მაღალი

წნევის და ერთდროული დარტყმითი დატვირთვების პირობებში მუშაობს. ასეთებია ტრაქტორის მუხლუხები, ექსკავატორის ციცხვი, ტრამვაის ჯვარედი, ქვასატეხის დეტალები, რკინიგზის გადამყვანი ისრები. F13 ფოლადისაგან ნაკეთობას უპირატესად ჩამოსხმით ამზადებენ.

გრაფიტიზებულ ფოლადში ნახშირბადის გარკვეული რაოდენობა გრაფიტის სახითაა გამოყოფილი. გრაფიტი ფოლადის სტრუქტურაში მიიღება პერლიტში შემავალი ცემენტიტის ნაწილობრივი დაშლით ნაკეთობის ხანგრძლივი მოწვის პროცესში. ამიტომ გრაფიტიზაციისათვის განკუთვნილი ფოლადი ნახშირბადისა და სილიციუმის გაზრდილ რაოდენობას ($1,5-2,0\%C, 1-2\%Si$) უნდა შეიცავდეს, რაც ხელს უწყობს გრაფიტიზაციის პროცესს. გამოყოფილი წერილი, ბუდობრივი გრაფიტის ჩანართები საპოხი ნივთიერების როლს ასრულებს და კარგად აკავებს შემზეთ მასალას, რაც ცვეთას მნიშვნელოვნად ამცირებს. თუ ასეთ ფოლადს საგრაფიტიზაციო მოწვის შემდეგ ვაწრობთ, ზემოთ აღნიშნულ თვისებებს მაღალი სისაღეც დაემატება, რაც საბოლოოდ მეტად მაღალ ცვეთამდებობას განაპირობებს.

გრაფიტიზებული ფოლადი წარმატებით გამოიყენება გაზრდილი წნევისა და ცვეთის პირობებში მომუშავე დეტალების, მაგალითად, ცივი შტამპების, კალიბრების, მუხლუხის ნაწილების, სხმული მუხლა ლილვებისა და კბილანების დასამზადებლად.

ჰიდროტექნიკაში გამოყენებული მასალები ძირითადად კავიტაციურ რღვევას განიცდის. კავიტაციურ რღვევას განაპირობებს ლითონის ზედაპირზე სითხის ჭავლის ზემოქმედება. სითხის ჭავლში წარმოიქმნება მასში გახსნილი და შემდგომში გამოყოფილი აირებით სავსე ბუშტუკები. დიდი სიჩქარით მოძრავი სითხის ნაკადის გზაზე არსებული წინაღობის უბნებში წნევა შეიძლება ისეთ სიდიდემდე დაეცეს, რომელიც მოცემულ ტემპერატურაზე ორთქლწარმოქმნას შეუწყობს ხელს. წარმოქმნილი ორთქლი შეავსებს სიცარიელეს სითხეში. ორთქლის შემცველი ბუშტუკები სითხის ნაკადთან ერთად გადაადგილდება და მაღალი წნევის ზონებში ხვდება. კავიტაციურ რღვევას აადვილებს ასევე ნაკადში შეტაცებული ჰაერი. შემდგომში ორთქლი კონდენსირდება, ხდება ნაკადის მთლიანობის აღდგენა და სითხე წარმოქმნილ სიცარიელეებში უდიდესი სიჩქარით იწყებს დინებას.

მრავალჯერადი ჰიდრავლიკური დარტყმები მიკროუბნებში იწვევს სიმტკიცის კარგვას, წარმოიქმნება მიკრობზარები და რღვევის კერები. კავიტაციურ რღვევაზე ძლიერ ზემოქმედებას ახდენს კოროზიული პროცესები, თუმცა რღვევის ძირითადი

მიზეზი მაინც მასალის არასაკმარისი სიმტკიცეა.

მილგაყვანილობებში ტურბულენტური მოძრაობისას წარმოიქმნება აგრეთვე სხვადასხვა სიხშირის ბგერითი ტალღები, რომლებიც დამატებით უწყობს ხელს კავიტაციურ რღვევას, განსაკუთრებით იმ ადგილებში, სადაც წარმოქმნილია ნგრევის კერები.

კავიტაციური რღვევის მექანიზმიდან გამომდინარე, ჰიდროტექნიკაში ისეთი საკონსტრუქციო მასალები გამოიყენება, რომლებიც ხასიათდება თვისებათა კარგი შეხამებით: კოროზიამდევობით, მაღალი სიმტკიცით და პლასტიკურობით. კავიტაციური ცვეთამდეგი ფოლადებიდან უპირატესად 30X10Г10 და 08X1810T ფოლადები გამოიყენება. მათი სტრუქტურა არამდგრადი აუსტენიტია.

10.2. კოროზიამდეგი ფოლადები

ლითონების რღვევას საექსპლუატაციო არის ქიმიური ზეგავლენით კოროზია ეწოდება. კოროზიული მოვლენები და მასთან ბრძოლა საერთაშორისო პრობლემაა.

ქიმიური შედგენილობის მიხედვით კოროზიამდეგი (უჟანგავი) ფოლადები ორ ჯგუფად იყოფა: ქრომიანი და ქრომნიკელიანი.

ქრომიანი უჟანგავი ფოლადი ძირითადად ლეგირებულია ქრომით, რომლის რაოდენობა 12%-ს უნდა აღემატებოდეს. ასეთი ფოლადი მდგრადია ატმოსფეროში, ზღვის წყალში, მრავალ მუავასა და ტუტეში.

რაც მეტია ქრომიან უჟანგავ ფოლადში ნახშირბადი, მით მაღალია მექანიკური სიმტკიცე, მაგრამ კოროზიული მედეგობა მცირდება.

12X13 და 20X13 ფოლადებისგან მზადდება ჰიდრაულიკური და ორთქლის ტურბინების თათები, ჰიდრაულიკური ტუმბოების სარქველები, ნავთობის გადასამუშავებელი აპარატურის დეტალები და ა.შ.

ნიკელი მეტად მაღალი უჟანგაობით ხასიათდება. რკინასთან შედნობისას აუმჯობესებს მის კოროზიულ მედეგობას, მაგრამ განსაკუთრებით დადებით თვისებებს იჩენს მაღალქრომიან ფოლადში ($Cr > 12\%$). ამ ჯგუფის ტიპური წარმომადგენელია 12X18H9T და 17X18H9T ფოლადები.

ნიკელის შემცველი უჟანგავი ფოლადები საკმაოდ ძვირად ღირებულია, ნიკელის კარგი და იაფი შემცველია მანგანუმი. ქრომნიკელიანი და ქრომმანგანუმიანი ფოლადებისგან ძირითადად ამზადებენ ჰიდრო და ორთქლის ტურბინების ნიხებს,

ნაკეთობებს ტენიანი ატმოსფეროს, მდინარის წყლისა და აზოტის მჟავას ხსნარების გარემოში ექსპლუატაციისათვის.

ქრომნიკელიანი მოლიბდენით ლეგირებული ფოლადები ისეთი ნაკეთობების დასამზადებლად გამოიყენება, რომელთა სამუშაო გარემო ზღვის წყალია. უმოლიბდენო ქრომნიკელიანი ფოლადები ასეთ გარემოში წერტილოვან კოროზიას განიცდის.

10.3. შენადნობები ატომური ენერგეტიკისათვის

ლითონები, რომლისგანაც ატომურ რეაქტორებს ამზადებენ, სხვადასხვა ელემენტარული ნაწილაკის ზემოქმედებას განიცდის, რომლებიც რეაქტორის მუშაობის პროცესში წარმოიქმნება. ეს ნაწილაკები, განსაკუთრებით ჩქარი ნეიტრონები, ღრმად აღწევს მასალაში, ჩაინერგება კრისტალურ გისოსში და ცვლის ლითონის თვისებებს. ნეიტრონს ელექტრული მუხტი არ გააჩნია და არ ურთიერთქმედებს არც ელექტრონებთან, არც პროტონებთან, ამიტომ შეჯახებისას აგდებს ძირითადი ლითონის ატომს რეგულარული მდგომარეობიდან. ამ უკანასკნელმა, თავის მხრივ, შეიძლება ამოაგდოს მისი მოძრაობის გზაზე განთავსებული სხვა ატომებიც. გამოთვლებით ნაჩვენებია, რომ ასეთი მექანიზმით ერთმა ნეიტრონმა შეიძლება წონასწორული მდგომარეობიდან გამოიყვანოს 300-მდე ატომი ალუმინში.

