

მეგრ შურაძე

ლითონური მასალების
განმტკიცების ზოგადი
საწყისები

თბილისი

2020

უაკ 669. 017

წიგნში მოკლედაა წარმოდგენილი ლითონური მასალების განმტკიცების საწყისები. განხილული და გაანალიზებულია სხვადასხვა ფაქტორის გავლენა დისლოკაციების წარმოქმნის პირობებზე; დისლოკაციების დამუხრუჭებისა და შენადნობების განმტკიცების ურთიერთკავშირი; ლითონების განმტკიცების მექანიზმი პლასტიკური დეფორმაციისას; დისლოკაციების დამუხრუჭება სტრუქტურის სხვადასხვა ელემენტით კრისტალურ გისოსში.

ნაშრომის მიზანია სპეციალისტებს „მოკლე ფორმით“ მიაწოდოს თანამედროვე წარმოდგენები სიმტკიცის მახასიათებლების ამაღლების გამომწვევი პროცესებისა და გამნტკიცების მექანიზმების შესახებ. ნაშრომი განკუთვნილია მასალათმცოდნეების, ლითონთმცოდნეების, თერმისტების, წნევით დამუშავებისა და ასევე მონათესავე დარგების სპეციალისტებისათვის. იგი დახმარებას გაუწევს ამ დარგების მეცნიერებს, უმაღლესი სასწავლებლების პედაგოგებს, სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

რედაქტორი - თეიმურაზ ნაშიჩაიშვილი - ბაქნ. მეცნ. დოქტორი

რეზენზენტი - არჩილ ბაჩაიშვილი ბაქნ. აკადემიური დოქტორი

გამოცემის რედაქტორი - სისანა თოდუა-ქარტოზია

კომპიუტერული უზრუნველყოფა - პაატა ქორაძისი

დიზაინერი - ვასილ შურაძის

წიგნი გამოიცა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით“.

გრანტი #SP-19-171

ISBN 978-9941-9678-4-9

© ო. შურაძე 2020

გამომცემლობა შპს „საჩინო“

შინაარსი

შესავალი	5
თავი I. ლითონებისა და შენადნობების განმტკიცება	9
1.1 ზოგადი მოთხოვნები ლითონებისა და შენადნობების განმტკიცების მიმართ	9
1.2 სიმტკიცის ფიზიკური ბუნება, ატომთშორისი ურთიერთქმედებები და სავარაუდო სიმტკიცე	15
1.3. ლითონების განმტკიცების მექანიზმები და მეთოდები	21
თავი II. მყარხსნარული განმტკიცება	24
2.1 კრისტალური გისოსის ძირითადი მახასიათებლები.....	24
2.2 მყარი ხსნარების წარმოქმნის პირობები	25
2.3 მყარხსნარული განმტკიცების საფუძვლები	27
2.4 მაღლეირებული ელემენტების გავლენა ფოლადის მექანიკურ მახასიათებლებზე	39
თავი III. დისლოკაციური და დისკლინაციური განმტკიცება	45
3.1 დისლოკაციების ზოგადი თვისებები	45
3.2 დისლოკაციების წარმოქმნა.....	51
3.3 მაღალი სისუფთავის მონოკრისტალების დეფორმაციული განმტკიცება	56
3.4 პოლიკრისტალური ლითონების პლასტიკური დეფორმაცია	66
3.5 ფრანკ-რიდის დისლოკაციის წყარო.....	71
3.6 დისლოკაციების დამუხრუჭების ფაქტორები და მათი ქმედების თავისებურებები.....	76
3.6.1 გისოსის ხახუნის ძაბვა (პაიერლს - ნაბაროს ძაბვა)	76
3.6.2 კოტრელის ატმოსფერო.....	81
3.6.3 სნუკის ატმოსფერო.....	84
3.6.4 სუძუკის ატმოსფეროები.....	86
3.6.5 დისლოკაციების დამუხრუჭება მარცვლებისა და სუბმარცვლების საზღვრებით	88

3.6.6 დისლოკაციების დამუხრუჭება მინარევი არალითონური ჩანართებით.....	91
3.6.7 დისლოკაციების დამუხრუჭება სხვა დისლოკაციებით .	92
3.6.8 დისლოკაციების ქმედება ვაკანსიებსა და კვანძთაშორის ატომებზე.....	93
3.7 დისლოკაციების დამუხრუჭებისა და შენადნობების განმტკიცების ურთიერთკავშირი.....	96
3.8 დისლოკაციების გავლენა მყარი სხეულების თვისებებსა და დისლოკაციებზე დაკვირვების მეთოდები	102
3.9 დისკლინაციები	108
თავი IV. დისპერსიული განმტკიცება	114
4.1 დისპერსიული განმტკიცების მექანიზმი	114
4.2 დისპერსიული განმტკიცება დეფორმირებადი გამონაყოფი ნაწილაკებით.....	116
4.3 დისპერსიული განმტკიცება არადეფორმირებადი გამონაყოფი ნაწილაკებით.....	119
4.4 მრავალფაზიანი სტრუქტურის დეფორმირების თავისებურებები.....	124
4.5.დისპერსიული განმტკიცების პრაქტიკული მნიშვნელობა	127
4.6. დისპერსიული განმტკიცება.....	129
თავი V. მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება	132
5.1 მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცების მექანიზმი	132
5.2 მარცვლის დაწვრილმანების გზები.....	147
თავი VI. ნანოკრისტალური მასალები	151
6.1 ნანოკრისტალური მასალების განმტკიცება	151
6.2 თანამედროვე ნანოტექნოლოგიების მიმართულებები და მიღწევები.....	156
დანართი 1.	164
დანართი 2.	166
დანართი 3.	167
ლექსიკონი	168
გამოყენებული ძირითადი ლიტერატურა	176

შესავალი

აღსანიშნავია, რომ თანამედროვე ტექნიკის განვითარებისთვის ახალი მაღალმტკიცე მასალები ცხოვრებისეულად აუცილებელია. კაცობრიობა თავისი არსებობის მანძილზე ეძიებდა მასალების სიმტკიცის გაუმჯობესების გზებს. დასაწყისში მას ემპირიული ხასიათი ჰქონდა. დღეისათვის კი მოძღვრება მასალების სიმტკიცეზე დიდი და მრავალდარგოვანია.

ახალი მტკიცე მასალებისა და მტკიცე კონსტრუქციების შესაბამისად აუცილებელია სხვადასხვა დარგის მეცნიერთა გაერთიანება. პროგრესული მასალების შესაქმნელად ერთობლივად იღწვიან ერთი თვალსაზრისით გაერთიანებული ფიზიკოსები, ქიმიკოსები, მასალათმცოდნეები, მექანიკოსები და სხვა დარგის მეცნიერები თუ კონსტრუქტორები.

უკანასკნელი საუკუნეების ტექნიკური გარღვევების მაგალითები მიუთითებს, რომ ისინი, ძირითადად, უკავშირდებიან მასალების ახალი სპეციალური თვისებების გამოვლენასა და მათ მიღებას. მაღალი სიმტკიცისა და განსაკუთრებული თვისებების მქონე მასალები განაპირობებს თანამედროვე და მომავლის განმსაზღვრელ, ცხოვრებისეულად მნიშვნელოვანი ისეთი დარგების დინამიკურ განვითარებას, როგორიცაა: მძიმე და მსუბუქი მრეწველობა, სოფლის მეურნეობა, მედიცინა, ქიმიური და სამხედრო მრეწველობა, ატომური ენერგეტიკა, სახმელეთო და საზღვაო ტრანსპორტი, ავიაცია და კოსმოსური ტექნიკა, სამთამადნო, გაზისა და ნავთობის მოპოვება-ტრანსპორტირება-გადამუშავება და სხვა. თანამედროვე ეპოქაში, ნებისმიერ სფეროში, საქმიანობისთვის ადამიანს შეუძლია

გამოიყენოს ლითონებისა და შენადნობებისაგან დამზადებული მოწყობილობები, ნაგებობები, სახმელეთო, საზღვაო, საჰაერო და კოსმოსური სატრანსპორტო საშუალებები და სხვ.

განმტკიცების დისლოკაციური მექანიზმები რეალიზდება კრისტალურ მასალებში. მათ საფუძვლად უდევს დისლოკაციების გამრავლების პროცესი, მათი სიმკვრივის ზრდა და დამუხრუჭება.

განმტკიცების არადისლოკაციური მექანიზმების ამოქმედება შესაძლებელია ბზარების გავრცელების მაღალი მუშაობის საკონსტრუქციო მოთხოვნებიდან გამომდინარე, ხშირად აუცილებელია ფოლადებისა და შენადნობების სიმტკიცის მახასიათებლების ამაღლება. მასალის მაღალი სიმტკიცე ზრდის დეტალების სამუშაო რესურსს და ამცირებს განივკვეთს, შესაბამისად კი - ლითონის ხარჯს. განმტკიცებულ მასალას ნაკლებპროგრესულ წინამორბედებთან შედარებით უნდა ექნეს იგივე ან გაუმჯობესებული თვისებები. ახალმა მასალამ თავისი კომპლექსური თვისებებით კონკურენცია უნდა გაუწიოს არსებულ, საკმაოდ კარგი თვისებების, მასალას. ახალი მასალის შემუშავების გარდუვალობის შემთხვევაში აუცილებელია თვისებათა იზოტროპულობის გათვალისწინებაც.

ახალი მასალის დამუშავებისას ლითონთმცოდნეებმა ისეთი ტექნოლოგიები უნდა შეიმუშაონ, რომ მასალის სიმტკიცის მახასიათებლების ზრდამ, იმავდროულად, არ გამოიწვიოს პლასტიკურობის, სიბლანტისა და რღვევის სიბლანტის მახასიათებლების დასაშვებზე მეტად შემცირება - ლითონის გამყიფება

თანამედროვე კონსტრუქციების, მანქანა-მოწყობილობების, ნაკლები მოცულობის და წონის, დეტალების დამზადება წარმოუდგენელია ჩვეულებრივი, სპეციალური თუ განსაკუთრებული ფიზიკური, ქიმიური, ფიზიკურ-ქიმიური, ფიზიკურ-მექანიკური, ელექტრული და სხვა კომპლექსური თვისებების მქონე ლითონური მასალების გარეშე. კავშირგამულობის, კომპიუტერული და ინფორმაციული ტექნიკისა თუ სხვა მრავალი ახალი დარგის პროგრესი დიდადაა დამოკიდებული, ე.წ., ახალი თაობის უნიკალური თვისებების მასალებზე. ისინი, ძირითადად, ნანოკრისტალურია და მათი თვისებები დამოკიდებულია მარცვლის გეომეტრიულ ზომეზე.

რეალური სამრეწველო ლითონები და შენადნობები მყარ მდგომარეობაში არ წარმოადგენენ კრისტალებს, სივრცეში მკაცრად განლაგებული ატომების წყობით. ისინი მარცვლოვანი აღნაგობის არიან. თითოეული მარცვალი ნებისმიერი ორიენტაციის ცალკე კრისტალია, რომლის კრისტალური გისოსი არაიდეალური წყობისაა და შეიცავს დეფექტებს - დისლოკაციებს, ვაკანსიებს, გარეშე მინარევების ატომებს, სუბმარცვლებს, უჯრედოვანი სტრუქტურის ელემენტებს და სხვ.

თანამედროვე მასალათმცოდნეობის ფუნდამენტურ ამოცანას წარმოადგენს მაღალი სიმტკიცის ლითონური მასალების მიღების ეფექტური ტექნოლოგიების დამუშავება, დადლილობისა და კოროზიის პრობლემების მინიმუმამდე დაყვანა და მასალის თვისებათა იზოტროპულობის მიღწევა სიმტკიცის მახასიათებლების ამაღლების პროცესების და განმტკიცების მექანიზმების კვლევების საფუძვლებზე. ჩვენს ამოცანას კი

წარმოადგენს პოლიკრისტალური ლითონური მასალების განმტკიცების მექანიზმების საწყისების სისტემატიზაცია, ანალიზი და განსახილველი მექანიზმების ძირითადი გავლენების აღწერა განმტკიცების პროცესებზე.

ნაშრომი წარმოადგენს მცდელობას გამარტივებულად აჩვენოს განმტკიცების მიკრომექანიზმები და მოდელები. ასახოს მათი გავლენა მასალების განმტკიცება-განუმტკიცებლობის პროცესებზე.

დიდი მადლიერებით მინდა აღვნიშნო ქალბატონ ცისანა თოდუა-კარტოზიას, თეიმურაზ ნამიჩეიშვილისა და არჩილ გაჩეილაძის საქმიანი, კეთილგანწყობილი თანამშრომლობა წიგნის რედაქტირებასა და რეცენზირებაში. დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო ერთგულ მეგობრებს: პაატა ქორქიას, ჯონი ალანასა და ირაკლი ლაგვილავას წიგნის გამოსაცემად გაწეული ტექნიკური დხმარებისთვის.

თავი I

ლითონებისა და შენადნობების განმტკიცება

1.1 ზოგადი მოთხოვნები ლითონებისა და შენადნობების განმტკიცების მიმართ

ტექნიკის მოთხოვნები საკონსტრუქციო მასალების თვისებების მიმართ მუდმივად მზარდი და განსაკუთრებულია. მაღალ სიმტკიცესა და პლასტიკურობასთან ერთად, მათ უნდა ახასიათებდეს დარტყმითი დატვირთვებისადმი წინააღმდეგობის, სიბლანტის, ნიშანცვლადი დატვირთვებისას - დაღლილობის წინააღმდეგობის, ხახუნის პირობებში მუშაობისას - ცვეთამედგობის, მყიფე რღვევისას - ბზარის გავრცელებისადმი წინააღმდეგობის მაღალი მახასიათებლები და კარგი კოროზიამედგობა.

მასალების მაღალი სიმტკიცე, სისალე და დრეკადობა კარგ პლასტიკურობასა და სიბლანტესთან შერწყმულია მხოლოდ ლითონებში. მექანიკური თვისებების ამ შესანიშნავი კომპლექსით აიხსნება მათი ფართოდ გამოყენება თანამედროვე ტექნიკაში. სიმტკიცის მოთხოვნილ პარამეტრებს, ამჟამად გამოყენებული თანამედროვე და უახლოეს მომავალში გამოსაყენებელი საკონსტრუქციო მასალებიდან, ყველაზე სრულად პასუხობენ ფოლადები და შენადნობები. მხოლოდ ისინი უხამებენ მექანიკური თვისებების მაღალ მაჩვენებლებს კარგ ტექნოლოგიურობას (კარგ საჩამომსხმელო თვისებებს, წნევით დამუშავებადობას, ჭრის მაღალ უნარს, კარგ შედუღებადობას) არადეფიციტურობას და შედარებით დაბალ ღირებულებას.

საკონსტრუქციო მასალებზე მოთხოვნების ანალიზი აჩვენებს, რომ მრეწველობის მრავალი დარგისათვის, დღეს და თვალსაწიერ მომავალში, ყველაზე გავრცელებულ საკონსტრუქციო მასალად ფოლადები და შენადნობები დარჩება. შესაბამისად, უშუალოდ პრაქტიკის მოთხოვნასა და პირველხარისხოვან ამოცანას წარმოადგენს მათი თვისებების კომპლექსური მახასიათებლების ამაღლება.

დადგენილია, რომ ფოლადებისა და შენადნობების სიმტკიცის მახასიათებლების ზრდა იმავდროულად ამცირებს მათ პლასტიკურობასა და სიბლანტეს. ამდენად, მასალის მხოლოდ სიმტკიცის ამაღლება არ უნდა იქცეს თვითმიზნად. რიგ შემთხვევებში, ლითონის მაღალმა სიმტკიცემ შესაძლოა უარყოფითი მოქმედებაც კი გამოიწვიოს. აღსანიშნავია, რომ სიმტკიცის ზღვრის ცალმხრივად გადიდება იწვევს გამძლეობის ზღვრის შემცირებას. სიმტკიცის ამაღლება აძნელებს დადლილობის ბზარების წარმოქმნას, მაგრამ, ამასთან, ამცირებს პლასტიკურობასაც, რაც მყიფე ლითონებში იწვევს ბზარის გავრცელების სიჩქარის ამაღლებას.

საინჟინრო პრაქტიკაში მომხდარი ავარიული რღვევების ნახევარზე მეტის მიზეზი დადლილობაა. მასალის გამძლეობის (დადლილობის) ზღვარი უშუალო კავშირშია მასალის სიმტკიცის ზღვართან:

მაგ., რკინის შენადნობებისათვის $\sigma_R = (0,4 - 0,6)R_m$ -ს, სპილენძის შენადნობებისთვის $\sigma_R = (0,3 - 0,5)R_m$ -ს, ხოლო ალუმინის შენადნობებისათვის - $\sigma_R = (0,25 - 0,4)R_m$ -ს.

ამ მოვლენებისა და მაღალმტკიცე მდგომარეობაზე თანამედროვე წარმოდგენების გათვალისწინებით, სიმტკიცე განი-

ხილება არა იზოლირებულად, არამედ სხვადასხვა დატვირთვისა და დატვირთვის სხვადასხვა სქემის პირობებში, მასალის დეფორმაციისადმი წინაღობასთან და ნაადრევ რღვევასთან კავშირში. ამდენად, კონსტრუქციის საიმედოობის ასამაღლებლად აუცილებელია ფოლადებსა და შენადნობებს, მაღალ სიმტკიცესთან ერთად, სიბლანტის, პლასტიკურობისა და ბზარმდეგეობის მაჩვენებლების მაღალი კომპლექსი გააჩნდეს.

კონსტრუქციაში მასალის საიმედოობა საკონსტრუქციო სიმტკიცით ხასიათდება. დეტალებში ყოველთვის არსებობს დეფექტები - ძაბვების კონცენტრატორები. მათი გავლენის შესამცირებლად აუცილებელია საკონსტრუქციო მასალები ხასიათდებოდეს მყიფე რღვევისა და ბზარის გავრცელებისადმი მაღალი წინაღობით. აქედან გამომდინარე, საკონსტრუქციო სიმტკიცე ხასიათდება არა სიმტკიცის ცალკე აღებული რომელიმე მაჩვენებლით, არამედ ნაკეთობის საექსპლუატაციო შესაძლებლობების განმსაზღვრელი მექანიკური თვისებების კომპლექსით.

შენადნობთა უმეტესობისათვის საკონსტრუქციო სიმტკიცის უმნიშვნელოვანესი პარამეტრებია: დენადობის ზღვარი $R_p^{0,2}$, ცივმეტეხობის ზღურბლი, ანუ სიმყიფის კრიტიკული ბლანტ-მყიფე გადასვლის ტემპერატურა ($T_{გრ}$), დარტყმითი სიბლანტის (KCU, KCV, KCT) დონე და ძაბვის ინტენსიურობის კოეფიციენტი (K_{1c}). შესაბამისად, საკონსტრუქციო ფოლადებისა და შენადნობების სხვადასხვა მექანიზმით განმტკიცების შედეგების შეპირისპირება უნდა მოხდეს არა მხოლოდ დენადობის ზღვრის ამაღლების (იგი ითვლება საანგარიშო მახასიათებლად), არამედ სხვადასხვაგვარი მექანიკური თვისებების კომპლექსის დონის გათვალისწინებით. ჯეიმს გორდონის მიხედ-

ვით, „საკონსტრუქციო მასალების ყველაზე მძიმე ცოდვა არა სიმტკიცის ან სიხისტის უკმარობაა, რომლებიც, რასაკვირველია, სრულიად აუცილებელია, არამედ სიბლანტის უკმარობა, სხვა სიტყვებით - ბზარის გავრცელებისადმი უკმარი წინააღმდეგობა. შეიძლება შეურიგდე სიმტკიცის ან სიხისტის უკმარობას და გაითვალისწინო ეს კონსტრუქციების პროცესში, მაგრამ ბევრად უფრო რთულია ებრძოლო ბზარებს, რომლებიც, თურმე, ძალიან საშიშია, რადგან უცაბედად წაადგება თავს ინჟინერს.“

სამომხმარებლო სივრცეში, ლითონურ მასალებზე მზარდი მოთხოვნების გამო, მეცნიერთა ინტერესი ფოლადებისა და შენადნობების სიმტკიცის პრობლემისადმი მუდმივად მატულობს. სამეცნიერო-საინჟინრო და საკონსტრუქტორო სიახლეები ლითონთმცოდნეებს უბიძგებს ახალი ტექნიკური იდეების გამოსავლენად, რის შედეგადაც მეცნიერება მასალების შესახებ მდიდრდება თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების ახალი მონაცემებით.

მასალების შესარჩევად (სიმტკიცის მახასიათებლების მოთხოვნების შესაბამისი დონის მიღწევის ტექნოლოგიური პროცესების შემუშავებისას) მნიშვნელოვანია სიმტკიცის ბუნების მეცნიერული საფუძვლების ცოდნა, კერძოდ - როგორ და რა დონეზე ფორმირდება სიმტკიცის მახასიათებლები. ამდენად, როგორც თანამედროვე, ისე ყველა დროის მასალათმცოდნეობის ფუნდამენტურ პრობლემას (მასალების სიმტკიცის ამაღლების პროცესებისა და განმტკიცების მექანიზმების კვლევების საფუძვლებზე) წარმოადგენს მაღალი სიმტკიცის მასალების მიღების ეფექტური ტექნოლოგიების შემუშავება. ფოლადებისა და შენადნობების განმტკიცების

მექანიზმებისა და სტრუქტურის წარმოქმნის პროცესებზე მათი კომბინირებული ზემოქმედების ცოდნა მექანიკური თვისებების მაღალი კომპლექსის მიღების საშუალებას იძლევა.

ზოგადად, მექანიკური, ქიმიური, თბური ან რადიაციული ზემოქმედებებით ლითონური მასალების განმტკიცება განიხილება როგორც სიმტკიცის მახასიათებლების პირობითად შეუქცევადი ამაღლება. პრაქტიკულად, განმტკიცების მექანიზმები იყოფა დისლოკაციურ და არადისლოკაციურ ჯგუფებად.

განმტკიცების დისლოკაციური მექანიზმები რეალიზდება კრისტალურ მასალებში. მათ საფუძვლად უდევს დისლოკაციების გამრავლების პროცესი, მათი სიმკვრივის ზრდა და დამუხრუჭება.

განმტკიცების არადისლოკაციური მექანიზმების ამოქმედება შესაძლებელია ბზარების გავრცელების მაღალი მუშაობით გამორჩეულ, ჰეტეროგენული სტრუქტურის, პოლიკრისტალურსა და ამორფულ მასალებში.

სხვადასხვა დროს სხვადასხვა მეცნიერის (რ. ციმერმანის, კ. გიუნტერის, ა. ბოჩვარისა და მ. ბერნშტეინის) მიერ მასალების განმტკიცების შემოთავაზებულ კლასიფიკაციას ან მიმართულებების ვარიანტებს საფუძვლად ედო როგორც განმტკიცების მექანიზმები, ისე განმტკიცებული მასალების მიღების მეთოდები. თუმცა აღსანიშნავია, რომ მარტივი ანალიზისას გამოვლინდა მათი მსგავსება ან განმეორებადობა. ამ საკითხის დასაზუსტებლად (განმტკიცების მექანიზმების საფუძველზე), შედგენილია განზოგადებული კლასიფიკაცია:

I. განმტკიცების დისლოკაციური მექანიზმების საფუძველზე რეალიზებული განმტკიცების ვარიანტები:

1. მყარხსნარული განმტკიცება;
2. დისპერსიული განმტკიცება;
3. დისპერსული განმტკიცება;
4. მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება;
5. კრისტალიზაციისას (მტკიცე მარცვალთშორისი ბადის წარმოქმნით) შენადნობების განმტკიცება;
6. დეფორმაციული განმტკიცება.

II. არადისლოკაციური მექანიზმების საფუძველზე რელიზებული განმტკიცების ვარიანტები:

1. არადისლოკაციური სტრუქტურის (მონოკრისტალური, ნანოკრისტალური და ამორფული მასალების) შექმნა;
2. კომპოზიციური მასალების შექმნა;
3. ტრანსფორმაციული განმტკიცება (კერამიკებში).

თეორიული საკითხები, ლითონური მასალების აღნაგობისა და დამუშავების შესახებ, განიხილება ისეთ ზოგად და სპეციალურ კურსებში, როგორიცაა მასალათმცოდნეობა, ლითონთმცოდნეობა, ლითონთა ტექნოლოგია, თერმული და ქიმიურ-თერმული დამუშავება და სხვ. ამდენად, წინამდებარე ნაშრომი განმტკიცების ზემომოყვანილი ვარიანტებიდან მხოლოდ ლითონებისა და შენადნობების, საკუთრივ, განმტკიცების მექანიზმებისა და მათი ფიზიკური არსის გარკვევის მცდელობაა.

მოკლედ გავეცნოთ მეცნიერულ ინფორმაციას ლითონური მასალების განმტკიცების პირობების შესახებ და სიმტკიცის ამაღლების ფიზიკურ საფუძვლებს.

1.2 სიმტკიცის ფიზიკური ბუნება, ატომთშორისი ურთიერთქმედებები და სავარაუდო სიმტკიცე

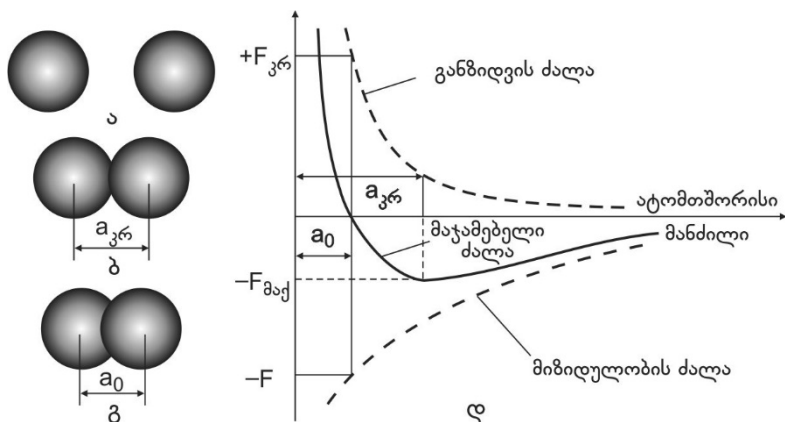
რეალური ტექნიკური მასალების სიმტკიცეზე გარეგანი ზემოქმედების (დატვირთვის სახის, ტემპერატურის, წნევის, სამუშაო არის და მათი მოქმედების დროის) გამორიცხვისას ლითონური მასალების სიმტკიცე განისაზღვრება ატომთა შორის ქიმიური ურთიერთქმედების ძალების დონით. ითვლება, რომ სიმტკიცე კრისტალში ატომებს შორის არსებული ქიმიური კავშირების რღვევის წინააღმდეგობაა. მაგრამ ასეთი მიდგომით ერთი და იმავე ლითონის (მისი დამზადების პირობებიდან გამომდინარე), სიმტკიცის სხვადასხვაობის ახსნა შეუძლებელია. მყარი ტანის ფიზიკის მონაცემებით, მასალების სიმტკიცის დონე, ქიმიურ შედგენილობასთან ერთად, პირდაპირ კავშირშია სტრუქტურის შინაგან სუბმიკროსკოპულ და მიკროსკოპულ აღნაგობასთან. ხშირად, სიმტკიცეზე ამ ფაქტორების გავლენა აღემატება ატომთშორისი ძალების გავლენას.

ნებისმიერ მყარ სხეულში ატომების ერთიან, მთლიან, სხეულად (კონტინუუმად) გაერთიანების მიზეზი ატომთშორისი ურთიერთქმედებაა. იდეალური კრისტალური აღნაგობის მონოკრისტალის მაგალითზე, ატომთშორისი ურთიერთქმედების ძალების სიმტკიცეზე უშუალო გავლენის შეფასება მხოლოდ თეორიულადაა შესაძლებელი. განვიხილოთ აზრობრივად ორი იზოლირებული ატომის ატომთშორისი ურთიერთქმედების (მიზიდულობის და განზიდვის) ძალების ატომთა შორის მანძილზე დამოკიდებულება. ეს ძალები წარმოიქმნება მყარი სხეულის შემადგენელი ატომების ბირთვებსა და ელექტრონებს შორის აღძრული ელექტრული ველების ურთიერთქმედებით.

სურ. 1-ის შესაბამისად, როდესაც ატომები ერთმანეთისგან უსასრულოდ დიდი (ატომური მასშტაბით) მანძილითაა დაშორებული, მათი ერთიერთეულოვანება გამოირიცხება (სურ. 1, ა). ატომების გარკვეულ მანძილზე მიახლოებისას, როდესაც ელექტრონების „ღრუბლები“ ერთმანეთს გადაფარავს (სურ. 1, ბ, გ), გადაფარვის ზონებში ელექტრონების სიმკვრივე მოიმატებს. ე.ი. გაჩნდება უარყოფითი მუხტი და მისი სიდიდე ამალდება. შედეგად, ატომების დადებითად დამუხტულ ბირთვებსა და ელექტრონების „ღრუბლებს“ შორის მიზიდულობის ძალა აღიმკვრება. იგი, a მანძილის გარკვეულ დონემდე შემცირებასთან ერთად, მატულობს (სურ. 1, გ). შედარებით ახლო მანძილზე ატომების მიახლოებისას, დადებითად დამუხტულ ბირთვებს შორის მიზიდვისა და განზიდვის ძალები ერთდროულად ამოქმედდებიან. ბირთვებს შორის მანძილის შემცირებასთან ერთად, მატულობს განზიდვის ძალის სიდიდე. ატომების კიდევ უფრო მიახლოებისას, ელექტრონებით შევსებული შიგა ელექტრონული გარსები იწყებენ ურთიერთქმედებას და განზიდვის ძალების გავლენა მკვეთრად იზრდება. ანუ ბირთვებს შორის მცირე მანძილებზე განზიდვის ძალა (+F) უფრო ინტენსიურად იზრდება, ვიდრე მიზიდულობის (-F) ძალა.

ამ ძალების შეჯამებით მიიღება ატომთშორისი ურთიერთქმედების, მათ შორის მანძილზე დამოკიდებულების, მაჯამებელი ძალა. ატომების a_0 მანძილზე დაახლოებისას ძალები წონასწორდება და ატომები კრისტალურ გისოსში მდგრად (წონასწორულ) მდგომარეობაში გადადიან (a_0 მანძილი მიღებულია კრისტალური გისოსის პარამეტრად). ატომებს შორის a_0 -ზე ნაკლებ მანძილზე ჭარბობენ განზიდვის ძალები (მაჯამებელი ძალა დადებითია). ატომების ერთმანეთისგან

a_0 -ზე მეტად დაშორებისას, მაჯამებელი მიზიდულობის ძალა ($-F$) დასაწყისში მატულობს. $a_{კრ}$ მანძილზე მაჯამებელი ძალა აღწევს მიზიდულობის მაქსიმალურ ($-F_{მაქ}$) სიდიდეს, ხოლო ატომების შემდეგი დაშორება მათ შორის მიზიდულობის ძალის შესუსტებას იწვევს (მის სრულ გაქრობამდე).



სურ. 1. ურთიერთქმედების F ძალების დამოკიდებულება ატომებს შორის a მანძილზე:

- ა - უსასრულოდ დიდ მანძილზე დაშორებული ატომები;
- ბ, გ - ატომების ელექტრონული „ღრუბლების“ გადაფარვა;
- დ - მიზიდულობის, განზიდვის და მაჯამებელი ძალების ხარისხობრივი დამოკიდებულება

ამრიგად, მიზიდულობის ძალა ხელს უწყობს ატომების შემჭიდროებას, განზიდვის ძალა კი, პირიქით, ხელს უშლის მას. როგორც წესი, ატომები კრისტალურ გისოსში ისეა განლაგებული, რომ ძალები წონასწორდება და ამ წონასწორობის დასარღვევად საჭიროა გარე ზემოქმედება. მიზიდულობის ($-F_{მაქ}$)

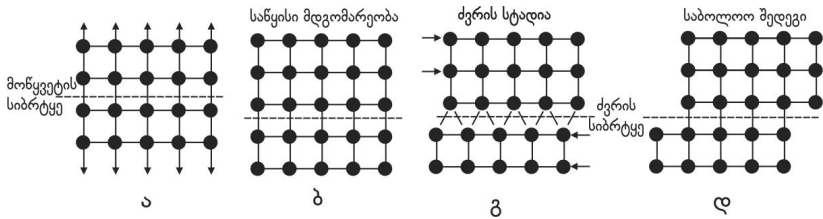
ძალას კოგეზიური სიმტკიცე, ანუ მოწყვეტაზე თეორიული სიმტკიცე ეწოდება. ცხადია, რაც უფრო მეტია მისი მნიშვნელობა მით მეტი სიდიდის გარე დატვირთვაა საჭირო ატომთშორისი მიზიდულობის ძალების გადასალახად და სხეულის მთლიანობის დასარღვევად.

განხილულ შემთხვევაში ნაჩვენებია აზრობრივად იზოლირებული მხოლოდ ორი ატომის, მათ შორის მანძილზე, ატომთშორისი ურთიერთქმედების ძალების უმარტივესი ხარისხობრივი დამოკიდებულება. რეალურად, მრავალატომიან სხეულში ატომებს შორის ურთიერთქმედების კანონები რთულია. პრაქტიკაში საქმე გვაქვს არა ცალკეულ ატომ(ებ)თან, არამედ მაკროსხეულის წარმომქნელი ატომების დიდ მდგრად ერთობლიობასთან. შესაბამისად, ატომებს შორის ურთიერთქმედება დამოკიდებულია: ატომების ელექტრონულ ადნაგობასა, მათზე გარემომცველი სხვა ატომების გავლენასა, ერთმანეთის მიმართ ატომების რხევით მოძრაობასა და მათ ურთიერთგანლაგებაზე სივრცეში (კრისტალური გისოსის ტიპზე).