დეფექტები წარმოიქმნება აგრეთვე მასალაში თერმული პიკების გაჩენითაც. ნეიტრონების ენერგიის გარკვეული ნაწილი ატომების ცალკეული ჯგუფების დრეკადი რხევების აგზნებაზე იხარჯება. ეს კი მცირე მოცულობაში ტემპერატურის მკვეთრ, ლოკალურ მატებას იწვევს. პროცესს თან სდევს სითბოს სწრაფი გაბნევა ლითონის მოცულობაში სითბოგადაცემის გზით, რაც ამ უბნების წრთობას განაპირობებს. ამგვარად, ნეიტრონების დასხივებით კრისტალური გისოსი მნიშვნელოვნად მახინჯდება.

დეფექტების წარმოქმნა აძნელებს დისლოკაციების გადაადგილებას ანუ ლითონი მტკიცდება. ასე, მაგალითად, ატომგულური დასხივება უბრალო ფოლადის სიმტკიცეს 1,5–2-ჯერ ზრდის; დაახლოებით ამდენჯერვე მცირდება მისი პლასტიკურობისა და სიბლანტის მახასიათებლები. ისეთ ლითონებში, რომლებსაც წინასწარ აქვს ჩატარებული განმტკიცების ოპერაციები (ცივჭედვა, წრთობა), ატომგულური განმტკიცების ეფექტი სუსტად მუდგანდება.

დასხივების შედეგად შეიძლება წარმოიქმნას ახალი ელემენტის ატომები ნეიტრონის დაყოფის ან ძირითადი ლითონის მიერ მისი წატაცების გზით. აქედან გა-

მომდინარე, ხანგრძლივი დასხივების შედეგად სუფთა ლითონი შეიძლება შენადნობად გადაიქცეს, როდესაც მისი ატომების ნაწილი სხვა ელემენტის ატომებად გარდაიქმნება.

დასასრულ, ნეიტრონებით დასხივების შემდეგ ლითონი ხდება რადიოაქტიური და ჯანმრთელობისათვის საშიში.

10.3.1 საკონსტრუქციო მასალები

ატომურ ელექტროსადგურებში გამოყენებული ძირითადი ლითონის-ბირთვული საწვავის გარდა, არანაკლები მნიშვნელობა ენიჭება როგორც საეკრანო მასალებს, რომელთა დანიშნულებაა მომსახურე პერსონალის დაცვა გამჭოლი რადია-ციისგან, ისე ნეიტრონების შემნელებლებს და ამრეკლი და მარეგულირებელი ღეროების მასალებს. სწორედ მათი დახმარებით იმართება ჯაჭვური რეაქცია.

მომწამლავი ნაწილაკებისა და გამა-გამოსხივებისაგან ადამიანს ყველაზე საიმედოდ ტყვიის ფურცლისგან დამზადებული ეკრანი იცავს, მაგრამ ნეიტრონებისათვის იგი დაბრკოლებას არ წარმოადგენს. ნეიტრონების ძლიერ შთანთქმელს კადმიუმის, ჰაფნიუმისა და გადოლინიის ატომები მიეკუთვნება. ამ ლითონების თხელი ფირფიტა გზას უღობავს თითქმის ყველა ნეიტრონს. მათგანვე შეიძლება დამზადდეს მარეგულირებელი ღეროებიც და ატომურ რეაქტორში ავარიული დაცვის მოწყობილობაც.

ჯაჭვური რეაქცია კონტროლიდან რომ არ გამოვიდეს და რეაქტორი არ აფეთქდეს, მარეგულირებელ ღეროებს იყენებენ. მათ ისეთი ლითონებისგან ამზადებენ, რომლებიც ძლიერ შთანთქავს ნეიტრონებს. როდესაც ეს ღეროები სრულად არის შეყვანილი რეაქტორში, ჯაჭვური რეაქცია ვერ განვითარდება, რადგან ნეიტრონების უდიდესი ნაწილი შთანთქმება ამ ღეროების მასალის ატომების მიერ. რეაქციის დასაწყებად ღეროებს საჭირო დონემდე გამოსწევენ. ღეროების მდებარეობას რეაქტორში სპეციალური ავტომატური მოწყობილობა არეგულირებს.

ბერილიუმი არ შთანთქავს ნეიტრონებს. იგი ანელებს მათ მოძრაობას, ირეკლავს და უკან აბრუნებს რეაქტორის აქტიურ ზონაში. ეს მნიშვნელოვნად ამცირებს რეაქტორის აქტიური ზონის ზომებს, ზრდის მუშა ტემპერატურას და ატომური საწვავის გამოყენების ეფექტურობას. აქვე განსაკუთრებით აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ ბერილიუმი 17-ჯერ უფრო გამჭვირვალეა რენტგენისა და კათოდური სხივების მიმართ ალუმინთან შედარებით. ამიტომ იგი საუკეთესო „ფანჯარა“ რენტგენის

აპარატებში. რადგან ბერილიუმი ანელებს ნეიტრონებს, სწრაფი ნეიტრონების რეაქტორებში ამრეკლად მისი გამოყენება არ შეიძლება. ამ შემთხვევაში ამრეკლის როლს ცირკონიუმი ასრულებს.

ცირკონიუმის გასაოცარი „გულგრილობა“ ნეიტრონების მიმართ თეორეტიკოსების მიერ ჯერ კიდევ 1947 წელს იყო ნავარაუდევო, თუმცა ატომური სადგურებისათვის მნიშვნელოვან მასალად უცბად არ ქცეულა. ამის მიზეზი იმაში მდგომარეობს, რომ ცირკონიუმს აქვს ქიმიური ორეული – ჰაფნიუმი, რომელიც ცირკონიუმისაგან ქიმიური თვისებებით არ განსხვავდება, მაგრამ ნეიტრონების დიდი შთანთქმელია. ჰაფნიუმი ბუნებაში ცირკონიუმს თან სდევს და მისი ცალკე ელემენტად გამოყოფა ძნელია. ამ ამოცანის გადაჭრის შემდეგ ცირკონიუმის წარმოება მსოფლიოში 1949 წლიდან 1959 წლამდე ათჯერ გაიზარდა. ეს არც არის გასაკვირი, რადგან მაღალი დნობის ტემპერატურასთან ერთად (1850°C) ცირკონიუმი კოროზიის მიმართ კარგი მდგრადობით გამოირჩევა. თვისებათა ასეთი შეხამება ცირკონიუმს შეუდარებელ მასალად ხდის ატომური ძრავების სხვადასხვა კონსტრუქციული ელემენტის დასამზადებლად. ცირკონიუმისგან ამზადებენ „სამოსს“ ურანის ფირფიტების ან ცილინდრების კოროზიისაგან დასაცავად ატომურ რეაქტორებში.

ამგვარად, ატომურმა ტექნიკამ ზოგიერთი დეტალის დასამზადებლად ისეთი თვისებების მქონე მასალები მოითხოვა, რომლებსაც ვერ ვხვდებით ტექნიკის სხვა სფეროებში. ამ შემთხვევაში საქმე ეხება ისეთ უმთავრეს მახასიათებლებს, როგორიცაა ატომგულის უნარი შთანთქას თბური ნეიტრონები და პირიქით. მასალის ეს თვისებებურება ფართო დიაპაზონში იცვლება, რაც კარგად ჩანს 10.1 ცხრილში წარმოდგენილი მონაცემებიდან.

როგორც ცხრილში ჩანს, ნეიტრონული გამოსხივებისაგან ეფექტური დაცვა შეიძლება განხორციელდეს იმ ეკრანებით, რომლებიც დამზადებული იქნება ცხრილის მარჯვენა მხარეს განთავსებული ელემენტებისაგან (Hf, B, Cd). დანარჩენები შეიძლება გამოვიყენოთ, როგორც საკონსტრუქციო მასალები რეაქტორებისათვის, თუმცა, დაბალი დნობის ტემპერატურის გამო, ამ მიზნით ალუმინი და მაგნიუმი ხშირად მიუღებელია.