ატომთშორისი კავშირების ძალებიდან გამომდინარე, თეორიული გათვლები აჩვენებს, რომ იდეალური წყობის კრისტალის, ატომურ სიბრტყეებზე მოწყვეტით, ორ ნაწილად გასაყოფად (მოწყვეტის სიბრტყის ორივე მხარეს არსებულ ყველა ატომს შორის მიზიდულობის ძალების გადასალახად) საჭირო იქნებოდა დიდი ($\sim 0,1 \dots 0,15$ E) გამჭიმავი გარე დატვირთვა (სურ. 2, ა), სადაც E არის ატომთშორისი ძალების კავშირის ირიბი მაჩვენებელი – მასალის დრეკადობის მოდული.

რღვევის სხვა შესაძლებელი მეთოდით - ძვრის სიბრტყის ერთ მხარეს განლაგებული ატომების ხისტი ერთდროული სინქრონული ძვრით მეორე მხარეს განლაგებულ ატომებს შორის

არსებული ატომთშორისი კავშირის ძალების ერთდროულად დასაძლევად - გაცილებით ნაკლები დატვირთვა იქნებოდა საჭირო (სურ. 2, ბ, გ, დ). მიუხედავად ამისა, საანგარიშო სიდიდე 2–3 რიგით აღემატება იმ რეალურ დატვირთვებს, რომლებიც იწვევენ ტექნიკური ლითონების რღვევას, მათი სიმტკიცეზე გამოცდისას.



სურ. 2. ნიმუშის ორ ნაწილად გაყოფის სქემა:

ა – მოწყვეტით;

ბ, გ, დ – ხისტი სინქრონული ერთდროული ძვრით (წყვეტილი ზოგზაგი ხაზით ნაჩვენებია ატომთშორისი კავშირების გადაწყობა ძვრის პროცესში), ისრებით ნაჩვენებია გარე ზემოქმედების მიმართულება

ასეთი წინააღმდეგობის მიზეზების ძიებამ რეალური ლითონების კრისტალური აღნაგობის არასრულყოფილება - კრისტალურ აღნაგობაში სხვადასხვაგვარი დეფექტების არსებობა - გამოავლინა. დადგენილია, რომ ლითონის სიმტკიცე, ატომთშორისი კავშირის ძალებთან (მათ წამყვნი როლი ენიჭება სიმტკიცის შენარჩუნებაში, ძირითადად, მაღალ ტემპერატურებზე, რადგან მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ განუმტკიცებლობაზე) ერთად დიდადაა დამოკიდებული დეფექტების ტიპებზე, მათ განაწილებასა და რაოდენობაზე კრისტალურ აღნაგობაში.

თეორიულად, მაქსიმალური სიმტკიცე მიიღწევა იდეალური წყობის კრისტალური გისოსის უდფექტო ლითონებში. მათში სრულად რეალიზდება ლითონური სხეულების დეფორმაციისა და რღვევის წინაღობადობის განმსაზღვრელი ატომთშორისი კავშირის ძალები. სინამდვილეში ტექნიკური კრისტალები შეიცავენ სხვადასხვაგვარი დეფექტის (ვაკანსიების, მინარევი უცხო ატომების, დისლოკაციების, მარცვლებისა და სუბმარცვლების საზღვრების) დიდ რაოდენობას. მათ შორის დისლოკაციების გავლენა უმნიშვნელოვანესია. ძირითადად მათი რაოდენობა და ქცევა განსაზღვრავს კრისტალური სხეულების მექანიკურ თვისებებს.

დეფექტების გავლენა გამორიცხავს ატომთშორისი კავშირის პოტენციალურად მაღალი ბუნებრივი სიმტკიცის სრულად რეალიზებას. მაგ., მინარევებისაგან კარგად გაწმენდილი და მოლბობილი მონოკრისტალი შეიცავს $10^4 - 10^5 \text{ სმ}^{-2}$ დისლოკაციას და ექსპერიმენტულად განსაზღვრული მისი დენადობის ზღვრის სიდიდე 1000-ჯერ ნაკლებია მის თეორიულ მნიშვნელობაზე. ეს მოვლენა ახსნილია დისლოკაციების დიდი ძვრადობით და მათი მოძრაობის ხელშემშლელი წინაღობების არარსებობით. დისლოკაციების $10^4 - 10^6 \text{ სმ}^{-2}$ საერთო სიმკვრივისას, კრისტალის ერთეულ მოცულობაზე დისლოკაციების მცირე რაოდენობა მოდის და მათგან მრავალი ადვილად გადაადგილდება კრისტალის სრულყოფილი კრისტალური გისოსის უბნებზე განლაგებული სრიალის სიბრტყეების გასწვრივ. შესაბამისად, ასეთი ლითონები პლასტიკურობას ინარჩუნებენ ძალიან დაბალ ტემპერატურამდე.

1.3 ლითონების განმტკიცების მექანიზმები და მეთოდები

თანამედროვე გაგებით, სიმტკიცე განიხილება როგორც მასალის უნარი, წინააღმდეგობა გაუწიოს პლასტიკურ დეფორმაციასა და რღვევას გარე დატვირთვისას. ე.ი. მასალის სიმტკიცის მაჩვენებელი განისაზღვრება ძაბვის იმ სიდიდით, რომელიც აუცილებელია ამ წინააღმდეგობისა და რღვევის დასაძლევად, ანუ დისლოკაციების მოძრაობაში მოსაყვანად და დატვირთული სხეულის დეფორმაციის გასავითარებლად რღვევამდე. ე.ი. დეფორმაციის წინაღობის ამაღლება და, შესაბამისად, მაღალი სიმტკიცის მიღება, შესაძლებელია დისლოკაციების მოძრაობის შეფერხებით. აქედან გამომდინარე, ლითონური მასალების განსამტკიცებლად გამოყენებული მეთოდები ეფუძნება ისეთი სუბ- და მიკროსკოპული სტრუქტურული მდგომარეობის შექმნას, რომელიც უზრუნველყოფს დისლოკაციის მოძრაობის ბლოკირებას (მაქსიმალურ შეკავებას).

დისლოკაციის მოძრაობის გასაძნელებლად გისოსში წარმოქმნილი წინააღმდეგობები, მათი გეომეტრიული ზომებიდან გამომდინარე, იყოფა 4 ჯგუფად:

- * ნულგანზომილებიანი (წერტილოვანი) – ჩანაცვლებისა და ჩანერგვის მალეგირებელი ატომები;
- * ერთგანზომილებიანი (ხაზობრივი) – დისლოკაციები;
- * ორგანზომილებიანი (ზედაპირული) – მარცვლების, სუბ-მარცვლების, ორეულებისა და ფაზების საზღვრები;
- * სამგანზომილებიანი (მოცულობითი) – მეორე ფაზის ნაწილაკები.

შესაბამისად, ლითონური მასალების განმტკიცების ძირითადი მექანიზმებია:

- * მყარი ხსნარების წარმოქმნა (მყარხსნარული განმტკიცება);
- * გარდაქმნები თერმული დამუშავებისას და დისლოკაციის სიმკვრივის ამაღლება (დისლოკაციური განმტკიცება);
- * მარცვლებისა და სუბმარცვლების დაწვრილმანება (მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება);
- * მყარი ხსნარებიდან მაღალდისპერსიული მეორე (განმამტკიცებელი) ფაზის გამოყოფა (დისპერსიული განმტკიცება).

გისოსში წარმოქმნილი წინააღმდეგობების სიმკვრივესა და დენადობის ზღვრის ნაზრდს შორის დამიკიდებულება აღიწერება შემდეგი თანაფარდობებით:

- * $\nabla \sigma_1 = a G c^{1/2}$ - მყარხსნარული განმტკიცება;
- * $\nabla \sigma_2 = a G b \rho^{1/2}$ - დისლოკაციური (დეფორმაციული) განმტკიცება;
- * $\nabla \sigma_3 = k d^{1/2}$ - მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება;
- * $\nabla \sigma_4 = \beta G b \lambda^{-1}$ - დისპერსიული განმტკიცება.

ფორმულებში:

a - არის უგანზომილებო მუდმივა, რომელიც ახასიათებს გახსნილი ატომების კუთრ განმამტკიცებელ მოქმედებას;

G - ძირითადი ლითონის ძვრის მოდული;

c - გახსნილი ატომების კონცენტრაცია;

$\alpha, \beta \approx 0,5$;

b - ბიურგერსის ვექტორი;

ρ - დისლოკაციების სიმკვრივე;

k - მუდმივა, რომელიც სტრუქტურისა და სუბსტრუქტურის ელემენტების საზღვრების კუთრ განმამტკიცებელ მოქმედებას ახასიათებს;

λ - მანძილი დისპერსიულ ნაწილაკებს შორის.

ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ფოლადთა უმეტესობისათვის მოქმედებს განმტკიცების ცალკეული მექანიზმის ხაზობრივი ადიტიურობის პრინციპი, ე.ი. ჯამდება ცალკეული მექანიზმის წვლილი საერთო განმტკიცებაში

$$\sigma_{\text{დენ}} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{a.b.} + \Delta\sigma_{\text{დ}} + \Delta\sigma_{\text{გ}} + \Delta\sigma_{\text{დ.გ.}}, \quad (1)$$

სადაც:

σ_0 არის დისლოკაციის მოძრაობისადმი კრისტალური გისოსის წინააღმდეგობა – გისოსის ხახუნის ძაბვა, ანუ პაიერლს-ნაზაროს ძაბვა;

$\Delta\sigma_{a.b.}$ - მყარი ხსნარის განმტკიცება მასში გახსნილი მალე-გირებელი ელემენტებით, ანუ მყარხსნარული განმტკიცება;

$\Delta\sigma_{\text{დ}}$ - დისლოკაციის გადაადგილების წინააღმდეგობით წარმოქმნილი განმტკიცება, ანუ დისლოკაციური განმტკიცება;

$\Delta\sigma_{\text{გ}}$ - მარცვლებისა და სუბმარცვლების საზღვრებით განმტკიცება, ანუ მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება;

$\Delta\sigma_{\text{დ.გ.}}$ - გადაჯერებული მყარი ხსნარის დაშლისას გამოყოფილი დისპერსიული მეორე ფაზით განმტკიცება, ანუ დისპერსიული განმტკიცება.

აღნიშნულ განმტკიცებებს, ფერიტ-პერლიტური ფოლადების შემთხვევაში, ემატება სტრუქტურაში არსებული პერლიტით განმტკიცება.

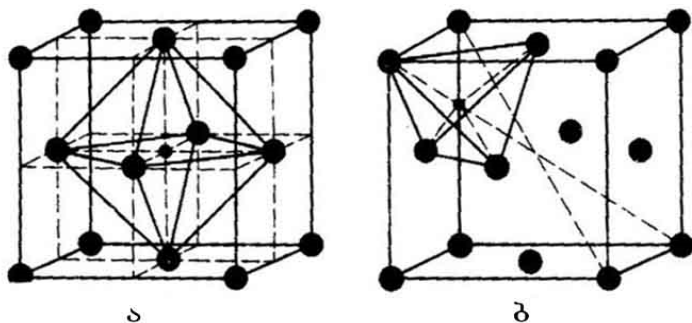
თავი II

მეარხსნარული განმტკიცება

2.1 კრისტალური გისოსის ძირითადი მახასიათებლები

ელემენტარული ნაწილაკების კრისტალში განლაგებას სრულად განსაზღვრავს კრისტალური გისოსის ძირითადი მახასიათებლები: სისტემა, პერიოდი და ელემენტარულ გისოსზე მოსული ატომების რიცხვი (მდკ გისოსში - 2, წდკ გისოსში - 4 და ჰმწ გისოსში - 6). ელემენტარული გისოსის გეომეტრიიდან გამომდინარე, რიგ შემთხვევებში იყენებენ, ელემენტარული ნაწილაკების წყობის სიმკვრივის ამსახველი კრისტალური გისოსის დამატებით მახასიათებლებს - საკოორდინაციო რიცხვებსა და კომპაქტურობის კოეფიციენტებს. მაგ., მარტივი კუბური გისოსის საკოორდინაციო რიცხვი უდრის 6-ს, მდკ გისოსის - 8-ს, ხოლო წდკ და ჰმწ ($c/a=1,633$) გისოსების - 12-ს. შესაბამისად, კომპაქტურობის კოეფიციენტებია: 0,52; 0,681 და 0,7404.

სურ. 3-ის შესაბამისად, წდკ კრისტალურ გისოსში დარჩენილი შეუვსებელი სივრცეები დიფერენცირდებიან ოქტაედრულ (ა) და ტეტრაედრულ (ბ) სიცარიელეებად და მათი („ფორების“) ცენტრები მცირე წერტილებითაა აღნიშნული. გამოთვლებით დადგენილია, რომ r რადიუსის მქონე ატომებისაგან აგებული წდკ გისოსის ოქტაედრული სიცარიელის რადიუსი არის $0,41r$, ხოლო ტეტრაედრულის - $0,22r$.



სურ. 3. ოქტაედრული (ა) და ტეტრაედრული (ბ) სიცარიე-
ლები წდკ გისოსის მქონე ლითონებში

2.2 მყარი ხსნარების წარმოქმნის პირობები

მყარხსნარული განმტკიცება, ჩვეულებრივ, უკავშირდება განსხვავებას გამხსნელისა და მალეგირებელი ელემენტების ატომურ დიამეტრებს შორის. მოცემულ მატრიცაში რომელიმე ელემენტის ხსნადობის არე ფასდება ჰიუმ-როზერის ემპირიული წესით. ამ წესში გათვალისწინებულია ფარდობითი სხვაობა ურთიერთქმედი ელემენტების ატომურ რადიუსებს შორის, ატომებს შორის ელექტროქიმიური განსხვავება და ფარდობითი ვალენტობა. ჰიუმ-როზერის წესის მიხედვით, ხსნადობის ფართო არე მიიღება იმ შემთხვევებში, როდესაც:

ა) ელემენტების ატომების რადიუსების ზომებს შორის სხვაობა ნაკლებია $\sim 14 - 15\%$ -ზე;

ბ) ელემენტებს აქვთ თითქმის ერთნაირი ელექტროქიმიური თვისებები (მაგ., სტაბილური შუალედური ნაერთის წარმოქმნა იწვევს პირველადი მყარი ხსნარის არის შევიწროებას).

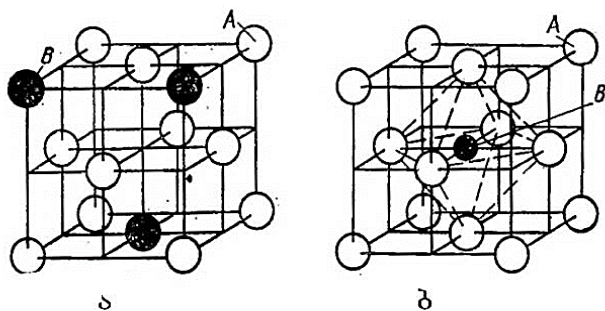
შენადნობებში ასეთი ნაერთის წარმოქმნის ალბათობა დაკავშირებულია ურთიერთქმედი ელემენტების ქიმიურ სწრაფვასთან. იგი მით მეტი იქნება, რაც უფრო მეტად ელექტროუარყოფითია ერთი ელემენტი და ელექტროდადებითი მეორე ელემენტი);

გ) ელემენტების კრისტალური გისოსები იზოტროპულია. ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორად ითვლება ელექტრონული კონცენტრაცია. ეს პარამეტრი აღნიშნავს ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოსულ სავალენტო ელექტონების რიცხვს, მაშინ როცა კრისტალური გისოსის ყველა კვანძი დაკავებულია. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, ელექტრონული კონცენტრაცია განისაზღვრება ყველა სავალენტო ელექტრონის ატომების რიცხვთან ფარდობით – e/a .

ჰიუმ-როზერის წესი ცნობილია, როგორც 15 %-ის წესი. მისი სრულად დაცვისას მიიღება უწყვეტი რიგის მყარი ხსნარები (განუზღვრელი ხსნადობა), ხოლო წესის ნაწილობრივ დაცვისას, მყარ მდგომარეობაში ხსნადობა განსაზღვრულია (განსაზღვრული ხსნადობა).

მყარხსნარული განმტკიცება შენადნობების საბაზო ლითონსა და დანამატ ლითონურ ან არალითონურ კომპონენტებს შორის ფასდება ცალკეული ფაზების ან ფაზათა ნარევების წარმოქმნის უნარით. ასხვავებენ ჩანაცვლების – და ჩანერგვის მყარ ხსნარებსა და ინტერმეტალურ ფაზებს. სურ. 4-ის შესაბამისად, მალეგირებელი და მინარევი ელემენტების ატომები კრისტალურ გისოსში შეიძლება იყოს როგორც ჩანაცვლების – (ა) (ატომი დგება კრისტალური გისოსის წარმოქმნელი ძირითადი ქიმიური ელემენტის ადგილზე), ისე ჩანერგვის – (ბ). ჩანერგვის მყარი ხსნარები წარმოიქმნება არალითონების ატო-

მების ჩანერგვით მატრიცის კრისტალური გისოსის კვანძთ-
შორისებში.



სურ. 4. მყარი ხსნარების სქემები: ა – ჩანაცვლების; ბ – ჩანერგვის

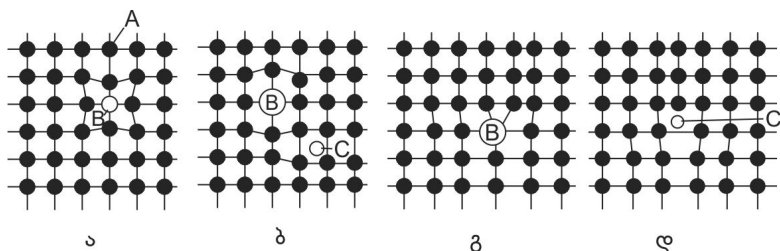
გამხსნელი და გახსნილი კომპონენტების ელექტრონული აღ-
ნაგობის და ატომების ზომების სხვადასხვაობა იწვევს კრის-
ტალური გისოსის დამახინჯებასა და მისი პერიოდის ცვლი-
ლებას. ჩანაცვლების მყარი ხსნარის წარმოქმნისას, გისოსის პე-
რიოდი, გამხსნელისა და გახსნილი კომპონენტების ატომური
რადიუსების თანაფარდობიდან გამომდინარე, დიდდება ან
მცირდება. გახსნილი ატომების ჩანერგვისას კი მყარი ხსნარის
გისოსის პერიოდი ყოველთვის დიდდება.

2.3 მყარხსნარული განმტკიცების საფუძვლები

გამხსნელი და გახსნილი კომპონენტების ელექტრონული
აგებულებისა და ატომების გეომეტრიული ზომების სხვა-
დასხვაობის გამო მყარი ხსნარის წარმოქმნისას კრისტალური
გისოსი ყოველთვის მახინჯდება (სურ. 5 ა, ბ) და მისი
პერიოდები იცვლება. მყარხსნარული განმტკიცება განიხი-

ლება, როგორც კრისტალური გისოსის დამახინჯება ლითონურ მყარ ხსნარებში არსებული მინარევებითა და მალეგირებელი ელემენტებით, აქედან გამომდინარე, ხახუნის ძაბვის ამაღლებით.

ჩანაცვლების მყარ ხსნარებში გამხსნელის ატომებთან შედარებით მცირე ზომის ატომები გროვდება გისოსის შეკუმშულ ზონაში, ხოლო დიდი ზომის ატომები – გისოსის გაჭიმულ ზონაში (სურ. 5 ა, ბ). გახსნილი კომპონენტის ატომები ხშირად გროვდება დისლოკაციასთან (სურ. 5 გ, დ). ჩანერგვის მყარი ხსნარის წარმოქმნისას, გახსნილი ელემენტის ატომები გროვდება გაჭიმულ არეში, ექსტრა სიბრტყის ქვემოთ (სურ. 5 დ).



სურ. 5. კრისტალური გისოსის დამახინჯება ჩანაცვლების (ატომები B და D) და ჩანერგვის (ატომი C) მყარი ხსნარების წარმოქმნისას

უცხო (მინარევი) ატომები უფრო ადვილად განთავსდებიან დისლოკაციის არეში, ვიდრე სრულყოფილ გისოსში, რომლის მნიშვნელოვან დამახინჯებასაც იწვევენ. ჩანერგვის ატომები, ჩანაცვლების ატომებთან შედარებით, გაცილებით ძლიერად უკავშირდებიან დისლოკაციებს და წარმოქმნიან ე.წ. კოტრელის ატმოსფეროს, რასაც თან ახლავს გისოსის დამახინჯების შემცირება და მისი მდგრადობის ამაღლება. შედეგად, კოტრელის ატმოსფეროდან ატომების გამოსვლა ან მოწყვეტა

მნიშვნელოვნად ძნელდება და გარკვეულ დამატებით ენერგიას მოითხოვს.

მინარევი ატომებით დამახინჯებული კრისტალური გისოსები დისლოკაციების მოძრაობას აფერხებენ ორივე სახის მყარ ხსნარში. დისლოკაციების დამუხრუჭება, ანუ მინარევ ატომებთან მათი ურთიერთქმედებით მასალის განმტკიცება, მხოლოდ ჩანაცვლებისა და ჩანერგვის მყარი ხსნარების ფუძის შენადნობებში (მყარხსნარული განმტკიცება— σ_{sb}) რეალიზდება.

განმტკიცების საფუძველს წარმოადგენს დისლოკაციებისა და მინარევი ატომების ურთიერთქმედების მექანიზმი, რომელიც ეფუძნება დისლოკაციების დამუხრუჭებას, ანუ მასალის განმტკიცებას. საბაზო ლითონის კრისტალური გისოსის კვანძებში ან კვანძთშორისებში განთავსებულ მინარევ ატომებს დისლოკაციების დამუხრუჭება და, შესაბამისად, მასალის განმტკიცება შეუძლიათ ისეთი ეფექტების ამოქმედებისას როგორიცაა:

1. დისლოკაციებზე მინარევი ატმოსფეროების წარმოქმნა;
2. წყობის დეფექტების ენერგიის ცვლილება;
3. დისლოკაციების მოძრაობით გამოწვეული ხახუნის ძალების გადიდება;
4. მოწესრიგებულობა.

დისლოკაციებზე მინარევი ატმოსფეროების წარმოქმნა. დისლოკაციებზე წარმოიქმნება კოტრელის, სნუკისა და სუძუკის მინარევი ატმოსფეროები (განხილული იქნებიან ქვემოთ, ცალცალკე). ისინი აძნელებენ დისლოკაციების გადაადგილებას

(განსაკუთრებით დაბალ ტემპერატურებზე) და ზრდიან ფრანკ-რიდის წყაროს ასამუშავებლად აუცილებელი ძაბვის სიდიდეს. შესაბამისად, რთულდება დისლოკაციების გადასვლა სრიალის ახალ სისტემებზე. მათ ბლოკავენ მინარევი ატომები. ასეთი დაბლოკვა იწვევს პლასტიკური დეფორმაციის საწყისი ძაბვების (დენადობის ზღვრების) ამაღლებას, ხოლო განზლოკვის შემდეგ – მრავლობითი და განივი სრიალის გაადვილებას.

წყობის დეფექტების ენერგიის ცვლილება. ლეგირებისას წყობის დეფექტების ენერგია მცირდება. გახსნილი ელემენტის მნიშვნელოვანი კონცენტრაციისას წყობის დეფექტების ენერგია შესაძლოა ფუძის ლითონის წყობის დეფექტების ენერგიაზე ერთი რიგით ნაკლები გახდეს და საგრძნობლად გართულდეს დისლოკაციის განივი სრიალი.

დისლოკაციების მოძრაობით გამოწვეული ხახუნის ძალების გადიდება. მყარი ხსნარის გისოსში მინარევი ატომები წარმოადგენს დამახინჯებების ცენტრებს. მათ ირგვლივ, ჩვეულებრივ, წარმოიქმნება დრეკადი ძაბვების ველები. ასეთ დამახინჯებულ გისოსში დისლოკაციების მოძრაობა, სუფთა ლითონთან შედარებით, გართულებულია. იზრდება დისლოკაციების გადაადგილების შემაფერხებელი ხახუნის ძალები. რაც მეტია სხვაობა ძირითადი და მინარევი ატომების ელექტრონული სტრუქტურების (დიამეტრების) ზომებს შორის, მით მეტია ხახუნის ძალების ნამატი. მყარ ხსნარებში ხახუნის ძალების გადიდებას ხშირად ფუძისა და დანამატი ელემენტების დრეკადობის მოდულებს შორის სხვაობებსაც უკავშირებენ.

მოწესრიგებულობა. ჩვეულებრივ, მყარ ხსნარებში გახსნილი ელემენტის ატომები გამხსნელის კრისტალურ გისოსში მოუ-

წესრიგებლადაა განაწილებული, ხოლო გარკვეულ პირობებში (მაღალი კონცენტრაციის ხსნარების ნელი გაცივებისას) ისინი გამხსნელის გისოსის კვანძებში იჭერენ განსაზღვრულ ადგილს, ანუ მოუწესრიგებელი მდგომარეობა მოწესრიგებულში გადადის. ასეთი პროცესი იწოდება მოწესრიგებად, ხოლო ხსნარები – მოწესრიგებულ მყარ ხსნარებად. მოწესრიგების პროცესი დიფუზიურია, ამიტომ ნელი გაცივება ხელს უწყობს მოწესრიგებას.

მოწესრიგება შეიძლება იყოს სრული ან არასრული. პირველ შემთხვევაში ყველა ატომი მისთვის განკუთვნილ ადგილს იჭერს მყარ ხსნარში. მეორე შემთხვევაში ატომების ერთი ნაწილი კრისტალურ გისოსში იჭერს განსაზღვრულ ადგილს, ხოლო ატომების მეორე ნაწილი განლაგებულია მოუწესრიგებლად. ასეთ შემთხვევაში მოწესრიგების მხოლოდ განსაზღვრული ხარისხი მიიღწევა.

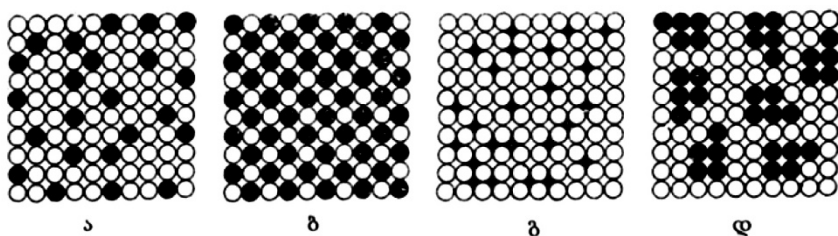
მოწესრიგებული მყარი ხსნარები წარმოადგენენ შუალედურ ფაზებს ქიმიურ ნაერთებსა და მყარ ხსნარებს შორის. სრული მოწესრიგებისას ეს ფაზები ქიმიური ნაერთების მსგავსია. მათთვის დამახასიათებელია:

ა) ატომების განსაზღვრული რიცხვი, რომელიც შეიძლება გამოისახოს შესაბამისი ფორმულით;

ბ) გისოსში ატომების მოწესრიგებული განლაგება.

მოწესრიგებისას იცვლება გისოსის პერიოდი, აღნაგობა კი უცვლელი რჩება. იმის გამო, რომ ამ ფაზებსა და გამხსნელ ლითონს ერთნაირი კრისტალური გისოსები აქვთ, ისინი განიხილებიან ისე, როგორც მყარი ხსნარები.

სურ. 6-ის შესაბამისად, ჩანაცვლებისა და ჩანერგვის მყარი ხსნარები კრისტალურ გისოსში შესაძლოა არსებობდეს ატომების მოუწესრიგებელი სტატისტიკური განაწილებით ან ერთი სახის ატომების მეორის მიმართ ნაწილობრივი, ან სრულად მოწესრიგებული განლაგებით. სრულად მოწესრიგებულ მყარ ხსნარებს ზოგჯერ ზესტრუქტურებსაც უწოდებენ. გარდა ამისა, ერთი სახის ატომები ერთმანეთთან მეზობლობის ტენდენციას ავლენენ, რის შედეგადაც მყარ ხსნარებში წარმოიქმნება კლასტერები. თავის მხრივ კლასტერები შესაძლებელია იყოს მოუწესრიგებლად განლაგებული, სხვადასხვა სახის მოწესრიგებული ან ორიენტირებული სტრუქტურები და ამგვარად, მყარ ხსნარებში სხვადასხვაგვარი რთული ზესტრუქტურები წარმოქმნან.



სურ. 6. მყარი ხსნარების გამოსახვის სქემები:

ა—ჩანაცვლების მყარი ხსნარი, ატომების მოუწესრიგებელი განლაგებით;

ბ—მოწესრიგებული ჩანაცვლების მყარი ხსნარი;

გ—ჩანერგვის მყარი ხსნარი, ატომების მოუწესრიგებელი განლაგებით;

დ—მყარ ხსნარში წარმოქმნილი ერთი სახის ატომების თავმოყრა

ინტერმეტალური ფაზები ჰიუმ-როზერის წესის შეუსრულებლობისას წარმოიქმნება. ისინი მდებარეობენ მდგომარეობის დიაგრამების შუა ნაწილებში, ჩვეულებრივ, მყარი ხსნა-

რების კონცენტრაციული არის შემდეგ. და ხასიათდებიან ატომთშორისი კავშირების ჰეტეროპოლარული (იონურკავშირიანი) და გომეოპოლარული (კოვალენტურკავშირიანი) მდგენელებით. ბუნებრივია, ლითონურ კავშირებთან ერთად, თითქმის მთლიანი ან ნაწილობრივი სტეკიომეტრიისას. ინტერმეტალური ფაზები ზესტრუქტურებზე სტაბილურია. უმეტესად ხასიათდებიან მაღალი სისალით, სიმყიფითა და ცუდი ელექტროგამტარობით.

რკინის შენადნობებში, ძირითადად, ასხვავებენ ჰიუმ-როზერის, ლავესისა და ჩანერგვის ფაზებს, აგრეთვე რკინის ფუძეზე წარმოქმნილ ინტერმეტალურ ნაერთებს (რკინის ქრომთან, კობალტთან, ნიკელთან ან მანგანუმთან), ე.წ. σ -ფაზებს.

ჰიუმ-როზერის ფაზები წარმოიქმნება Cu, Ag, Au, Fe, Co, Ni, Pd, Pt და Be, Zn, Cd, Al, Sn, Si ჯგუფების ორ ლითონს შორის. ამ სახის ნაერთები ხასიათდებიან სავალენტო ელექტრონების განსაზღვრული ფარდობით ატომების რიცხვთან ($3/2$; $21/13$ ან $7/4$). თითოეულ ფარდობას განსხვავებული კრისტალური გისოსი შეესაბამება, მაგ., $3/2$ ფარდობის ნაერთებს მოცულობადაცენტრებული კუბური გისოსი $-\beta$ ფაზა; $21/13$ ფარდობისას 52 ატომი ერთ კუბურ კრისტალურ უჯრედზე $-\gamma$ ფაზა და $7/4$ ფარდობისას ჰექსაგონალური გისოსი $-\epsilon$ ფაზა. ჰიუმ-როზერის ფაზები ხასიათდებიან ლითონური ბზინვით, მაღალი სისალითა და სიმყიფით.

ლავესის ფაზები იონური ტიპის მდგრადი ქიმიური ნაერთებია. თებია. ისინი წარმოიქმნებიან სხვადასხვა ბუნებისა და მნიშვნელოვნად განსხვავებული ატომური დიამეტრების მქონე ელემენტებს შორის. ატომური ზომების მცირედ განსხვავებისას იქმნება ტენდენცია ელექტრონული ნაერთების წარ-

მოქმნისა. შუალედური სხვაობისას შესაძლებელია ქიმიური ნაერთების წარმოქმნა. ასეთი ქიმიური ნაერთების ტიპური წარმომადგენელია ლავესის ფაზები. ისინი, სტეკიომეტრული ფორმულით AB_2 , წარმოიქმნებიან იმ ელემენტებს შორის, რომელთა ატომური დიამეტრების ფარდობა, დაახლოებით, 1:1,2-ის ტოლია. ლავესის ფაზების უმრავლესობა $MgCu_2$ ($TiCr_2$, UAl_2 , $ZrMo_2$ და სხვა. კრისტალდება რთული კუბური კრისტალური გისოსით), $MgZn_2$ ($FeBe_2$, WFe_2 , $MoFe_2$ და სხვა. კრისტალდება რთული ჰექსაგონალური გისოსით) და $MgNi_2$ ($ZrFe_2$, $TiCo_2$ და სხვა. კრისტალდება $MgZn_2$ -გან განსხვავებული რთული ჰექსაგონალური გისოსით) ტიპის ნაერთებიდან ერთ-ერთს მიეკუთვნება. ლავესის ფაზების ნაერთები სალი, მყიფე და დიამაგნიტურია. მხურვალმტკიცე ფოლადებში ისინი წარმოადგენენ განმამტკიცებელ ინტერმეტალურ ფაზებს.

σ ფაზები რკინის ფუძეზე, რკინის კობალტთან, ნიკელთან ან მანგანუმთან წარმოქმნილი ინტერმეტალური ნაერთებია. აღიწერებიან როგორც ჰიუმ-როზერის ფაზები – თითოეულ ატომზე ელექტრონების განსაზღვრული თანაფარდობა აქვთ.

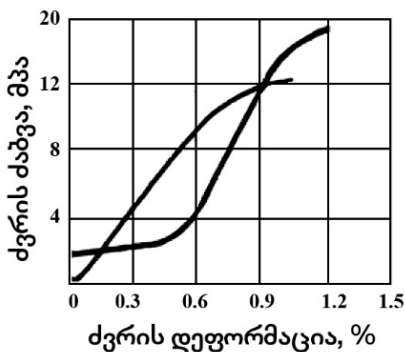
ჩანერგვის ფაზები წარმოადგენს ზესტრუქტურას ჩანერგვის ხსნარების სისტემებში. გარდამავალი ჯგუფის ლითონები მცირე ატომური რადიუსის მქონე არალითონებთან (წყალბადი $r_H = 0,47 \text{ \AA}$; აზოტი $r_N = 0,71 \text{ \AA}$; ნახშირბადი $r_C = 0,77 \text{ \AA}$) წარმოქმნიან ჩანერგვის ფაზებს იმ შემთხვევებში, როდესაც არალითონის ატომური რადიუსის ფარდობა ლითონის ატომის რადიუსთან $\leq 0,59$ -ზე. ისინი, კრისტალიზაციისას, წარმოქმნიან მარტივ (მდკ, წდკ ან ჰმწ) კრისტალურ გისოსებს, რომელთა განსაზღვრულ ადგილებშიც - ფორებში - ჩაინერგება

არალითონები. მათი ატომების თანაფარდობები გამოისახება მარტივი ფორმულებით: M_4X , M_2X , MX , MX_2 (სადაც M არის ლითონი, X —არალითონი).