ატომის ისეთი თვისება, როგორიცაა წატაცების განივკვეთის ფართობი, არ არის დამოკიდებული მასალის მდგომარეობაზე, ამიტომ ბერილიუმი ატომურ მრეწველობაში გამოიყენება როგორც სუფთა ლითონის, ისე ჟანგბადთან, ნახშირბადთან

ცხრილი 10.1

თბური ნეიტრონების წატაცების ეფექტური განივკვეთი და ზოგიერთი
ლითონის დნობის ტემპერატურა

თვისება	Be	Mg	Zr	Al	Fe	Ni	Hf	B	Cd
თბური ნეიტრონების წატაცების ეფექტური განივკვეთი, ბარნი (10^{-24} სმ ²)	0,01	0,063	0,18	0,23	2,4	4,5	115	720	2400
დნობის ტემპერატურა, °C	1280	651	1845	660	1539	1455	2130	2000	321

და წყალბადთან (ოქსიდები, კარბიდები და ჰიდრიდები) ნაერთების სახით. მაღალი დნობის ტემპერატურისა და კოროზიამდებობის წყალობით ბერილიუმს იყენებენ ატომური საწვავის ღეროების მიტკეცისთვისაც. თუმცა მისი მეტისმეტად მაღალი ღირებულება ზღუდავს გამოყენების მასშტაბებს. ამჟამად იგივე მიზნებისათვის დიდი წარმატება პოვა შედარებით იაფმა მასალამ – ცირკონიუმმა.

წატაცების მცირე განივკვეთის ფართობის, დნობის მაღალი ტემპერატურის, პლასტიკურობისა და კარგი კოროზიული მდებობის გამო ცირკონიუმს უპირატესად თბოგამომყოფი ელემენტების დანაფარებისა და მიღების სახით იყენებენ.

ცირკონიუმს აქვს ორი ალოტროპიული სახესხვაობა: α – მჭიდრო ჰექსაგონური გისოსით და β – სივრცით დაცენტრებული კუბური გისოსით. ალოტროპიული გარდაქმნის ტემპერატურა შეადგენს 862°C , $\sigma_{\text{მკ}}$ =200–400 მგპა, $\sigma_{0,2}$ =50–200 მგპა, δ =20–40%; HB 30-60 სისუფთავესა და სტრუქტურულ მდგომარეობაზე დამოკიდებულით. როგორც ჩანს, ცირკონიუმი მეტად რბილი და არამტკიცე მასალაა. ცირკონიუმის განმტკიცების ერთ-ერთი ხერხია ლეგირება (სიმტკიცე აღწევს 800-1000 მგპა-მდე, პლასტიკურობა კი მცირდება 3-5%-მდე). ცირკონიუმის ერთ-ერთი ყველაზე მტკიცე შენადნობია ცირკალი, რომელიც შეიცავს 0,5–1%Sn, 0,2%Fe და 0,3%Ni. ცირკონიუმის კოროზიული მდებობა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მის სი-სუფთავეზე. ნახშირბადისა და აზოტის მეასედი პროცენტებიც კი ამცირებს მის კო-როზიამდებობას, თუმცა ზოგიერთი დანამატი ანეიტრალებს მათ უარყოფით გავლენას. მაგალითად, ნიობიუმი – ნახშირბადის, ხოლო კალა – აზოტის ზეგავლენას.

10.3.2. თბოგადამტანები

ატომურ რეაქტორებში აქტიური თბომომოცვლისათვის დაბალი ღნობის ტემპერატურის მქონე ისეთი ლითონები გამოიყენება, რომლებიც ხასიათდება მაღალი სითბოგამტარობით წყალთან ან აირებთან შედარებით. რეაქტორის მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, თბოგადამტანებად ნატრიუმის, ბისმუტის და მისი შენადნობების გამოყენებაა შესაძლებელი.

ზოგიერთი ტიპის რეაქტორის თბოგადამტანებში გახსნილი უნდა იყოს ატომური საწვავი – ურანი. ამ პირობის დასაკმაყოფილებლად ირჩევენ დაბალი ღნობის ტემპერატურის მქონე ლითონს, რომელშიც ურანი იხსნება. ადვილდნობადი ელემენტებიდან ამ მიზნით ყველაზე მისაღებია ბისმუტი. მისი ღნობის ტემპერატურაა 271°C , ურანის ხსნადობის ზღვარი 900°C -ზე 12,3 ატმ.% შეადგენს, თბური ნეიტრონების წატაცების ეფექტური განივკვეთის ფართობი – 0,03 ბარნს ($1 \text{ ბარნი} = 10^{-24}$).

სავსებით შესაძლებელია სუფთა ბისმუტის ნაცვლად Pb-Bi სისტემის ევტექტიკის (43,5%Pb, 56,5%Bi) გამოყენებაც, რომლის ღნობის ტემპერატურაა 125°C . ტყვიის დამატებით მცირდება შენადნობის ღირებულება და იზრდება თხელდენადობა. მართალია, ურანის ხსნადობის ზღვარი და ნეიტრონების წატაცების უნარი რამდენადმე შემცირებულია, მაგრამ შენადნობის მახასიათებლები დასაშვებ ზღვრებში ჯდება.

თბოგადაცემის მილი ასევე ლითონისგან უნდა იყოს დამზადებული. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა აქვს გამდნარი ბისმუტისა ან Pb-Bi სისტემის ევტექტიკური შენადნობის ურთიერთქმედების ხარისხს მილის კედლებთან. ბუნებრივია, სხვადასხვა ლითონის მედეგობა აღნიშნულ გარემოში ერთმანეთისაგან განსხვავდება. მაგალითად, პლატინა, მანგანუმი, ნიკელი, სპილენძი და ალუმინი არამდგრადია, უბრალო არალეგირებული რკინა და ნახშირბადიანი ფოლადები უქანგავ ფოლადებთან შედარებით უფრო მაღალ ტემპერატურამდე ინარჩუნებს მდგრადობას (750°C), ხოლო ბერილიუმი და მოლიბდენი – 1000°C -მდე. ამგვარად, ჩვეულებრივი წარმოდგენები ლითონის კოროზიულ მედეგობაზე მოცემულ შემთხვევაში სავსებით მიუღებელია.

ზემოთქმულიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ ატომურ რეაქტორებში ატომის გახლეჩით გამოყოფილი სითბოს ეფექტური გამოტანა მიზანშეწონილია ადვილდნობადი ლითონების გამოყენებით, რადგან თავისი მახასიათებლებით ისინი მნიშვნელოვნად აღემატება ტრადიციულგამაცივებელ არეებს: ხასიათდება მაღალი

აორთქლების ტემპერატურით (რაზედაც, ბუნებრივია, მეტი სითბო დაიხარჯება) და ორთქლის დაბალი დრეკადობით (ანუ სისტემა მუშაობს დაბალი წნევის პირობებში და შესაძლებელია თხელკედლიანი მილების გამოყენება); აქვს მაღალი თბოგადაცემის კოეფიციენტი.

მსუბუქი ლითონებიდან თბოგადამტანებად გამოიყენება სუფთა ნატრიუმი ან მისი შენადნობი კალიუმთან (44%K). ასეთი შედგენილობის შენადნობი ოთახის ტემპერატურაზე თხევად მდგომარეობაშია, თუმცა მისი სითბოს გადაცემის კოეფიციენტი რამდენადმე დაბალია სუფთა ნატრიუმთან შედარებით.

სხვადასხვა ლითონის კოროზიამდევლობა და მდგრადობა ეროზიის მიმართ თხევადი ნატრიუმის გარემოში სხვადასხვაა. ნატრიუმში მაღალი მედეგობით ხასიათდება ნიკელი, ქრომი, მოლიბდენი, რკინა და ცირკონიუმი. ნაკლებად მდგრადია ტიტანი და უჟანგავი ფოლადი, ხოლო ნახშირბადიანი ფოლადი, ალუმინი და პლატინა საერთოდ გამოუსადეგარია. ტექნიკის თანამედროვე მოთხოვნებს ყველაზე სრულყოფილად აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადი და ცირკონიუმი აკმაყოფილებს.

10.3.3. ბირთვული საწვავი

ატომურ ენერგეტიკაში ბირთვულ საწვავად უმთავრესად ურანი (U), თორიუმი (Th) და პლუტონიუმი (Pu) გამოიყენება.

პლუტონიუმი ხელოვნური ელემენტია. მას მიწის ქერქი არ შეიცავს და ნეიტრონებით ურანის ბომბარდირების გზით ღებულობენ.

ურანი მოვერცხლისფრო ლითონია. მისი სიმკვრივეა 19,0 გ/სმ³ ანუ იგი ერთ-ერთი მძიმე ლითონთაგანია. ოთახის ტემპერატურაზე არ იჟანგება, 170⁰C-მდე გახურებისას იწყებს წვას. ურანის დნობის ტემპერატურაა 1132⁰C.