ჩანერგვის ფაზები წარმოქმნიან ფაზაში შემავალი ელემენტების კრისტალური გისოსისაგან განსხვავებულ გისოსს. ამდენად, ჩანერგვის ფაზები შეიძლება მიეკუთვნოს ქიმიურ ნაერთს. ჩანერგვის ფაზების ბაზაზე მყარ ხსნარებს გააჩნია დამახასიათებელი თავისებურებები. მყარ ხსნარებში, წონასწორულ მდგომარეობაში, ჰარბი არალითონი არ არის, მაგრამ ხშირად შეინიშნება ლითონური იონების სიჭარბე. პრაქტიკულად, ლითონურ შენადნობებში ჩანერგვის ფაზებს არასოდეს აქვს ატომების სტექიომეტრიული თანაფარდობა (ყოველთვის ლითონის ატომების სიჭარბეა). ასეთ შემთხვევებში არალითონის ატომის ლითონის ატომით შეცვლა ვერ ხდება (ეს ატომური ზომების გათვალისწინებით შეუძლებელია) და წარმოიშობა არალითონის ატომების უკმარისობა. ამრიგად, ჩანერგვის ფაზის ბაზაზე წარმოიქმნება გამორიცხვის მყარი ხსნარი. ჩანერგვის ფაზები ხასიათდებიან მაღალი სისალით, ცვეთამედეგობით და ნახევრად ლითონური ბზინვით. ტექნიკაში უფრო ფართოდ გამოიყენება გარდამავალი ლითონების კარბიდები, ნიტრიდები და კარბონიტრიდები.

მასალათმცოდნეობაში მყარხსნარული განმტკიცება განიხილება წახნაგდაცენტრებული კუბური გისოსის მქონე ორმაგი შენადნობის მონოკრისტალების მაგალითზე. სურ. 7-ის შესაბამისად, მყარ ხსნარებში დეფორმაციული განმტკიცების გამომწვევი დისლოკაციების ძირითადი ურთიერთქმედებები ისეთივეა, როგორიც სუფთა ლითონებში.

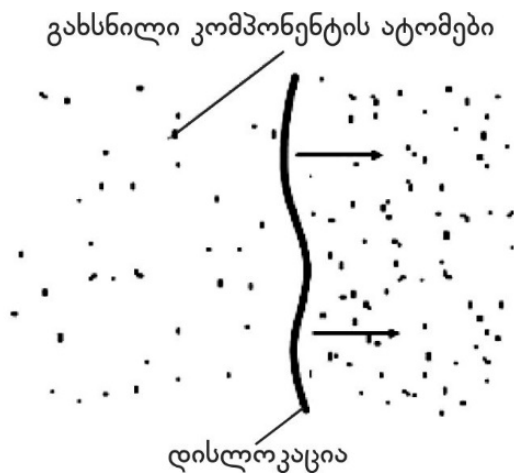
დადგენილია, რომ, ისე როგორც სუფთა ლითონების მონოკრისტალების დეფორმაციული განმტკიცებების მრუდებზე, მყარი ხსნარების მონოკრისტალების დეფორმაციის მრუდებზეც ვლინდება სამი სტადია. ამასთან, გახსნილი ელემენტების ატომების კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად, მყარი ხსნარების მონოკრისტალების განმტკიცების მრუდებზე აისახება გარკვეული თავისებურებები: უფრო მაღალია ძვრის კრიტიკული ძაბვა τ_{cr} , რადგან უცხო ატომები გამხსნელის კრისტალურ გისოსში ამაღლებენ დამახინჯების ხარისხს და აშფოთებენ ელექტრონულ სიმკვრივეს. შედეგად, იცვლება ატომთშორისი მანძილები და კავშირის ძალები - რაც უფრო მეტია კავშირის ძალები, მით უფრო მეტია პაიერლსის ძალა და უფრო ძლიერია დისლოკაციების დამუხრუჭება; მატულობს მარტივი სრიალის სტადიისა და ხაზობრივი განმტკიცების მეორე სტადიის სიგრძეები, უფრო მაღალი ძაბვებისას იწყება მესამე - დინამიკური მობრუნების - სტადია. სურ. 7.



სურ. 7. დეფორმაციული განმტკიცების მრუდები:

1. სუფთა ლითონის მონოკრისტალი;
2. ორმაგი შენადნობის მყარი ხსნარის მონოკრისტალი

თეორიული ანალიზი აჩვენებს, რომ გახსნილი ელემენტის იზოლირებული ატომების მოუწესრიგებელი, სტატისტიკურად თანაბრად განაწილებული, იდეალური მყარი ხსნარის წარმოქმნისას, როდესაც მცირეა ამ ატომების ირგვლივ გისოსის დამახინჯებით გამოწვეული ძაბვითა ველი, მათ შორის მანძილი კი რამდენიმე ატომთშორისი მანძილის ტოლია, განმტკიცება არ არის დიდი. დისლოკაციები, მათ შორის გადადგილებისას, წინააღმდეგობებს არ აწყდებიან მიუხედავად იმისა, რომ ირხევნიან გაჭიმული სიმის მსგავსად და განაზნევენ ენერგიას - სურ. 8.



სურ. 8. წინააღმდეგობა იზოლირებული უცხო მინარევი ატომების სახით (ისრებით ნაჩვენებია დისლოკაციების სრიალის მიმართულება)

მყარი ხსნარების სიმტკიცის ამაღლებაში გადაწყვეტი მნიშვნელობა აქვს გახსნილი ატომების არათანაბარ განაწილებას. ჩვეულებრივ, განსაკუთრებით კონცენტრირებულ მყარ ხსნარებში, გარკვეული ხარისხით, ყოველთვის არსებობს ლოკალური ახლო წყობის წარმოქმნის შესაძლებლობა - (ზოგჯერ

ერთი სახის ატომები ისწრაფვიან გაერთიანებისკენ). მეზობლად მყოფი ერთი სახის ატომების რიცხვი ასეთ შემთხვევებში უფრო მეტია, ვიდრე სრული მოუწესრიგებლობისას და პლასტიკური დეფორმაციის დასაწყებად აუცილებელია მეტი სიდიდის გარე ძაბვის მოდება. ამ დროს პირველი მოსრიალე დისლოკაციები არღვევენ ახლო ლოკალურ წყობებს საკუთარი სრიალის სიბრტყეებში, მათ შემდეგ მომდევნო მოძრავი დისლოკაციები სრიალებენ ზუსტად ისე, როგორც ისრიალებდნენ სრულად მოუწესრიგებელ ხსნარში, ე.ი. შემდგომი სრიალი ხდება თითქოს წინაღობების გარეშე (გაჭიმვის მრუდზე დენადობის ბაჟნის გაჩენა).

უძრავი (მშვიდი) დისლოკაციების ირგვლივ მალეგირებელი ელემენტების განლაგება იწვევს მათ დამაგრებას ან გადაადგილების შეფერხებას. პლასტიკური დეფორმაციისას ორივე ეფექტი მოდებული ძაბვის გაზრდას საჭიროებს. დისლოკაციის მოძრაობის წინააღმდეგობა არ ცვლის დეფორმაციის მრუდის ფორმას, მაგრამ ტოლი დეფორმაციისას იგი მრუდს გადაადგილებს ძაბვის უფრო მაღალი მნიშვნელობებისაკენ.

გროვების (დრუბლების, ანუ კოტრელის ატმოსფეროების) წარმოქმნის უნარის მქონე დისლოკაციები ნაკლებმოძრავნი ხდებიან ჩანერგვის ან ჩანაცვლების მინარევ ატომებთან ურთიერთქმედებისას. მოსრიალე-მოძრავისაგან განსხვავებით, ასეთ დისლოკაციებს, დეფექტებთან ერთად, მხოლოდ დიფუზიურად გადაადგილება შეუძლია. ამ მოვლენით აიხსნება მასალის სიმტკიცის მახასიათებლების ეფექტური ამაღლება მყარხსნარული განმტკიცებით.

მყარხსნარული განმტკიცება განსაკუთრებით ეფექტურია ჩანერგვის ელემენტებით ლეგირებისას. ნახშირბადისა და აზოტის

ასეთი მოქმედება აიხსნება კრისტალური გისოსის ასიმეტრიული დამახინჯებით და ამ ელემენტების ატომების დისლოკაციებთან ძლიერი ურთიერთქმედებით (მათზე დალევით). ჩანერგვის მყარი ხსნარების განმტკიცების ეფექტი $10 \div 100$ -ჯერ აღემატება ჩანაცვლების მყარი ხსნარების განმტკიცებას.

2.4 მალეგირებელი ელემენტების გავლენა ფოლადის მექანიკურ მახასიათებლებზე

მყარხსნარული განმტკიცება უარყოფით გავლენას ახდენს პლასტიკურობასა და სიბლანტეზე. ამასთან, ჩანერგვის ხსნარები, ჩანაცვლების ხსნარებზე უარესი პლასტიკური თვისებებით ხასიათდებიან. წინათ ფოლადების მაღალი სიმტკიცე ნახშირბადის შემცველობის გაზრდით მიიღებოდა და ნაკლები ყურადღება ექცეოდა მათ პლასტიკურობას, სიბლანტეს, რღვევის რელიეფის ხასიათსა და შედუღებადობას.

ნახშირბადი რკინასთან ქმნის ჩანერგვის მყარ ხსნარებს. იგი ეფექტური განმამტკიცებელია, მაგრამ ფერიტში მისი ხსნადობა უმნიშვნელოა. შესაბამისად, ფერიტში გახსნილი ნახშირბადის განმამტკიცებელი ეფექტი მცირეა. წრთობის მარტენსიტის მაღალ სიმტკიცეს თან ახლავს პლასტიკურობისა და სიბლანტის მკვეთრი შემცირება, რაც მოშვების ჩატარების აუცილებლობას განაპირობებს. ნაწრთობი ფოლადის მოშვებისას წარმოქმნილი კარბიდები იწვევენ მარტენსიტის ნახშირბადით გაღარიბებას, შესაბამისად, ამცირებენ მყარხსნარული მექანიზმით გამოწვეულ განმტკიცებას.

გარდა ამისა, უწყვეტობის შენარჩუნება ფაზების გამყოფი ზედაპირების გასწვრივ, ართულებს პლასტიკურ დენადობას. ე.ი.

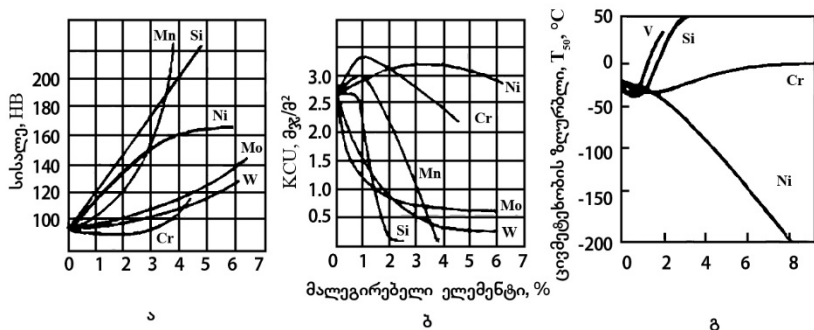
მრავალფაზიანი შენადნობების დეფორმირება, ერთფაზიანთან შედარებით, უფრო რთულია. ცალკეულ ფაზას საკუთარი სრიალის სისტემა და ძვრის საკუთარი კრიტიკული ძაბვა გააჩნია. პლასტიკური დენადობის სირთულიდან გამომდინარე, ორ- და მეტფაზიანი შენადნობები, ერთფაზიანთან შედარებით, სიმტკიცის უფრო მაღალი, ხოლო პლასტიკურობის უფრო დაბალი მახასიათებლებით ხასიათდებიან.

ორფაზიანი შენადნობის დეფორმირების პროცესი დამოკიდებულია შენადნობში მეორე ფაზის არა მხოლოდ შედგენილობაზე, არამედ სტრუქტურაში მათი განაწილების ხასიათზეც. მარცვლის ირგვლივ უწყვეტი ბადის სახით გამოყოფილი მყიფე მეორე ფაზა შენადნობს ამყიფებს. შენადნობის პლასტიკურ მატრიცაში ცალკეული მარცვლის სახით გამოყოფილი მყიფე მეორე ფაზის იგივე რაოდენობა შენადნობს განამტკიცებს და პლასტიკურობასაც უნარჩუნებს. ორფაზიანი შენადნობის პლასტიკურ მატრიცაში მოძრავი დისლოკაცია, მეორე ფაზის, მისთვის გაუვალ თანაბრად განაწილებულ, წვრილ ჩანართებთან შეხვედრისას, გაივლის მათ შორის და ჩანართების ირგვლივ, ყოველთვის ტოვებს დისლოკაციურ მარყუჟებს (სურ. 30). მარყუჟების რაოდენობა პირდაპირ აისახება განმტკიცების ხარისხზე: მეტი მარყუჟი – მეტი განმტკიცება. ჩანართების რაოდენობის ზრდა და მათ შორის მანძილის შემცირება კრიტიკულ (~15 ნმ) მნიშვნელობამდე ამაღლებს ძვრის წინაღობას.

მოშვებისას ფერიტულ მატრიცაში წარმოქმნილი ცემენტიტის ტიპის საკმაოდ მსხვილი ნაწილაკები უფრო სალი და მყიფეა, ვიდრე მატრიცა. გარე დატვირთვისას, ფერიტისა და ცემენ-

ტიტის გამყოფ ზედაპირებზე მიკრობზარების წარმოქმნის ხელშემწყობი მოცულობითი დამაბული მდგომარეობა იქმნება.

განზავებულ მყარ ხსნარებში, რომლებსაც მიეკუთვნება ფოლადების უმრავლესობა, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ პრაქტიკულად, განმტკიცება ხაზობრივად და მოკიდებული მალეგირებული ელემენტების კონცენტრაციაზე (სურ. 9,10).



სურ. 9. მალეგირებული ელემენტების გავლენა ფერიტის თვისებებსა და ცივმეტეხობის ზღურბლზე (ა. გულიავეის მიხედვით):

ა – სისალე;

ბ – დარტყმითი სიბლანტე;

გ – ცივმეტეხობის ზღურბლი

სურ. 9-ის შესაბამისად, ფერიტის სისალეს ყველა მალეგირებული ელემენტი ამაღლებს. ამასთან, Cr და, განსაკუთრებით, Ni თითქმის არ ამცირებენ ფოლადის სიბლანტეს. ნიკელი ყველაზე უფრო მეტად ადაბლებს ცივმეტეხობის ზღურბლს. გარდა ამისა, Ni, Cr, Mn და ზოგი სხვა ელემენტი კარგად იხსნება რა აუსტენიტში, გაცივებისას ამაღლებენ მის მდგრადობას, რითაც ზრდიან ფოლადის შეწრობადობას. ფოლადში Ni-ისა და Cr-ის ერთობლივი შეტანა, ანუ კომპლექსური ლეგირება, ყველაზე ეფექტურად ამაღლებს შეწრობადობას.

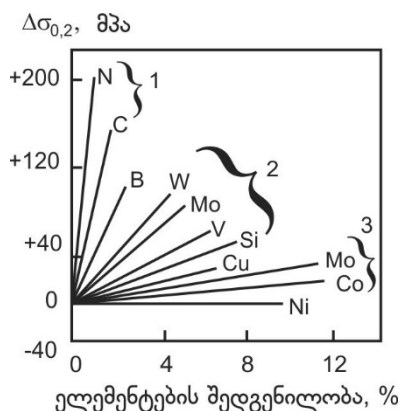
ამრიგად, Ni და Cr ფოლადებში სიმტკიცის, პლასტიკურობის, სიბლანტისა და შეწრთობადობის მაღალი კომპლექსის მიღწევის შესაძლებლობას ქმნიან. შესაბამისად, ისინი წარმოადგენენ საშუალო- და მაღალლეგირებული ფოლადების უმნიშვნელოვანეს მალეგირებელ ელემენტებს.

ფერიტში სრულად შემავალი და მისი მყარხსნარული განმტკიცების განმსაზღვრელი ძირითადი მალეგირებელი ელემენტებია არაკარბიდწარმომქმნელები: Si, Ni, Cu და სუსტი კარბიდწარმომქმნელი Mn (იგი 0,02 %-მდე C+N შემცველობისას არ წარმოქმნის დამოუკიდებელ კარბიდს). ისეთი კარბიდწარმომქმნელი ელემენტები, როგორიცაა Nb, V, Ti, სპეციალურ კარბიდებში ბმულ მდგომარეობაშია. Al მთლიანად ბმულ მდგომარეობაშია ნიტრიდებში ან არალითონურ ჩანართებში. Cr და Mo გადანაწილებულია კარბიდებსა და ფერიტს შორის, მაგრამ მცირე კონცენტრაციის გამო, მათი გავლენა ფერიტის განმტკიცებაზე დიდი არ არის.

სურ. 10-ის შესაბამისად, სხვადასხვაგვარია მალეგირებელი ელემენტების გავლენა აუსტენიტური კოროზიამდეგი ფოლადებისა და ფერიტული ფუძის ფოლადების თვისებებზე. აღნიშნული ფაქტი უკავშირდება მათ სხვადასხვაგვარ მოქმედებას წყობის დეფექტების ენერგიაზე. Si, Mo, V, Cr და სხვა ფერიტმასტაბილუბელი ელემენტებით ლითონის ლეგირებისას, წყობის დეფექტების ენერგიის შემცირება ახშობს განივ სრიალს და, შესაბამისად, ამცირებს პლასტიკურობას. ნიკელით და სპილენძით ლეგირება, პირიქით, ამაღლებს წყობის დეფექტების ენერგიასა და პლასტიკურობას. ოპტიმალური შედგენილობის მყარი ხსნარის შერჩევით შესაძლებელია აუსტე-

ნიტური ფოლადებისათვის დამახასიათებელი მაღალი პლასტიკურობის მიღწევა.

მყარი ხსნარები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ განმტკიცების სხვა მექანიზმებზე. თერმული დამუშავების შედეგად გამოყოფილი მეორე ფაზით ისინი ხელს უწყობენ დისპერსიულ გასაღებას. მყარ ხსნარში გახსნილი ზოგიერთი მალეგირებელი ელემენტი ადაბლებს ფოლადის გარდაქმნის ტემპერატურას, რაც, თავის მხრივ, ცვლის სტრუქტურას, მარცვლების ზომებსა და დისლოკაციების სიმკვრივეს. ამდენად, მყარხსნარული განმტკიცების მექანიზმის სხვა სახის განმტკიცების მექანიზმებთან კავშირი აძნელებს მის მიერ შეტანილი რაოდენობრივი წვლილის ზუსტ განსაზღვრას საერთო (ჯამურ) განმტკიცებაში.



სურ. 10. მალეგირებელი ელემენტების გავლენა აუსტენიტის განმტკიცებაზე:

- 1 – ჩანერგვის მყარი ხსნარის წარმომქმნელი ელემენტები;
- 2 – ჩანაცვლებით ხსნადი ფერიტწარმომქმნელი ელემენტები;
- 3 – ჩანაცვლებით ხსნადი აუსტენიტწარმომქმნელი ელემენტები

მყარხსნარული განმტკიცება ფართოდ გამოიყენება მხურვალ-
მტკიცე შენადნობების შედგენილობის შერჩევისას. ამ დროს
მნიშვნელოვანია განმტკიცების ეფექტის შენარჩუნება, რაც შეი-
ძლება უფრო მაღალ ტემპერატურებამდე. მხურვალმტკიცობა,
ძირითადად, განისაზღვრება ატომების დიფუზიური ძვრადო-
ბითა და დინამიური განუმტკიცებლობის პროცესებით. შე-
საბამისად, მხურვალმტკიცე ფოლადების შემუშავებისას ერთ-
ერთი ძირითადი მოთხოვნაა მატრიცის ატომების დიფუზიის
კოეფიციენტის შემცირება მალეგირებელი ელემენტებით.

დადგენილია, რომ ატომების მცირე ძვრადობის (დიფუზიური
ან სხვა სახის) მქონე მალეგირებელი კომპონენტი ეფექტურად
ამაღლებს შენადნობის სიმტკიცესა და მხურვალსიმტკიცეს.
თავის მხრივ, რაც უფრო მეტია ატომთშორისი კავშირების
ძალები, მით ნაკლებია მალეგირებელი კომპონენტის ატომების
დიფუზიური ძვრადობა. შენადნობების ატომთშორისი კავში-
რების ძალა კი მით უფრო დიდია, რაც უფრო მაღალია მათი
დნობის საწყისი ტემპერატურა.

მალეგირებელი ელემენტების უნარზე, მყარხსნარული გან-
მტკიცების მექანიზმით აამაღლონ შენადნობების მხურვალ-
სიმტკიცე, მსჯელობენ ირიბად – მათი გავლენით რეკრისტა-
ლიზაციის საწყის ტემპერატურაზე. უდიდეს ეფექტს იძლევა
მალეგირებელი ელემენტებით შენადნობების კომპლექსური
ლეგირება. მყარი ხსნარის შედგენილობის გართულების შესა-
ბამისად მატულობს სიმტკიცე და მხურვალსიმტკიცე. მყარ-
ხსნარული განმტკიცებით მხურვალსიმტკიცის ამაღლება შე-
საძლებელია $0,6...0,65 T_{დფ}$ -მდე.

თავი III

დისლოკაციური და დისკლინაციური განმტკიცება

3.1 დისლოკაციების ზოგადი თვისებები

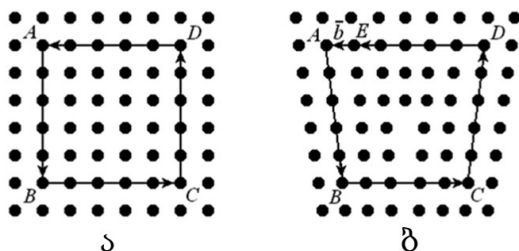
ამ თავში მოკლედ შევეხებით და გაგახსენებთ დისლოკაციების თავისებურებებსა და მის ძირითად თვისებებს. დისლოკაციების სპეციფიკური მნიშვნელობებიდან, მათი სირთულიდან გამომდინარე, აღინიშნება მხოლოდ ის უმნიშვნელოვანესი და არსებითი, რომელიც აუცილებელია წიგნის თემის - ლითონური მასალების განმტკიცების ზოგადი საწყისების - გასაგებად.

დისლოკაცია არის კრისტალური გისოსის ხაზობრივი დეფექტი – ხაზი, რომლის გასწვრივაც დარღვეულია ატომური (კრისტალოგრაფიული) სიბრტყეების სწორი მონაცვლეობა გისოსში. დისლოკაციები სხვა დეფექტებისგან იმით განსხვავდება, რომ ატომების რეგულარული მონაცვლეობის მნიშვნელოვანი დარღვევა თავმოყრილია კრისტალის გამჭვალავი რომელიღაც ხაზის მცირე მიდამოში. დისლოკაციები სტაბილური წარმონაქმნებია. ორი ურთიერთსაწინააღმდეგოდ ორიენტირებული დისლოკაცია შეხვედრისას ანიჰილირდება (ერთმანეთს ანადგურებს). უწყვეტი მოძრაობისას ერთეული დისლოკაცია არ ქრება. იგი გამოდის კრისტალის წახნაგზე (მარცვლის საღვარზე).

დისლოკაციის თეორიის განხილვისას ხშირად იყენებენ ბიურგერის კონტურისა და ბიურგერის ვექტორის ცნებებს. დისლოკაციის ძირითადი გეომეტრიული მახასიათებლი ბიურ-

გერსის ვექტორია. იგი ახასიათებს დისლოკაციების წარმოქმნილი ატომური სიბრტყეების ძვრის სიდიდესა და მიმართულებას. თუ იდეალურ კრისტალში შემოვსაზღვრავთ შეკრულ კონტურს, სურ. 11, ა, სადაც საწყის წერტილად მიღებულია A ატომი, ისრებით ნაჩვენები მიმართულებებით, ჩვენს შემთხვევაში, ხუთ-ხუთი ატომური მანძილით მოძრაობის დროს, B, C, D კვანძების გავლისა და საწყის A ატომადე დაბრუნებისას, მიიღება ჩაკეტილი კონტური.

რეალურ კრისტალში (სურ. 11, ბ) დისლოკაციის ირგვლივ ანალოგიური მოძრაობებით კონტურის შემოსაზღვრისას აღმოჩნდება, რომ კონტური გარღვეულია. კონტურის შესაკრავად აუცილებელია ბიურგერის ვექტორი. ამრიგად, ბიურგერის ვექტორი არის ბიურგერის კონტურის საწყისი და საბოლოო წერტილების შემაერთებელი ვექტორი. იგი განსაზღვრავს კრისტალში დისლოკაციის არსებობით განპირობებულ კრისტალური გისოსის დამახინჯების ზომას.



სურ. 11. ბიურგერის კონტური:

ა - სრულყოფილი კრისტალი;

ბ - დისლოკაციის შემცველი კრისტალი

ბიურგერის ვექტორსა და დისლოკაციის ხაზს შორის კუთხის სიდიდიდან გამომდინარე, ასხვავებენ ხრახნულ ($\alpha=0$), კიდურ ($\alpha=90$) და შერეულ (ნებისმიერი კუთხე α) დისლოკაციებს.

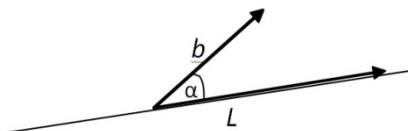
შერეული დისლოკაციები შეიძლება დაიშალოს კიდურ და ხრახნულ კომპონენტებად.

ბიურგერსის ვექტორის თვისებები:

1. ბიურგერსის ვექტორი - კრისტალური სტრუქტურის (ბრავეს გისოსის) ტრანსლაციის ვექტორია.
2. კიდური დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი დისლოკაციის ხაზის ვექტორის პერპენდიკულარულია. ხრახნული დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი დისლოკაციის ხაზის ვექტორის პარალელურია.
3. ნებისმიერი დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი (სურ. 12.) შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც კიდური და ხრახნული კომპონენტების ჯამი.

$$b_{კიდ} = b \sin \alpha$$

$$b_{ხრახ} = b \cos \alpha$$

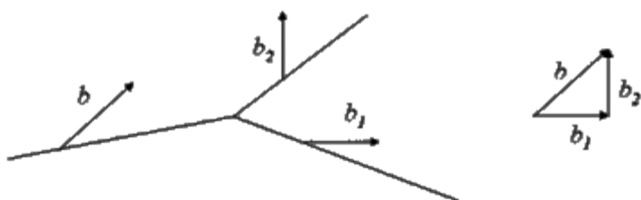


სურ. 12. ნებისმიერი დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი

4. ბიურგერსის ვექტორი მუდმივი მნიშვნელობისაა და არ იცვლება დისლოკაციის ხაზის გასწვრივ.

დისლოკაციას არ შეუძლია კრისტალში გაწყდეს. ის ან უნდა ჩაიკეტოს ან უნდა გამოვიდეს კრისტალის ზედაპირზე.

5. დისლოკაციის ხაზის განტოტებისას ბიურგერსის ვექტორის სიდიდე არ იცვლება.



$$b = b_1 + b_2$$

სურ.13. დისლოკაციის ხაზის განტოტება

ზემოთ განხილულ დისლოკაციებს კრისტალური გისოსის პერიოდის ტოლი ბიურგერის ვექტორი აქვთ და მათ სრული დისლოკაციები ეწოდებათ. ამასთან, არსებობენ ნაწილობრივი დისლოკაციები, რომლებსაც ატომების წყობის დეფექტები წარმოადგენენ. წყობის დეფექტები წარმოიქმნება დისლოკაციის ორ ნაწილობრივ დისლოკაციად გახლეჩისას. შესაბამისად, მათი ბიურგერის ვექტორი არ არის კრისტალური გისოსის პერიოდის ტოლი.

დისლოკაციები, ძირითადად, ლითონების პლასტიკურობისა და სიმტკიცის თვისებებს განსაზღვრავენ. ყოველ დისლოკაციას აქვს დრეკადი ენერგიის მარაგი, რომლითაც ქმნის საკუთარი დაძაბულობის ველს. დისლოკაცია ხასიათდება გამრავლების უნარით.

დისლოკაციები განლაგებულია, უპირატესად, მილერის მინიმალურვექტორებიან სიბრტყეებში. მათ გადაადგილებას ეწინააღმდეგება სხვადასხვა კრისტალოგრაფიულ სიბრტყეში არსებული, თითოეული სიბრტყის დამახასიათებელი, პოტენციალური ბარიერი. ყველაზე უფრო მჭიდროდ წყობილ და სი-

ბრტყეთა შორის უდიდესი მანძილით დაშორებული სიბრტყეების ერთობლიობაზე გადასაადგილებლად დისლოკაციებს მინიმალური ძაბვები ესაჭიროება. ამ სიბრტყეებს ადვილი ძვრის სიბრტყეები ეწოდება. სრიალი მჭიდროდ წყობილ სიბრტყეებზე და მიმართულებებზე იმით აიხსნება, რომ ისინი სხვებზე უფრო მტკიცეა, რადგან მანძილი ატომებს შორის უმცირესია და, შესაბამისად, მათ შორის კავშირი უდიდესი. მეორე მხრივ, მანძილი ორ მეზობელ მჭიდროდ წყობილ ატომურ სიბრტყეებს შორის უფრო მეტია, ვიდრე სხვა ატომურ სიბრტყეებს შორის (სრიალის სიბრტყისა და სრიალის კრისტალოგრაფიული მიმართულებების კომბინაცია ქმნის სრიალის სისტემას).

დისლოკაციური თეორიის (პლასტიკური დეფორმაციის თანამედროვე თეორიის) შექმნა უნიშვნელოვანესი ნაბიჯია ლითონების დეფორმირების პროცესების გაგებაში. დისლოკაციის თეორიით აიხსნება ლითონების როგორც მაღალი პლასტიკური თვისებები, ისე ბზარების ჩანასახების წარმოქმნის მიზეზები მყიფე რღვევებისას.

დისლოკაციები არაერთგვაროვნად გადაადგილდებიან. უპირველესად ისინი თავს იყრიან (ლოკალიზდებიან) სრიალის ხაზებში, რომელთა შორის მასალები თითქმის ხელუხლებელია. გარდა ამისა, არ ხდება ისე, რომ ძვრა სრიალის ყველა ხაზზე ერთდროულად დაიწყოს. იმის გამო, რომ მოსრიალე დისლოკაციისათვის მარცვლების საზღვარი არის ბარიერი, პოლიკრისტალის პლასტიკური დეფორმაცია იწყება მოდებული ძალის მიმართულების მიმართ ერთ ყველაზე ხელსაყრელად ორიენტირებულ მარცვალში და გრძელდება ესტაფეტურად მეორეში, მესამეში, ხოლო შემდეგ (მოსალოდნელია)

- ისევ პირველში და ა.შ.. დეფორმაციის ასეთი განვითარება უკავშირდება სხვადასხვა წინაღობებით დისლოკაციების შესაძლებელ დამუხრუჭებას ნიმუშის ცალკეულ მარცვალში. მაგალითად, ამ მარცვალში გახსნილი რომელიმე ელემენტის ატომებით.

წინააღმდეგობით დისლოკაციების დაგროვებისას, გარკვეულ პირობებში, წარმოიქმნება შინაგანი მიკრობზარი - მომავალი ბზარის ჩანასახი. ამგვარად, დისლოკაციის თეორიით მტკიცდება, რომ რღვევა არასოდეს შეიძლება იყოს მხოლოდ მყიფე (დისლოკაციის თეორიის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი შედეგი).

სრიალს განაპირობებს მხოლოდ ტანგენციური (მხები) ძაბვები. სრიალი იწყება მაშინ, როდესაც მხები ძაბვები მოცემული სხეულისათვის და სრიალის სისტემისათვის დამახასიათებელ $\tau_{კრ}$ მნიშვნელობას გადააჭარბებს. სრიალი უზრუნველყოფს ძვრის, გაჭიმვის და კუმშვის დეფორმაციებს.

ამაღლებულ ტემპერატურებზე შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს დისლოკაციების გადაადგილების ისეთი მექანიზმი, რომელიც უკავშირდება დისლოკაციის ხაზზე ორმაგი გადაღუნვების თერმოაქტივირებულ წარმოქმნასა და დისლოკაციის მთლიან ხაზზე მათ გაფართოებას.

დისლოკაციებს, პრაქტიკულად, არ ახასიათებს ინერციულობა. მადეფორმირებელი ძაბვების მატებისას ისინი მყისიერად აჩქარდებიან. დისლოკაციების გადაადგილების მაქსიმალური სიჩქარე, დაახლოებით, ტოლია ლითონში ბგერის გავრცელების სიჩქარისა.

პლასტიკური დეფორმაციისას, დისლოკაციების გამრავლების უნარის წყალობით, დისლოკაციის სიმკვრივე $10^{8-10} \text{ სმ}^{-2}$ -დან

10^{12} სმ^{-2} -მდე მატულობს. დისლოკაციების სიმკვრივის ამალ-
ლება კი იწვევს სისტემის ენერგიის ამალლებას.

დისლოკაციის უცვლელი სიმკვრივისას დეფორმირებული
ლითონის ენერგია დამოკიდებულია დისლოკაციების მიერ
წარმოქმნილ დისლოკაციურ კონფიგურაციაზე (მაგ., ქაოსური
განაწილება, დისლოკაციური გროვები ან კედლები), ანუ
დისლოკაციურ სტრუქტურაზე.