ურანს აქვს სამი ალოტროპიული მოდიფიკაცია: U_α ორთორომბული კრისტალური გისოსით, რომელიც მდგრადია 668⁰C-ის ქვემოთ; U_β ტეტრაგონური კრისტალური გისოსით; მისი მდგრადობის ტემპერატურული ინტერვალია 668–720⁰C; U_γ კუბური სივრცით დაცენტრებული გისოსით, რომელიც მდგრადია 720⁰C-ის ზემოთ.

ამგვარად, ურანში მიმდინარე გარდაქმნების ტემპერატურები ასეთია:

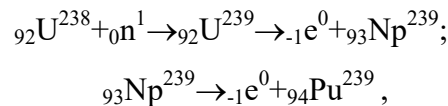
668⁰C (α↔β); 720⁰C (β↔γ); 1132 (γ↔L).

U-ში პრაქტიკულად არ იხსნება ის ელემენტები, რომლებიც მასში სხვადასხვა ნაერთის სახით არსებობს. U-ში კი ისინი მნიშვნელოვანი ხსნადობით ხასიათდება. ამიტომ, ურანის შენადნობების თერმული დამუშავება შესაძლებელია ან ჯერემდე გახურებისა და სწრაფი გაცივების გზით განხორციელდეს, რა დროსაც ფიქსირდება U-ს გადაჯერებული მყარი ხსნარი მარტენსიტული რეაქციით.

ურანი ხასიათდება შედარებით დაბალი მექანიკური თვისებებით: სისაღე HB 220; $\sigma_{0.2} \approx 360$ მგპა; ყურადღებას იმსახურებს ურანის მეტად დაბალი პროპორციულობის ზღვარი – მხოლოდ 20 მგპა. განსხვავება მარცვლების ორიენტაციაში, ზომებსა და სისუფთავეში დიდ როლს ასრულებს ურანის მექანიკურ და სხვა თვისებების დონეზე.

ურანის მექანიკურ თვისებებზე ძლიერ ზემოქმედებას ახდენს დასხივება. მაგალითად, ურანის ნიმუშები გარკვეული დოზით დასხივების შემდეგ კარგავს სიმტკიცის 1/4-ს საწყის მნიშვნელობასთან შედარებით, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება მცირდება 17-დან 0,36%-მდე, სისაღე იზრდება 220-დან 300 HB-მდე.

ურანი იმ სახით, როგორითაც ბუნებაში არსებობს, უკიდურეს შემთხვევაში, ორი იზოტოპის - ^{238}U (99,3%) და ^{235}U (0,7%) ნარევეს წარმოადგენს. ^{235}U იზოტოპის ატომის ბირთვის დაშლა განაპირობებს უზარმაზარი ენერგიის გამოთავისუფლებას. ^{235}U იზოტოპისგან განსხვავებით, ^{238}U ნეიტრონებით ბომბარდირების შედეგად არ იყოფა. ნეიტრონები წარიტაცება ^{238}U იზოტოპის მიერ და გარდაიქმნება ^{239}U იზოტოპად. ეს უკანასკნელი β ნაწილაკების დაკარგვის შედეგად გარდაიქმნება ნეპტუნიუმად (Np) ატომური ნომრით 93, ხოლო კიდევ ერთი β ნაწილაკის დაკარგვის შემდეგ წარმოქმნება პლუტონიუმი ატომური ნომრით 94:



სადაც ${}_{-1}^0\text{e}$ გამოსახავს შთანთქმულ ნეიტრონს, ხოლო ${}_{-1}^0\text{e}$ გამოთავისუფლებულ ელექტრონს. ეს რეაქცია საინტერესოა იმით, რომ პლუტონიუმი ექვემდებარება ნეიტრონებით დაყოფას ისევე, როგორც ${}^{235}\text{U}$ და მისი გამოყოფა ${}^{238}\text{U}$ -საგან უფრო ადვილია, ვიდრე ${}^{235}\text{U}$.

პლუტონიუმი, მიუხედავად დაბალი დნობის ტემპერატურისა (640°C), ხასიათ-

დება ექვსი ალოტროპიული მოდიფიკაციით: 119°C -ის ქვემოთ – α ; $119\text{--}218^{\circ}\text{C}$ – β ; $218\text{--}310^{\circ}\text{C}$ – γ ; $310\text{--}450^{\circ}\text{C}$ – δ ; $450\text{--}472^{\circ}\text{C}$ – η ; $472\text{--}640^{\circ}\text{C}$ – ϵ . პლუტონიუმი ერთადერთი ლითონია, რომელსაც ასე მრავალი ალოტროპიული სახესხვაობები აქვს.

თითქმის არცერთი ელემენტი არ იხსნება პლუტონიუმში, მათ შორის Mn, Fe, Ni, Be, Pb, V, Cr. ამიტომ, აღნიშნული ელემენტების მინარევები გავლენას არ ახდენს მისი პოლიმორფული გარდაქმნის ტემპერატურაზე.

როგორც ცნობილია, ყველა ლითონი გახურებისას ფართოვდება. პლუტონიუმის δ და η მოდიფიკაციები, პირიქით, გახურებისას იკუმშება.

პლუტონიუმი ნეიტრონებით დასხივების შედეგად იყოფა ენერგიის გამოყოფით. ამდენად, იგი U^{235} იზოტოპის შემცველია.

10.3.4. რადიოაქტიური ნარჩენები

რეაქტორის საწვავის ატომგულის დაყოფის შედეგად რამდენიმე ელემენტი წარმოიქმნება. ეს „ძვირფასი ნაცარი“ მეტად მაღალი რადიოაქტიურობით ხასიათდება. საკმარისია აღინიშნოს, რომ მისი ყოველი კილოგრამი გამოსხივების ინტენსიურობით ორი ტონა რადიუმის ტოლფასია.

რადიოაქტიური ნარჩენები თანამედროვე მეცნიერებაში გამოიყენება, როგორც გამჭოლი გამოსხივების წყარო. მათი საშუალებით მეურნეობენ სიმსივნეს, ასტეროიდებს წამლებსა და სამედიცინო პრეპარატებს. ქიმიკოსები და ბიოლოგები გამოსხივების წყაროს იყენებენ, როგორც „ნიშანდებულ ატომებს“, რომელთა წყალობითაც შესაძლებელი ხდება, მაგალითად, ცოცხალ ორგანიზმებში ქიმიური ნივთიერების გადაადგილების თვალყურის დევნება. რადიოაქტიური ნივთიერებები გამოიყენება ლითონის, ბეტონისა და სხვა გაუმჭვირი მასალების მასიური დეტალების გასაშუქებლად. ქიმიურ მრეწველობაში გამოსხივებით მრავალი ორგანული ნივთიერების პოლიმერიზაციას აჩქარებენ. სტრონციუმ-90 წარმატებით გამოიყენება ატომური ელექტრული ბატარეის წარმოებაში, რომელიც კოსმოსური რაკეტების, დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრების, ავტომატური მეტეოროლოგიური სადგურებისა და სხვა მოწყობილობების აპარატურას კვებავს. ქიმიური ბატარეა შეუფერხებლად მუშაობს არაუმეტეს ნახევარ წელს, ხოლო ატომური – არანაკლებ ხუთ წელს.

თავი XI

კომპოზიციური მასალები

11.1. ზოგადი დახასიათება და კლასიფიკაცია

კომპოზიციური მასალები ხვედრითი სიმტკიცით, სიხისტით, მხურვალმტკიცობით, დადლილობისადმი წინააღმდეგობით და სხვა თვისებებით მნიშვნელოვნად აღემატება ყველა ცნობილ საკონსტრუქციო მასალას.

კომპოზიციურს უწოდებენ რთულ მასალებს, რომელთა შედგენილობაში შედის თვისებებით ერთმანეთისგან მკვეთრად განსხვავებული, ერთმანეთში უხსნადი, საზღვრებით გამოყოფილი კომპონენტები.