3.2 დისლოკაციების წარმოქმნა

დადგენილია, რომ ერთ ატომზე მოსული დისლოკაციის ენერ-
გია ტოლია რამდენიმე ელექტრონვოლტის. ამიტომ, თერმულ
აქტივაციას არ შეუძლია ხელი შეუწყოს დისლოკაციების წარ-
მოქმნას. ლითონური მონო- და პოლიკრისტალები, კრისტალი-
ზაციის შემდეგ, როგორც წესი, მრავალ დისლოკაციას შეიცავს.
მამასადამე, დისლოკაციები წარმოიქმნება უშუალოდ კრისტა-
ლიზაციის ფრონტთან ან კრისტალების გაცივებისას, თხევადი
ფაზის გაქრობის შემდეგ.

დისლოკაციების წარმოქმნის შესაძლო მექანიზმები:

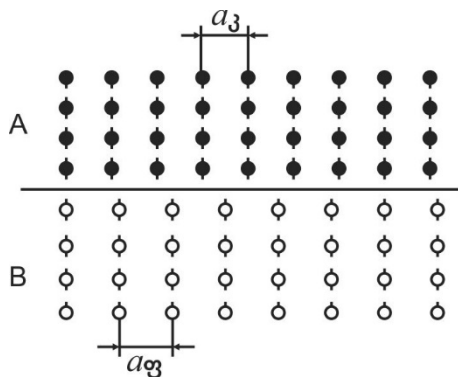
1. ადვილი წარმოსადგენია ხრახნული დისლოკაციების წარ-
მოქმნა კრისტალიზაციის ფრონტზე. როდესაც უდისლოკაციო
კრისტალი იზრდება კრისტალიზაციის ფრონტის საფეხურთან
ახალ შრეზე ატომების მიერთებით, მაშინ ეს შრე - სრულად
დაშენებისას - თავის თავს სპობს. ახალი ატომური შრის შე-
საქმნელად საჭიროა ორგანოზომილებიანი ჩანასახის წარმოქმნა
კრისტალის გლუვ ზედაპირზე, რაც სრულყოფილი კრისტა-
ლის ზრდის პროცესის ყველაზე ვიწრო რგოლია და დიდ

გადაცივებას მოითხოვს. ხრახნული დისლოკაციის შემცველი კრისტალის ზრდის მომენტში ასეთი რგოლი არ არსებობს. ატომების საფეხურთან მიერთება იწვევს საფეხურის ბრუნვას მის ზედაპირზე. ამდენად, ხრახნულ ზედაპირებზე გადაწყობილი ატომები ყოველთვის ინარჩუნებენ საფეხურებს. მუდმივი საფეხურები კი ატომების კრისტალთან მიერთებასა და მის ზრდას აადვილებს.

ხრახნული დისლოკაციის შემცველი კრისტალი წარმოადგენს სპირალურად დაგრებილ ატომურ სიბრტყეს. რით არის ასეთი დახვევა გამოწვეული ჩანასახის წარმოქმნის საწყის მომენტში? ცნობილია, რომ კრისტალების ჩასახვა თავისთავად არ ხდება. კრისტალები, როგორც წესი, ჩაისახება მზა ფუძემრეზე - ბოცვის კედლებსა და ნადნობში შეტივტივებულ უწვრილეს მყარ ნაწილაკებზე. ასეთი ფუძემრის ზედაპირებზე გამოდის ხრახნული დისლოკაციები. ე.ი., აქ უკვე არსებობს მზა საფეხურები, რომლებსაც მიუერთდება ატომები ნადნობიდან. ამგვარად ამოიზრდება ხრახნული დისლოკაცია კრისტალად ფუძემრიდან.

2. დისლოკაციების ჩასახვის მეორე მიზეზი არის ძაბვების წარმოშობა კრისტალიზაციის პერიოდში. ფუძემრეზე კრისტალის ორიენტირებული წაზრდისას (ეპიტაქსია) ორი გისოსის (რომლებსაც ყოველთვის აქვთ მცირე შეუსაბამობა) შეუღლება აღძრავს დრეკად ძაბვებს როგორც ფუძემრეში, ისე ეპიტაქსიურ შრეში. ეპიტაქსიური შრის სისქის გარკვეულად კრიტიკული სიდიდის მიღწევისას, ფუძემრისა და მზარდი კრისტალის გისოსების შეუსაბამობის კომპენსაცია ენერგეტიკულად უფრო მომგებიანია არა მხოლოდ ორი გისოსის შეუღლების მთელ ზედაპირზე აღძრული დრეკადი დეფორმაციით, არამედ ნაწი-

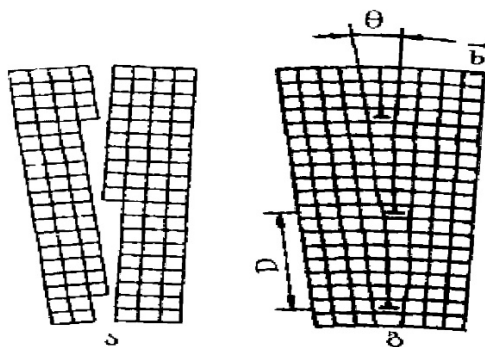
ლობრივ ამ ზედაპირზე წარმოქმნილი დისლოკაციებითაც. ასეთ დისლოკაციებს სტრუქტურულ, ეპიტაქსიურ ან შეუსაბამობის დისლოკაციებს უწოდებენ (სურ.14). რაც უფო მეტია ორი გისოსის შეუსაბამობის ხარისხი, მით უფრო მაღალია ეპიტაქსიური დისლოკაციების სიმკვრივე. დისლოკაციების წარმოქმნით გამოწვეული ენერგიის ზრდა კომპენსირდება შეუღლებული გისოსების დრეკადი დეფორმაციების შემცირებით.



სურ. 14. შეუსაბამობის დისლოკაცია მზარდი A კრისტალისა და B ფუძემშრის საზღვარზე

3. მინარევების სეგრეგაციის გამო, კრისტალიზაციისას წარმოიქმნება სხვადასხვა შედგენილობის რამდენადმე განსხვავებული ატომთშორისი მანძილების მქონე მოსაზღვრე შრეები. ეს სხვაობა იწვევს დრეკად ძაბვებს. მეზობელი შრეების ატომთშორისი მანძილების განსაზღვრული სხვაობისას მათი შეუღლება შეიძლება ენერგეტიკულად მომგებიანი გახდეს მეზობელ შრეებს შორის საზღვარზე წარმოქმნილი სტრუქტურული დისლოკაციების მონაწილეობით.

4. დისლოკაციების წარმოქმნა შესაძლებელია კრისტალიზაციისას კრისტალების ზრდის სხვადასხვა შემთხვევითობით. ეს შემთხვევითობები იწვევს მოზაიკური სტრუქტურის წარმოქმნას (კრისტალი შედგება ოდნავ განორიენტირებული სუბმარცვლებისაგან). სუბმარცვლების წარმოქმნის ერთ-ერთ ასეთ მიზეზს წარმოადგენს ძალიან „ნაზი“ დენდრიტული ტოტების მოღუნვა კონვექციური დინების, ტემპერატურის გრადიენტისა და სხვა ფაქტორების მოქმედებით. ოდნავ განორიენტირებული დენდრიტების შეზრდისას, მათ შორის საზღვარზე, წარმოიქმნება დისლოკაცია. სურ.15-ზე წარმოდგენილია ერთი კრისტალის (ან სხვადასხვა კრისტალის) სიმეტრიულად განორიენტირებული ორი ნაწილის შეზრდის უმარტივესი შემთხვევა. კერტიკალური ატომური სიბრტყეები შეზრდის ადგილზე კრისტალის ძირამდე არ დადიან (სურ.15 ა). ყოველი ასეთი სიბრტყის კიდეზე არსებობს კიდური დისლოკაცია. შეზრდის ზედაპირი არის დადებითი დისლოკაციების კედელი (სურ.15 ბ).



სურ.15. დისლოკაციის კედლის წარმოქმნა კრისტალიზაციისას მარცვლების შეზრდით:

ა—შეზრდამდე;

ბ—შეზრდის შემდეგ

5. დისლოკაციების წარმოქმნა შესაძლებელია სრულად გამყარებულ ლითონში, კრისტალიზაციის ფრონტის უშუალო სიახლოვეს და მისგან შორს. ითვლება, რომ აქ ძირითადია დისლოკაციის წარმოქმნის ვაკანსიური მექანიზმი. კრისტალიზაციის წერტილიდან, ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად, მკვეთრად მცირდება ვაკანსიების წონასწორული კონცენტრაცია. აჩქარებული გაცივებისას კრისტალი ძლიერ გადაჯერდება ვაკანსიებით. ჭარბი ვაკანსიები, უმჭიდროესი წყობის სიბრტყეების პარალელურად, კონდენსირდება დისკურ წარმონაქმნად. დისკი შეიძლება იყოს ერთი, ორი ან სამი ვაკანსიის სისქის შრე. როდესაც ვაკანსიური დისკის დიამეტრი გადააჭარბებს რაღაც კრიტიკულ სიდიდეს, მაშინ მისი მხარეები, ატომთშორისი მიზუდულობის ძალების მოქმედებით, დაახლოვდებიან და მიჯახების შედეგად წარმოიქმნება ფრანკის მჯდომარე დისლოკაცია, რომელსაც შეუძლია ტრანსფორმირდეს მოსრიალე პრიზმულ დისლოკაციად.

ვაკანსიების დისკების მიჯახება და დისლოკაციური მარყუქების წარმოქმნა შეიძლება როგორც კრისტალიზაციის დასრულების, ისე საწრთობად სპეციალურად გახურების შემდეგ, სწრაფი გაცივებისას.

ლითონების ბირთვული დასხივებისას, კვანძთაშორისი ატომების ბრტყელი გროვების საზღვრებზე, წარმოიქმნება დისლოკაციური მარყუქები.

6. დისლოკაციების ჩასახვა ხდება კრისტალების ცალკეულ უბნებში (ჩანართებისა და ბზარების მახლობლად) G/30 სიდიდის ძაბვების კონცენტრაციისას. მაგალითად, ლითონის გაცივების დროს, ჩანართებისა და ძირითადი ლითონის სხვადასხვა თერმული კუმშვისას, მათი გამყოფი ზედაპირის მახ-

ლობლად, შეიძლება აღიძრას დისლოკაციური მარუჟების თვითნებური ჩასახვისათვის საკმარისი დრეკადი ძაბვები. დისლოკაციური მარუჟების ჩასახვისას და მათი ჩანართებიდან მოშორებისას, როგორც წესი, ხდება ძაბვის რელაქსაცია.

7. პლასტიკური დეფორმაციისას დისლოკაციების ერთ-ერთი ძირითადი წყარო არის მარცვლის საზღვრები.

3.3 მაღალი სისუფთავის მონოკრისტალების დეფორმაციული განმტკიცება

ლითონისა და შენადნობების სიმტკიცის სამართავად აუცილებელია:

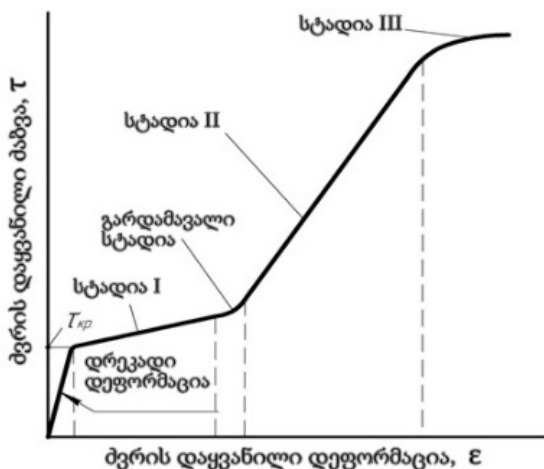
1. ლითონების განმტკიცების მექანიზმის განსაზღვრა;
2. შენადნობების დეფორმირებისადმი წინააღმდეგობის განსხვავებული მიზეზების (რატომ დეფორმირდება ზოგი შენადნობი უფრო ძნელად, ვიდრე სხვები) დადგენა;
3. დისლოკაციების დამუხრუჭების მექანიზმების გარკვევა.

პლასტიკური დეფორმაციის პროცესები, ჩვეულებრივ, სტრუქტურული დეფექტების – დისლოკაციების – გადაადგილებებით აიხსნება. ამის გამო, განმტკიცების ფიზიკური არსის გაგება უკავშირდება ამ გადაადგილებების შეფერხებას. სხვადასხვა ტიპის კრისტალური გისოსის მქონე ლითონები დისლოკაციების მოძრაობას სხვადასხვაგვარად ეწინააღმდეგებიან (აქვთ გისოსის ხახუნის განსხვავებული ძაბვები). მაგალითად, მდკ რკინა, ჰმწ ტიტანთან შედარებით ადვილად დეფორმირდება.

პლასტიკური დეფორმაციის ტიპური სახეა დისლოკაციების სრიალი (კონსერვატიული მოძრაობა) ძაბვების ზემოქმედებით, მჭიდროდ წყობილ კრისტალოგრაფიულ სიბრტყეებზე მჭიდროდ წყობილი მიმართულებების გასწვრივ. სრიალის განვითარება განიხილება როგორც დისლოკაციის წარმოქმნისა და გადაადგილების ერთიანი პროცესი. იგი შეისწავლება, ძირითადად, სუფთა ლითონებისა და ორმაგი შენადნობების მონოკრისტალებზე.

ლითონის განმტკიცებისას (ციკჰედვისას) დისლოკაციების ურთიერთქმედებას ნათლად ასახავს მონოკრისტალის „ძაბვა-დეფორმაციის“ დიაგრამა. დეფორმაციის ელემენტარული პროცესები და მიღებული ეფექტები უფრო სრულად შესწავლილია ლითონის წდკ გისოსის მონოკრისტალური ნიმუშების გაჭიმვაზე გამოცდისას. ამ დროს ნიმუშების გარე დატვირთვის მიმართულება ისე შეირჩევა, რომ დეფორმირების დასაწყისში ძვრის ძაბვები სრიალის მიმართულებებიდან ერთ-ერთზე იყოს მეტი, სხვა მიმართულებებთან შედარებით (სრიალის ამავე სისტემაში).

მონოკრისტალის „ძაბვა-დეფორმაციის“ მრუდზე სამი დამახასიათებელი უბანი გამოიყოფა (სურ. 16), რომლებიც შეესაბამებიან დისლოკაციური სტრუქტურის ევოლუციის სამ სტადიას და მკაფიოდ ფიქსირდებიან მხოლოდ მინარევებისაგან ზედმიწევნით გაწმენდილ ლითონებში. დეფორმირების პირობებიდან (ტემპერატურა და დეფორმაციის სიჩქარე, ძაბვების მოქმედების ღერძის კრისტალოგრაფიული ორიენტაცია, კრისტალის ზომა და სხვ.) გამომდინარე, მრუდები ერთმანეთისაგან შეიძლება ძლიერ განსხვავდებოდეს.



სურ. 16. წდკ გისოსის მქონე მონოკრისტალის დეფორმაციული განმტკიცების მრუდი:

I–ადვილი (ლამინარული) სრიალის სტადია;

II–ძლიერი (ხაზობრივი) განმტკიცების სტადია;

III–მცირეკოეფიციენტური განმტკიცების სტადია

პირველი სტადია არის პლასტიკური დეფორმაციის საწყისი სტადია. მას ადვილი ლამინარული სრიალის სტადია ეწოდება. ამ სტადიაზე დეფორმაცია იწყება მოდებული ძაბვის $\tau_{კრ}$ -ს მიღწევისას (მონოკრისტალებისათვის კრიტიკულ ძვრის ძაბვად მიღებულია დენადობის ზღვარი) და სრიალის სიბრტყეების მხოლოდ პირველად სისტემაში (რომელშიც ძვრის ძაბვები უფრო ადრე აღწევნ კრიტიკულ მნიშვნელობას და კრისტალური გისოსის წინაღობა მინიმალურია) ერთეული დისლოკაციის სრიალისას. ე.ი. დეფორმაცია იწყება იმ სიბრტყეებზე და იმ მიმართულებებით, სადაც ძვრის (მხლეჩი) მაქსიმალური ძაბვები მოქმედებენ. სხვა სიბრტყეები და მიმართულებები უმოქმედოდ რჩებიან მანამ, სანამ ძაბვები ამ

სისტემის სიბრტყეებისა და მიმართულებების კრიტიკულ სიდიდემდე არ ამაღლდებიან. ნიმუში ადვილად დეფორმირდება დისლოკაციების საწყისი სიმკვრივის სიმცირის, მათ შორის დიდი მანძილის და დისლოკაციების წყაროების დაბრკოლებების გარეშე მუშაობის გამო.