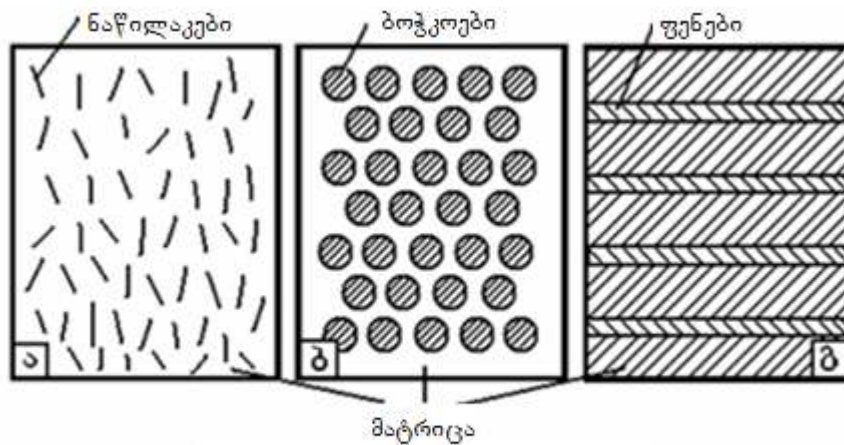
კომპოზიციური მასალის თვისებები დამოკიდებულია კომპონენტების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებსა და მათ შორის კავშირზე. მასალის თავისებურებაში ჩანს კომპონენტების არა უარყოფითი, არამედ დადებითი თვისებები.

კომპოზიციური მასალის ფუძე ანუ მატრიცა შეიძლება იყოს სუფთა ლითონი, შენადნობი ან პოლიმერი, ნახშირბადოვანი ან კერამიკული მასალები. მატრიცა აკავშირებს კომპოზიციას და ფორმას ანიჭებს. დანარჩენი კომპონენტები ანუ შემავესებლები მატრიცაში თანაბრად უნდა იყოს განაწილებული. რადგან მასალის განმტკიცებაში უმთავრეს როლს შემავესებელი ასრულებს, ხშირად მათ განმამტკიცებლებსაც უწოდებენ.

შემავესებლის ფორმის მიხედვით შეიძლება გამოვყოთ კომპოზიციური მასალების სამი ტიპი (სურ. 11.1): ნაწილაკებით დაარმატურებული (ა), ბოჭკოებით დაარმატურებული (ბ) და ფენოვანი (გ).

კომპოზიციური მასალების კლასიფიკაცია შესაძლებელია სხვადასხვა ნიშნითაც მოხდეს, მაგრამ პრაქტიკული მიზნებისათვის მიზანშეწონილია განვასხვაოთ:

1. დისპერსიულად განმტკიცებული კომპოზიციური მასალები;
2. ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალები;
3. კომპოზიციური მასალები არალითონურ ფუძეზე.



სურ. 11.1. კომპოზიციური მასალების სტრუქტურის სქემები

11.2. დისპერსიულად განმტკიცებული კომპოზიციური მასალები

დისპერსიულად განმტკიცებულ საკონსტრუქციო მასალებში განმამტკიცებელი ფაზის ნაწილაკების ზომა $1 \leq 10^{-5}$ სმ. თუ $1 \geq 10^{-4}$ სმ, მასალას ნაწილაკებით განმტკიცებულს უწოდებენ. დისპერსიულად განმტკიცებულ მასალებში განმამტკიცებლად გამოიყენება ძნელდნობადი ოქსიდების, ნიტრიდების, ბორიდებისა და კარბიდების დისპერსიული ნაწილაკები (Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC და ა.შ.). დისპერსიულად განმტკიცებულ კომპოზიციურ მასალებს ძირითადად ღებულობენ ფხვნილთა მეტალურგიით. ფხვნილთა მეტალურგია არის მეტალურგიის სფერო, რომელიც მოიცავს ფხვნილთა წარმოებას, მათ გადამუშავებას და კონსოლიდაციას (შემჭიდროებას, გაერთიანებას) მოცემული თვისებების მქონე ნაკეთობად.

ნახევარფაბრიკატებს ამზადებენ მატრიცისა და განმამტკიცებლის უწვრილესი ფრაქციების ნარევის დაწნეხით, შეცხობით, შემდგომი დეფორმაციითა და თერმული დამუშავებით. ნაკეთობის ექსპლუატაციის დროს ძირითად დატვირთვას მატრიცა ღებულობს, ხოლო განმამტკიცებელი მასალის დისპერსიული ნაწილაკები ამუხრუჭებს დისლოკაციებს ანუ ხელს უშლის პლასტიკური დეფორმაციის განვითარებას. რაც უფრო მეტია ეს წინააღმდეგობა, მით უფრო მაღალია მასალის სიმტკიცე. ნაწილაკების მინიმალური ზომა, რომელსაც ვერ ჭრის მოძრავი დისლოკაცია, $20-100\text{\AA}$ შეადგენს.

დისპერსიულად განმტკიცებული კომპოზიციური მასალები სტრუქტურის მაღალი ტემპერატურული სტაბილურობით ხასიათდება, რაც სიმტკიცის მახასიათებელი

ბის შენარჩუნების შესაძლებლობას იძლევა საკმაოდ ფართო ტემპერატურულ დიაპაზონში, მატრიცის დნობის ტემპერატურის (0,7–0,8) მნიშვნელობამდეც კი.

დისპერსიულად განმტკიცებულ კომპოზიციურ მასალებს, რომლებიც მრეწველობაში გამოიყენება, მიეკუთვნება ალუმინის ფუძეზე დამზადებული შეცხოვრილი ალუმინის პუდრა $CA\P$ ($CA\P-1$, $CA\P-2$, $CA\P-3$) და ნიკელის ფუძეზე დამზადებული კომპოზიტი.

$CA\P$ შენადნობებში განმამტკიცებელი ფაზაა ალუმინის ოქსიდი (Al_2O_3). შენადნობები ხასიათდება მაღალი სიმტკიცით ($\sigma_{\text{აქს}}=250-400$ მგპა), მხურვალმტკიცობით, კოროზიამდევობით და თერმული სტაბილურობით. $CA\P$ -ის ძირითადი უპირატესობა მქლავნდება მაღალ ტემპერატურაზე ($350-500^{\circ}C$), რა დროსაც სხვა მხურვალმტკიცე შენადნობები სწრაფად კარგავს სიმტკიცის მახასიათებლებს. $CA\P$ -ს არა აქვს მიდრეკილება ძაბვით კოროზიისადმი. მისგან მზადდება სხვადასხვა სახის 3-დან 5 მ-მდე სიგრძის პროფილი (მილები, ფურცელი და ა.შ.).

შემუშავებულია აგრეთვე კომპოზიციური მასალა შეცხოვრილი ალუმინის შენადნობების ფუძეზე (CAC), თუმცა ისინი მრეწველობაში არ გამოიყენება.

ნიკელის ფუძეზე დამზადებული დისპერსიულად განმტკიცებული კომპოზიციური მასალებია: $BDY-1$ და $BDY-2$. განმამტკიცებელი ფაზაა თორიუმის, ჰაფნიუმისა და იტრიუმის ოქსიდების ფხვნილები (მასით 5%-მდე). შემუშავებულია აგრეთვე ნიკელისა და ქრომის შენადნობების ფუძეზე დამზადებული კომპოზიტი $BDY-3$, რომელშიც განმამტკიცებელ ფაზად გამოიყენება ჰაფნიუმის დიოქსიდი. BDY მასალები უფრო მაღალი მხურვალმდევობით გამოირჩევა და მიზანშეწონილია მათი გამოყენება $1100-1200^{\circ}C$ -ზე. ნახევარფაბრიკატები ძელაკების ან ფურცლის სახით მზადდება.

11.3. ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალები

ბოჭკოვან კომპოზიციურ მასალებში განმამტკიცებელ ფაზად გამოიყენება სუფთა ლითონებისა და ძნელდნობადი ნაერთების (B , C , Al_2O_3 , SiC და სხვა) ბოჭკო ან უღვაშა (ძაფისებრი) კრისტალები, აგრეთვე Mo , W , Be , მაღალმტკიცე ფოლადის უწერილესი (რამდენიმე მეათედიდან ასეულ მიკრონამდე) მავთული. მატრიცას ალუმინი, მაგნიუმი, ნიკელი და მათ ფუძეზე წარმოებული შენადნობები წარმოადგენს. ბოჭკოვან კომპოზიციურ მასალებში ძირითად დატვირთვას ბოჭკო ღებულობს, ხო-

ლო მატრიცის როლი განისაზღვრება მიყენებული დატვირთვის ბოჭკოებზე თანაბარი განაწილებით.

ალუმინი-ბორი სისტემის კომპოზიციურ მასალაში (BKA-1) კარგად არის შეხამებული სიმტკიცისა და სიხისტის მაღალი მახასიათებლები კარგ ტექნოლოგიურობასა და კონსტრუქციულ საიმედოობასთან. ალუმინის დაარმატურება ბორის ბოჭკოთი სიმტკიცის მახასიათებლებს 10–20-ჯერ ზრდის. 20–500°C ტემპერატურულ ინტერვალში სიმტკიცისა და სიხისტის მახასიათებლებით იგი ალუმინის ყველა სამრეწველო შენადნობს აღემატება. BKA-1 მასალის მაღალი მადემპფირებელი უნარი უზრუნველყოფს კონსტრუქციების ვიბრომედევობას. მასალა გამოიყენება ტურბორეაქტორული ძრავების ვენტილატორის თათების, თვითმფრინავის ფრთების შემონაკერის, სიხისტის ელემენტებისა და ავიაკოსმოსური კონსტრუქციების გრძივი ძელის დასამზადებლად. ამერიკულ თვითმფრინავ, „ფანტომას“ მრავალი დეტალი ბორის ბოჭკოთი დაარმატურებული ალუმინის შენადნობისგანაა დამზადებული, რომლის წონა 60%-ით უფრო ნაკლებია გამოყენებული მასალის წონასთან შედარებით.

ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალებისათვის დამახასიათებელია თვისებათა ანიზოტროპიულობა (განსხვავებული თვისებები სხვადასხვა მიმართულებით გამოცდისას). მაგალითად, ტექნიკური ალუმინის ფუძეზე დამზადებული, ბორის ბოჭკოთი დაარმატურებული АД-1 კომპოზიციური მასალის სიმტკიცის ზღვარი ბოჭკოების მიმართულებით 1000–1200 მგპა ტოლია, ხოლო განივი მიმართულებით – 60–90 მგპა. ამ უარყოფითი თვისების შესამცირებლად საჭიროა მასალის მოცულობაში ბოჭკოების განლაგების ოპტიმალური ვარიანტის შერჩევა.

ინტენსიურად მიმდინარეობს სამუშაოები მაგნიუმის, ტიტანისა და ნიკელის ფუძეზე ახალი ტიპის კომპოზიციური მასალების შესამუშავებლად.

კომპოზიციურ მასალებს ასევე მიეკუთვნება ლითონური შეცხობილი მასალები. ისინი გამოიყენება ხახუნის მძიმე პირობებში მუშაობისას ($t_{\text{ხლ}} \leq 1200^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{მაქ}} \leq 6$ მგპა). ლითონურ შეცხობილ მასალებს აწარმოებენ რკინისა (ΦМК-8 და ΦМК-11) და სპილენძის (МК-5) ფუძეზე. გარდა ლითონური დანამატებისა (Sn, Pb, Ni და სხვა), რომლებიც უზრუნველყოფს სიმტკიცეს, კარგ სითბოგამტარობას და ცვეთადეგობას, შეიცავს აგრეთვე არალითონურ დანამატებსაც – აზბესტს, გრაფიტს, სილიციუმის ქანგს, ბარიტს.

რკინის ფუძეზე დამზადებული ფრიქციული მასალები, მაღალი სითბოგამტარობის გამო, ხახუნის კვანძებში შეხეთვის გარეშე მუშაობს, ხოლო სპილენძის ფუძეზე დამზადებული მასალები – შეხეთვის პირობებში.

11.4. კომპოზიციური მასალები არალითონურ ფუძეზე

ამ ჯგუფის კომპოზიციური მასალების უპირატესობას კარგი ტექნოლოგიურობა, დაბალი სიმკვრივე და, უმრავლეს შემთხვევაში, მაღალი ხვედრითი სიმტკიცე და სიხისტე წარმოადგენს. გარდა ამისა, არალითონურ ფუძეზე დამზადებულ კომპოზიციურ მასალებს ახასიათებს მაღალი კოროზიული მედეგობა, თბოდამცავი და საამორტიზაციო მახასიათებლები, ანტიფრიქციული და ფრიქციული თვისებები.

უარყოფით მხარეს მიეკუთვნება: ბოჭკოსა და მატრიცას შორის სუსტი კავშირი, სიმტკიცის მკვეთრი დაკარგვა $100-200^{\circ}\text{C}$ -ის ზემოთ და დაბალი ელექტროგამტარობა. შედუღებას არ ექვემდებარება.

ამ ჯგუფის კომპოზიციური მასალების დასახელება განმამტკიცებელი ბოჭკოს სახელწოდებიდან გამომდინარეობს. მაგალითად, ნახშირბადბოჭკოვანი, ბორბოჭკოვანი, მინაბოჭკოვანი.

არალითონურიკომპოზიციური მასალებიდან ყველაზე ფართო გავრცელება პოვა ეპოქსიდის ფუძეზე დამზადებულმა პოლიმერებმა. განმამტკიცებლად გამოიყენება მაღალმტკიცე ნახშირბადოვანი, ბორის, მინის და ორგანული ბოჭკოების ძაფი, ჩალიჩი (ჟგუტი) ან ლენტი. ეპოქსიდის მატრიცა ხასიათდება მაღალი მექანიკური თვისებებით -60 -დან 180°C ტემპერატურულ ინტერვალში, რაც კომპოზიციურ მასალას ანიჭებს მაღალი სიმტკიცის მახასიათებლებს კუმშვისა და ძვრის პირობებში. აქვს მცირე ჩაჯდომა, მყარდება დაბალ ტემპერატურაზე და არ მოითხოვს ნაკეთობის დამზადებისას დიდ წნევას. ეს კი განსაკუთრებით საყურადღებოა მაღალმტკიცე, მყიფე ბოჭკოებით დაარმატურებისას.

ყველაზე მაღალი სიმტკიცის მახასიათებლებით გამოირჩევა ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალა KMB-3K: $\sigma_{\text{აქს}}=1300$ მგპა, $\delta=3\%$. მას რამდენადმე ჩამოუვარდება კარბო ბოჭკოვანი კომპოზიტი KMY-1y: $\sigma_{\text{აქს}}=1020$ მგპა, $\delta=0,6\%$.

კომპოზიციური მასალების თვისებები ზოგჯერ უნიკალურია. მაგალითად ნიკელის ფუძეზე დამზადებული, ვოლფრამისა და მოლიბდენის ბოჭკოებით დაარ-

მატურებული მასალების ხანგრძლივი სიმტკიცე $1100-1200^{\circ}\text{C}$ -ზე ორჯერ მეტია ყველაზე მსურვალმტკიცე ნიკელის შენადნობებთან შედარებით; ნახშირბადის ძაფებით დაარმატურებული პლასტიკური მასა იძლევა კომპოზიტს, რომელიც ორჯერ ამცირებს თვითმფრინავის დეტალების წონას. მისგან ამზადებენ ვერტმფრენის ხრახნის ნიჰიან ფრთას, ლანჩერონს, კუდის ფრთასხმულობას, ფართო მოხმარების საგნებიდან – ჩოგანსა და ანკესის ჯოხებს.

კომპოზიციურ მასალებს მიეკუთვნება აგრეთვე ქაფმასალები. ქაფმასალებიდან ყველაზე ფართოდ გამოიყენება ქაფალუმიანი. საკმაო სიმკვრივის პირობებში იგი წყალზე ხუთჯერ მსუბუქია. მოჭიმული ქაფალუმინის სიმტკიცე ისეთივეა, როგორც სხმული ლითონისა, მაგრამ კუთრი წონა ორჯერ ნაკლებია ($\gamma=1,4$ გ/სმ³). ასეთი მასალა უკვე გამოიყენება არა მარტო ავიაციასა და სარაკეტო ტექნიკაში, არამედ სამოქალაქო მშენებლობაშიც. ქაფალუმიანი ადვილად იბურდება, იხეხება, იღებება, ეწებება, ირჩილება და დუღდება. ლურსმანი მასში ადვილად ესობა.

11.5. თბოღამცავი კომპოზიციური მასალები პოლიმერული მატრიცით

მრავალი საფრენი აპარატის ზედაპირი და ძრავა ხანმოკლე, მაგრამ მეტად ინტენსიურ თბურ ზემოქმედებას განიცდის. ზებგერითი სიჩქარით ზედაპირის გარშემოდენის შემთხვევაში სასაზღვრო ზონაში ტემპერატურა $3000-5000^{\circ}\text{C}$ აღწევს, ხოლო ექსტრემალურ პირობებში – მნიშვნელოვნად უფრო მეტს. ასეთ შემთხვევაში მსურვალმტკიცე შენადნობებიც კი სწრაფად ხურდება, შემოდნება და იწვის. შემონაკერის ზედაპირული ტემპერატურის შემცირების ერთ-ერთი ხერხია ე.წ. აბლაციური დანაფართო დაცვა. აბლაციას უწოდებენ მასალის რღვევას და მის თანდათანობით წატაცებას მაღალტემპერატურული აირის ჩქაროსნული ნაკადით.

აბლაციური თბოღამცავი დანაფარები ყველაზე ხშირად კომპოზიციურ პოლიმერების ფუძეზე. დაარმატურებულია მინისებრი და კვარციანი ბოჭკოებით, ხოლო შემავსებლად გამოყენებულია კერამიკისა და ზოგიერთი სპეციალური ნივთიერების დისპერსიული ფხვნილები.

აბლაციური რღვევა რამდენიმე მექანიზმით მიმდინარეობს. პირველს მიეკუთვნება მექანიზმები, რომლებიც ენდოთერმულ ეფექტს იძლევა:

- პოლიმერული შემავსებლის პიროლიზს;

– ნახშირბადის მეორეულ რეაქციას შემავსებლებსა და შემავსებლის სილიკატებთან;

– შემავსებლისა და შემაკავშირებლის პიროლიზებული კოქსის ნარჩენების დნობას, აორთქლებას და სუბლიმაციას.

აღნიშნული პროცესების დროს მიმდინარეობს თბური ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილის შთანთქმა, გაბნევა და გამოტანა ზედაპირულ ფენებში, აგრეთვე თბური ნაკადის შემცირება დანაფარის შიგა ფენებისა და მზიდი კონსტრუქციებისკენ.

მეორე მექანიზმს მიეკუთვნება რღვევა და ნაწილაკების წატაცება – მასალის ეროზია მიმწყდომი აირის ნაკადის მექანიკური ზემოქმედების შედეგად. ეს მოვლენა არასასურველია, რადგან იზრდება მასალის ხარჯი და მცირდება სითბოსგან დაცვის ეფექტურობა.

აბლაციის სტაციონარული რეჟიმის შემთხვევაში, თბოდამცავი მასალის დაბალი სითბოგადაცემის გამო, მის განიგვეთში დიდი ტემპერატურული გრადიენტი აღიძვრება. დანაფარის გარე ფენები იწყებს ინტენსიურ დაშლას. ასეთ პირობებში მასალის განიგვეთში შეიძლება სამი ზონა გამოიყოს, რომლებიც სხვადასხვა ხარისხით განიცდის ტემპერატურულ ზემოქმედებას და განსხვავებული ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების მიმდინარეობით ხასიათდება.

ზედაპირული ზონა, რომელიც უშუალოდ ეხება ჰაერის ნაკადს, რამდენიმე მილიმეტრის სისქისაა. შედგება შემაკავშირებლის ფორიანი კოქსის ნარჩენებისაგან, რომელიც ბოჭკოვანათი არის დაარმატურებული. აღნიშნული ზონის ზედაპირზე წარმოიქმნება მდნარი სილიკატური შემავსებლის თხელი ფენა და წვეთები, რომლებიც ჰაერის ნაკადით წარიტაცება. ნაღლობის ნაწილი ორთქლდება, ხოლო ნახშირბადი განიცდის გაზიფიკაციას. აღნიშნულ ენდოთერმულ რეაქციაზე ენერგიის დიდი რაოდენობა იხარჯება. ნაღლობში შეიძლება მიმდინარეობდეს აგრეთვე სილიკატების ნახშირბადთან მიერთება ენდოთერმული რეაქციით. რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი კარბიდები აძნელებს დანაფარის მექანიკურ წატაცებას.

მოსაზღვრე, ქვედა ზონაში ჰაერის დაბერვის შედეგად ზედაპირიდან მოხვედრილი პიროლიზის აირადი პროდუქტები ქმნის დამატებით თბოსაიზოლაციო შუაშრეს. კოქსი, რომელსაც აქვს უმაღლესი ხარისხის სიშავე, გარემომცველ არეში თბურ ენერგიას ასხივებს, ამიტომ მეორე დამცავ ზონაში თბური ნაკადის მოხვედრის შესაძლებლობა მნიშვნელოვნად შემცირებულია. თბოდამცავი მასალის ზედაპირზე ტემპერატურა 1600–2200⁰C აღწევს. მის სიდიდეს გაზიფიკაციის თვითდამყა-

რებული პროცესი განსაზღვრავს და დამოკიდებულია ზედაპირზე თბური ნაკადის პარამეტრებზე, მოსაზღვრე ფენაში აირის სიჩქარესა და წნევაზე, კოქსის ნარჩენებში ნახშირბადის რაოდენობასა და სხვა ფაქტორებზე.

დამცავი ზონახა სიათდება გარკვეული ტემპერატურული დონეებით (ჩვეულებრივ, $500-1600^{\circ}\text{C}$). ამ პირობებში შემავსებელი არსებით ცვლილებას არ განიცდის, შეინიშნება მხოლოდ შემაკავშირებლის პიროლიზის ენდოთერმული პროცესი. პიროლიზის მყარი, კოქსისებრი პროდუქტი შემავსებლის მეორეული შემაკავშირებლის როლს ასრულებს, რაც უზრუნველყოფს მასალის მექანიკურ სიმტკიცესა და მდებარეობას. ამიტომ, დამცავი ზონის თვისებებს ბევრად განსაზღვრავს თბოდამცავი დანაფარის მუშაობის უნარი და მისი წატაცების ხარისხი.

მესამე, მუშა ზონაში ტემპერატურა არ აღემატება გამოყენებული საკონსტრუქციო მასალის ხანგრძლივ თბომდებობას ($150-300^{\circ}\text{C}$), ამიტომ მისი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები დასაშვებ დონემდეა შენარჩუნებული.

ეფექტური თბოდამცავი მასალების შერჩევისას შემდეგი ძირითადი პირობები უნდა იყოს გათვალისწინებული: დაბალი თბოგადაცემა (პოლიმერებისათვის $\lambda=0,1-0,5$ კტ/მკ); დაბალი სიმკვრივე (თბოდამცავი დანაფარებისათვის პოლიმერის ფუძეზე $\gamma=1000-2000$ კგ/მ³); ოპტიმალურ ტემპერატურაზე კომპონენტების გაზიფიკაციის სრული სიბრტყის მაღალი მნიშვნელობა (იხ. ცხრილი 11.1); წარმოქმნილი კოქსის რაოდენობასა და პიროლიზის აირად პროდუქტებს შორის დაბალანსებული თანაფარდობა.

თბოდამცავი დანაფარების დასამზადებლად ეფექტურ მასალებს მიეკუთვნება მინა და აზბოპლასტიკი ფენოლფორმალდეჰიდური და სხვა თერმოსტაბილური შემავსებლებით; კომპოზიციური მასალები პოლიმერული მატრიცით (მინა, აზბო- და ნახშირბადპლასტიკები), რომლებიც საკონსტრუქციო მასალად გამოიყენება ანტენის გარსშემომდენებში, აგრეთვე საფრენი აპარატების კორპუსისა და ფრთების შემონაკერის დასამზადებლად.

ცხრილი 11.1

თბოდამცავი დანაფარებისათვის გამოყენებული მასალის კომპონენტების
ზოგადი თვისებები

მასალა	γ , კგ/მ ³	$t_{დნ}$, °C	გაზიფიკაციის სრული სითბო Q , კჯ/მოლი
გრაფიტი	1720	—	360
ბორის ნიტრიდი	2290	2700	790
ბერილიუმის ოქსიდი	2880	2820-2550	290
ალუმინის ოქსიდი	3800	2050	3270
სილიციუმის დიოქსიდი	2240	1700	865
ამონიუმის ქლორიდი	1530	—	205
ფთოროპლასტიკი-4	2250	—	175
პოლიეთილენი	950	130	15
პოლიამიდი	1150	250	60
ვოლფრამი	19000	3410	925
ბერილიუმი	1840	1285	355

მნიშვნელოვანია აღნიშნული მასალების თბოდამცავი თვისებები.

როდესაც შემონაკერის გარე შრეები 800–2000°C-მდე ხურდება, შიგა შრეებში ტემპერატურა არ იცვლება და შენარჩუნებულია სიმტკიცის საწყისი მაჩვენებლები (500–1000 მგპა მინატექსტოლიტებისათვის და 1500–2500 მგპა ორიენტირებული მინი-სა და ნახშირბადპლასტიკებისათვის).

ლიტერატურა

1. მ. ოქროსაშვილი. მეტალოგრაფია. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2008, გვ. 303;
2. მ. ოქროსაშვილი, გ. გოგოლაძე. მასალათმცოდნეობა. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2008, გვ. 262;
3. მ. ოქროსაშვილი, ნ. კენჭიაშვილი. ფერადი ლითონები და შენადნობები. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2012, გვ. 188;
4. А. П. Гуляев. Металловедение. М: «Металлургия», 1986, с. 541;
5. Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. Материаловедение. М: «Машиностроение», 1986, с. 383;
6. Р.К. Мозберг. Материаловедение. М: «Высшая школа», 1991, с. 447;
7. В.Н. Журавлев, О.И. Николаева. Машиностроительные сталию Справочник. М: «Машиностроение», 1981, с. 391.

შესავალი	3
თაზო I. ლითონების ატომურ-კრისტალური აგებულება	
1.1. ლითონების კლასიფიკაცია	4
1.2. ლითონის ატომის აგებულება	6
1.3. ლითონის კრისტალური აგებულება	
1.3.1. კრისტალური გისოსის ტიპები კრისტალებში	11
1.3.2. კრისტალური აღნაგობის დეფექტები	12
1.4. ატომთა შორის კავშირის ტიპები კრისტალებში	
1.4.1. ზოგადი მიმოხილვა	15
1.4.2. მოლეკულური კავშირი	16
1.4.3. კოვალენტური კავშირი	17
1.4.4. იონური კავშირი	19
1.4.5. ლითონური კავშირი	20
1.5. ლითონური კავშირით განპირობებული ზოგიერთი ფიზიკური თვისება	22
თაზო II. სუფთა ლითონების კრისტალიზაცია	
2.1. კრისტალიზაციის პროცესის ზოგადი მიმოხილვა	24
2.2. კრისტალიზაციის პროცესის მექანიზმი	25
2.3. კრისტალური წარმონაქმნის ფორმები. ფოლადის ზოდის აგებულება	27
2.4. მეორეული გარდაქმნები სუფთა ლითონებში	
2.4.1. ალოტროპიული გარდაქმნები	30
2.4.2. რკინის ალოტროპიზმი	32
2.5. მაგნიტური გარდაქმნა	33
თაზო III. ლითონის მექანიკური თვისებები	
3.1. ზოგადი მიმოხილვა	34
3.2. ლითონის მექანიკური თვისებების მახასიათებლები	
3.2.1. სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მახასიათებლები	35
3.2.2. დარტყმითი სიბლანტე	36
3.2.3. სისაღე	37
3.3. ციკლედა და რეკრისტალიზაცია	39
თაზო IV. შენადნობთა აგებულება	43
4.1. მიკრომექანიკური ნარევი	43
4.2. ქიმიური ნაერთი	44
4.3. მყარი ხსნარი	45
თაზო V. რკინა-ნახშირბადის შენადნობები	47
5.1. რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამა	

5.1.1. ძირითადი კომპონენტების დახასიათება -----	47
5.1.2. რკინა-ნახშირბადის შენადნობთა სისტემის მდგომარეობის დიაგრამის ანალიზი -----	48
5.1.3. ფაზები და სტრუქტურული შემდგენები რკინა-ნახშირბადის შენადნობებში -----	53
5.2. ნახშირბადიანი ფოლადი	
5.2.1. ფოლადის სტრუქტურა და თვისებები -----	54
5.2.2. მუდმივი მინარევები ფოლადში -----	55
5.2.3. ნახშირბადიანი ფოლადის კლასიფიკაცია -----	56
5.2.4. საკონსტრუქციო ფოლადი -----	56
5.2.5. საიარაღო ფოლადი -----	58
5.2.6. საავტომატე ფოლადი -----	59
5.3. თუჯი -----	59
5.3.1. თეთრი თუჯი -----	59
5.3.2. რუხი თუჯი -----	60
5.3.3. მაღალი სიმტკიცის და ჭედადი თუჯები -----	61
5.3.4. თუჯების ნიშანდება -----	62
5.3.5. თუჯის სტრუქტურასა და თვისებებს შორის კავშირი -----	63
5.3.6. თუჯის გამოყენება -----	64
თავი VI. ლითონის თერმული დამუშავება -----	66
6.1. მოწვა -----	66
6.1.1. პირველი გვარის მოწვა -----	66
6.1.2. მეორე გვარის მოწვა -----	68
6.2. ფოლადის წრთობა -----	70
6.2.1. აუსტენიტის დაშლა -----	70
6.2.2. წრთობის რეჟიმის შერჩევა -----	73
6.3. მოშვება -----	74
თავი VII. ლეგირებული ფოლადი -----	76
7.1. მალეგირებელი ელემენტების გავლენა ფოლადის თვისებებზე -----	76
7.2. ლეგირებული ფოლადის კლასიფიკაცია და ნიშანდება -----	77
7.3. ლეგირებული ფოლადების გამოყენების ზოგიერთი სფერო -----	79
თავი VIII. შერადი ლითონები და შენადნობები	
8.1. ალუმინი და მისი შენადნობები	
8.1.1. ალუმინი. ალუმინის შენადნობების კლასიფიკაცია და ნიშანდება -----	82
8.1.2. ალუმინის სამსხმელო შენადნობები -----	83
8.1.3. დეფორმირებადი შენადნობები -----	85
8.1.4. გამოყენების სფერო -----	87
8.2. სპილენძი და მისი შენადნობები	
8.2.1. სპილენძი -----	88

8.2.2. სპილენძის შენადნობების კლასიფიკაცია და ნიშანდება	89
8.2.3. თითბერი	90
8.2.4. ბრინჯაო	91
თაზი IX. განსაკუთრებული ფიზიკური თვისებების მასალები	
9.1. განსაკუთრებული ელექტრული თვისებების მასალები	96
9.1.1. მაღალი ელექტროგამტარობის მასალები	96
9.1.2. სარჩილი	98
9.1.3. ზეგამტარები	100
9.1.4. საკონტაქტო მასალები	101
9.2. მაღალი ელექტროწინააღობის შენადნობები	103
9.3. ნახევარგამტარები	105
9.4. მაგნიტური მასალები	110
9.4.1. მაგნიტურბილი მასალები	111
9.4.2. მაგნიტურსალი მასალები	115
9.4.3. მაგნიტოპლასტი და მაგნიტოელასტი	118
9.4.4. განსაკუთრებული თვისებების მაგნიტური მასალები	119
9.4.5. არამაგნიტური მასალები	119
9.5. თბური და დრეკადი თვისებების შენადნობები	120
9.5.1. შენადნობები მოცემული თბური გაფართოების კოეფიციენტით	120
9.5.2. შენადნობები მუდმივი დრეკადობის მოდულით	123
9.6. შენადნობები განსაკუთრებული ელექტრული წინააღობით	124
9.7. მხურვალმედვეი და მხურვალმტკიცე შენადნობები	125
თაზი X. სპეციალური დანიშნულების მასალები	
10.1. ცვეთამედვეი მასალები	132
10.2. კოროზიამედვეი ფოლადები	134
10.3. შენადნობები ატომური ენერგეტიკისათვის	135
10.3.1. საკონსტრუქციო მასალები	136
10.3.2. თბოგადამტანები	139
10.3.3. ბირთვული საწვავი	140
10.3.4. რადიოაქტიური ნარჩენები	142
თაზი XI. კომპოზიციური მასალები	
11.1. ზოგადი დახასიათება და კლასიფიკაცია	143
11.2. დისპერსიულად განმტკიცებული კომპოზიციური მასალები	144
11.3. ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალები	145
11.4. კომპოზიციური მასალები არალითონურ ფუძეზე	147
11.5. თბოდაცავი კომპოზიციური მასალები პოლიმერული მატრიცით	148
ლიტერატურა	152

რედაქტორი ლ. მამალაძე

გადაეცა წარმოებას 04.03.2018. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 13.03.2018. ქაღალდის ზომა 60X84 1/8. პირობითი ნაბეჭდი თაბახი 9,5.

საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, კოსტავას 77