დეფორმაციის საწყის სტადიაზე, მონოკრისტალში, ძირითადი დაბრკოლებებს წარმოადგენს ერთნაირნიშნის დისლოკაციების არსებობა ერთსა და იმავე სრიალის სიბრტყეში ან სრიალის პარალელურ სიბრტყეებში. კრისტალი არასოდეს გადაიკვეთება („გადაიჭრება“) ცალკეული სრიალის სიბრტყით. დეფორმაცია ვრცელდება ახლომდებარე პარალელური სრიალის სიბრტყეებზე ისე, რომ წარმოიქმნება სრიალის ზოლი. მოსრიალე დისლოკაციის თავისუფალი განარბენი ამ სტადიაზე დიდია, იგი მონოკრისტალური ნიმუშის თანაზომადია. ე.ი. დეფორმაცია მიმდინარეობს სუფთა ძვრის პირობებთან მიახლოებულ პირობებში. დისლოკაციების მნიშვნელოვანი ნაწილი აღწევს კრისტალის (ნიმუშის) ზედაპირს და ქრება. კრისტალის ზედაპირზე დისლოკაციების გამოსვლა-გაქრობა, ამასთან სხვადასხვანიშნის დისლოკაციების ანიჰილაცია, დისლოკაციების წყაროების მუშაობის მიუხედავად, პრაქტიკულად, ლითონში მათ სიმკვრივეს ვერ ცვლის (გროვდება დისლოკაციების მხოლოდ მცირე რაოდენობა).

მონოკრისტალის დეფორმაციის პირველ სტადიაზე სიმტკიცის უმნიშვნელომატება უკავშირდება სრიალის პირველადი სისტემის ერთ ან პარალელურ სიბრტყეებში მდებარე, ერთმანეთისგან საკმაოდ დაშორებულ დისლოკაციებს შორის მოძრაობის წინააღმდეგობის აღძვრას, მოძრავი დისლოკაციების მიერ დისლოკაციური ბადეების გადაკვეთას და მცირე

რაოდენობის დისლოკაციური დიპოლების წარმოქმნას დეფორმაციისას.

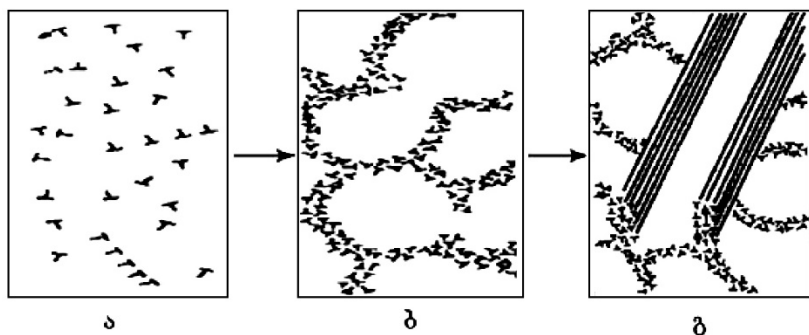
დისლოკაციების სიმკვრივისა და დისლოკაციური დიპოლების რაოდენობის სიმცირის, აგრეთვე დისლოკაციების შესაძლო ანიჭილაციის გამო, დისლოკაციის სრიალის წინაღობა დიდი არ არის. შესაბამისად, I სტადიაზე პლასტიკური დეფორმაცია, პრაქტიკულად, მოდებული ძაბვის სიდიდის მუდმივობისას მიმდინარეობს. დეფორმაციის მრუდზე განმტკიცება არ იქნება შესაძენვეი მანამ, სანამ არ მოიმატებს სრიალის ზოლების რაოდენობა და სანამ ისინი კრისტალის მოცულობის მნიშვნელოვან ნაწილს არ დაიჭერენ.

გარდამავალი სტადია. ექსპერიმენტულად დადასტურებულია, რომ პირველ სტადიაზე სრიალისას, დეფორმაციის განვითარებასთან ერთად, სრიალის პროცესი იწყება სრიალის სიბრტყეების მეორად სისტემებშიც. მონოკრისტალის გაჭიმვის პროცესში, კრისტალის გისოსის ღერძები მობრუნდება მოქმედი ძალის მიმართულების შესატყვისად. მათ მობრუნება შეუძლიათ იმ დონემდე, რომ სრიალის პირველადი სისტემის ნაცვლად ამოქმედონ მასთან შეუღლებული სხვა სისტემა (რომელშიც შეჯამებული ძაბვები აღემატება პირველადში არსებულ ძაბვებს). ამას კი მოჰყვება დისლოკაციების სიმკვრივისა და მათი გროვების მატება, დისლოკაციური დიპოლების, წყობის დეფექტებიანი გაჭიმული და მჯდომარე დისლოკაციების წარმოქმნა და სხვა. ესენი კი ქმნიან წანამდღვრებს ახალი დისლოკაციური წყაროების ასამოქმედებლად. ასეთ შემთხვევაში წარმოქმნილი ძალთა ველი საკმარისია მოსრიალე დისლოკაციების „გასაღწევად“ დიპოლებსა და გროვებს შორის.

მეორე სტადია. დეფორმაციის განვითარებასთან და გისოსის კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის ცვლილებასთან (გისოსის მობრუნება ძვრის მიმართულებებიდან) ერთად იწყება II სტადიაზე გადასვლა. ამ დროს დისლოკაციებს შორის, აგრეთვე, დიპოლების გროვებსა და სხვა წინაღობებს შორის საშუალო მანძილი იმდენად მცირდება, რომ მათ სიახლოვეს დისლოკაციების დახორავით აღძრული შინაგანი და მოდებული ძაბვების ჯამი საკმარისი ხდება დისლოკაციების წყაროების მასობრივად გააქტიურებისათვის სრიალის სხვა სისტემაში.

სრიალის მეორე სისტემის გააქტიურებასთან ერთად მთავრდება ლამინარული სრიალი. იწყება მრავლობითი (ტურბულენტური) დინება და დისლოკაციების ზეგავისებრი წარმოქმნა. სრიალის სისტემებში (პირველსა და მეორეში) მოძრავი დისლოკაციების ურთიერთგადაკვეთების რაოდენობრივი ზრდა უზრუნველყოფს ახალ-ახალი დისლოკაციური წყაროების უწყვეტ წარმოქმნას. სურ. 17, ა-ს შესაბამისად, დისლოკაციების რაოდენობის უწყვეტი ზრდა, მათი მრავალრიცხოვანი გადაკვეთები და ურთიერთქმედებები, დეფორმაციის განვითარებასთან ერთად იწვევს მათი მოძრაობის წინააღმართა რაოდენობის პროგრესულად მატებას.

ახლად გაჩენილი დისლოკაციები გაჩერებამდე, თანდათან, სულ უფრო და უფრო მოკლე მანძილებზე გადაადგილდებიან. დისლოკაციების, რომლებსაც შეუძლიათ დისლოკაციების ახალ წყაროებად იქცნენ, განარბენების სიგრძე უწყვეტად მცირდება. მათ მოქმედებაში მოსაყვანად (დეფორმაციის გასაგრძელებლად) საჭირო ხდება სულ უფრო და უფრო მაღალი სიდიდის გარედან მოდებული ძვრის ძაბვები.



სურ. 17. დისლოკაციური სტრუქტურის ევოლუცია პლასტიკური დეფორმაციის მატებისას:

ა – დისლოკაციების სიმკვრივის ზრდა;

ბ – უჯრედოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბება;

გ – უჯრედოვანი დისლოკაციური სტრუქტურის ზოლოვან სტრუქტურაში გადაწყობა

ტურბულენტური სრიალისას, დისლოკაციების გადახლართვების, არათანაბრად განაწილებული რთული კონფიგურაციის გროვებისა და შემდგომ უწყვეტი სამგანზომილებიანი ბადის (სურ. 17, ბ) თანმიმდევრობით წარმოქმნა იწვევს განმტკიცების ხარისხის მკვეთრ მატებას. ამ დროს, გადაწყობების შედეგად კრისტალი ნაწვევდება დისლოკაციებისგან შედარებით თავისუფალ მოცულობებად (უჯრედებად), ბადეები კი უფრო მახინჯდება, ე.ი. ხდება კრისტალის სტრუქტურის ფრაგმენტაცია. მოძრავი დისლოკაციები იძულებული არიან „გააღწიონ“ თავმოყრილი დისლოკაციების მაღალი სიმკვრივის არედან. დეფორმაციის გასაგრძელებლად ახალი დისლოკაციური სტრუქტურის მქონე ლითონებს ესაჭიროება მოდებული გარე ძაბვის უწყვეტი მატება.

დისლოკაციის სიმკვრივე მეორე სტადიის დასაწყისში, ჩვეულებრივ, არის $\sim 10^9$ სმ⁻², ხოლო სტადიის დასასრულს აღწევს

$\sim 10^{10}$ სმ⁻²-ს (დისლოკაციურ ბადეში დისლოკაციების სიმკვრივე $\sim 10^{11}$ სმ⁻²-მდე).

მესამე სტადია. აღსანიშნავია, რომ პარალელური სიბრტყეების სისტემაში სრიალი წარმოადგენს მაკროსკოპულ ძვრას, ხოლო სხვადასხვა სისტემის შესაბამისი ძვრების შეუღლება - კრისტალების პლასტიკური დეფორმაციის ძირითად ნაწილს. მესამე სტადია, უმრავლეს შემთხვევაში, იწყება 30....50 % დეფორმაციებისას და მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე. რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, მით ნაკლებია მისი საწყისი დეფორმაცია.

კრისტალის დეფორმირების ეს სტადია ხასიათდება დეფორმაციული განმტკიცების ინტენსიურობის შემცირებით. განმტკიცების ნაწილობრივი შემცირება აიხსნება „დინამიკური მობრუნების“ (ტერმინი გამოიყენება იმის გამო, რომ ლითონის სიმტკიცის კლება ხდება მნიშვნელოვანი პლასტიკური დეფორმაციის პროცესში. კლება არ ხდება განტვირთვისა და დეფორმირებული ლითონის გახურების შემდეგ) და სხვადასხვანიშნავი დისლოკაციების ურთიერთქმედების (ანიჰილაციისას დისლოკაციების სიმკვრივის შემცირება) პროცესებით. აქედან გამომდინარე, იცვლება განმტკიცების მრუდის ამ ნაწილის სახეც - სწორხაზოვანიდან პარაბოლურში გადადის.

დინამიკური მობრუნება დაკავშირებულია მაღალი ძაბვების გავლენით დისლოკაციების გადანაწილებასთან. დეფორმირების განსაზღვრულ ეტაპზე, ხრახნული დისლოკაციების საკმარისი რაოდენობის შემთხვევაში, მადეფორმირებელი მაღალი ძაბვებისა და წინაღობებთან დამუხრუჭებული დისლოკაციების ირგვლივ წარმოქმნილი შინაგანი ძაბვების მოქმედებით, იცვლება სრიალის კრისტალოგრაფია. ამასთან, ვითარდება განივი სრია-

ლი (იგი შესამჩნევია პლასტიკური დეფორმაციის უკვე საწყის სტადიაზე), რომელიც დამუხრუჭებულ ხრახნულ დისლოკაციებს საშუალებას აძლევს გამოვიდეს საკუთარი სრიალის სიბრტყიდან, შემოუაროს მის შემაკავებელ წინაღობას და გადავიდეს მეზობელი სრიალის სიბრტყეზე. დისლოკაციების გადანაწილებას და მთელი დისლოკაციური სტრუქტურის გადაწყობას თან ახლავს დამახინჯებების ნაწილობრივი განმუხტვა (მაბევების რელაქსაცია) მეორადი და პირველადი სრიალის სისტემებში. ე.ი. მესამე სტადია იწყება მაშინ, როცა განივი სრიალის დახმარებით შეიქმნება განუმტკიცებლობის გამომწვევი დისლოკაციების გროვების შემოვლით გადალახვის პირობები და სხვადასხვანიშნიანი დისლოკაციების ანიჰილაციის შესაძლებლობები. ამ დროს უჯრედების ზომები მცირდება და დისლოკაციების სიმკვრივე მათ საზღვრებზე მატულობს. დეფორმაციის მესამე სტადიაზე დისლოკაციების განივი სრიალი უჯრედოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბების განმსაზღვრელი მექანიზმია და ასრულებს ძირითად როლს მის მკაფიოდ ფორმირებაში. საბოლოოდ, განივი სრიალის მექანიზმით დისლოკაციების გადანაწილება მთავრდება 2...5 მკმ ზომების უჯრედოვანი სტრუქტურის წარმოქმნით.

ამგვარად, მესამე სტადია დგება მაშინ, როდესაც განივი სრიალის დახმარებით შეიქმნება დისლოკაციების გროვების შემოვლის შესაძლებლობა. ამასთან, განივი სრიალი ქმნის საწინააღმდეგოანიშნიანი დისლოკაციების ანიჰილაციის შესაძლებლობებს, რაც იწვევს სიმტკიცის შემცირებას.

მესამე სტადიის დასაწყისში კიდურა დისლოკაციების დაგროვება იწვევს დეფორმაციული განმტკიცების გარკვეულ ზრდას. ისინი ამ პერიოდში განივ სრიალში მონაწილეობას ვერ იღებენ,

რადგან საკუთარი სრიალის სიბრტყის დატოვება მხოლოდ გადაცოცებით (კონსერვატიული მოძრაობით) შეუძლიათ. ამისათვის აუცილებელია მასაგადატანის პირობების შექმნა. უფრო გვიან წყობის დეფექტებიანი ხრახნული დისლოკაციების განივი გადაადგილება და იმავდროულად წერტილოვანი (მაგ., ვაკანსიების) დეფექტების რაოდენობის მატება ქმნის კიდურა დისლოკაციების გადასაცოცებლად აუცილებელ პირობას. ამ მომენტიდან კიდურა დისლოკაციებს შეუძლიათ ადვილად დატოვონ საკუთარი სრიალის სიბრტყე და გაზარდონ დისლოკაციების ანიჰილაციის ალბათობა. ანიჰილაციისა და დისლოკაციების გენერირების სიჩქარეების გათანაბრებისას მყარდება განმტკიცება-განუმტკიცებლობას შორის დინამიკური წონასწორობა და დეფორმაციის მატება, პრაქტიკულად, მოდებული ძაბვის მუდმივობისას ხდება.

ამ სტადიაზე, დეფორმაციის განვითარებასთან ერთად, ხდება უჯრედოვანი დისლოკაციური სტრუქტურის გადაწყობა. უჯრედების ზომები კლებულობს, საზღვრებზე კი მატულობს დისლოკაციების სიმკვრივე. დეფორმაციის ძლიერ ლოკალიზებულ ზონებში, უჯრედოვანი სტრუქტურის პლასტიკურობის ამოწურვისას, დისლოკაციურ უჯრედოვან სტრუქტურას ცვლის ზოლოვანი სტრუქტურა (სურ.17,გ), რომელიც ლითონის შეუქცევი დაზიანების – ბზარების – წარმოქმნის მომასწავებელია. ზოლოვანი სტრუქტურის საზღვრები ლითონის მატრიცის უჯრედოვანი სტრუქტურისაგან გამოყოფილია ერთნაირნიშნის დისლოკაციებისაგან შემდგარი დისლოკაციური კედლებით. ეს კედლები თავიანთი ბუნებით დისლოკაციური დიპოლებია.

ზემოთ განხილული იყო წდკ გისოსის მქონე მონოკრისტალური ლითონის განმტკიცების მრუდი პირობითი პოზი-

ციებიდან („იზოლირებული“ დისლოკაციების მოძრაობისა და ურთიერთქმედების პირობები). რეალურად, დეფორმირების პროცესში, ლითონში წარმოიქმნება დისლოკაციური სისტემები, რომლებიც „იზოლირებული“ დისლოკაციებისაგან განსხვავებით, ახალ ფიზიკურ თვისებებს იძენენ. წარმოქმნილ დისლოკაციურ სისტემებს შუძლიათ კოლექტიური გადაადგილება და დისლოკაციური წინაღობების გადალახვა. ამასთან, მათ ირგვლივ წარმოიქმნება შორსმოქმედი ძაბვათა ველი. დეფორმირების საბოლოო ეტაპზე პლასტიკური დეფორმაციის ძირითადი ნაწილი დისლოკაციური სისტემების კოლექტიური, მიმართული მოძრაობა და კოოპერატიული ურთიერთქმედებების შედეგია.

3.4 პოლიკრისტალური ლითონების პლასტიკური დეფორმაცია

პლასტიკური დეფორმაციის მეტად რთული თანამედროვე თეორიის (დისლოკაციების თეორიის) შექმნა მეცნიერებაში წინ გადადგმული მეტად მნიშვნელოვანი ნაბიჯია. ჩვენ მის მხოლოდ საწყის ძირითად საკითხებს შევეხებით.

პოლიკრისტალი შედგება მრავალი (სივრცეში კრისტალოგრაფიულად ნებისმიერად ორიენტირებული) მარცვლისგან (მონოკრისტალისგან). თითოეულ მათგანს, მეზობელი მარცვლების გისოსების ორიენტაციებისგან მკვეთრად განსხვავებული, საკუთარი ორიენტაცია გააჩნია. ნებისმიერადაა ორიენტირებული მათი უპირატესი სრიალის სიბრტყეებიც. შესაბამისად, გამყოფი საზღვრით გამოყოფილი თითოეული მეზობელი მარცვალი, მასზე მოდებული გარე დატვირთვის მიმართ,

ერთმანეთისგან განსხვავებულადაა ორიენტირებული. ამიტომ, სხვადასხვა მარცვლის მარტივი (უპირატესი) სრიალის სიბრტყეების მიმართულებები და დეფორმირებად სხეულში მოქმედი ძვრის მაქსიმალური ძაბვების მიმართულებები ერთმანეთს არ ემთხვევა. აქედან გამომდინარე, პოლიკრისტალური სხეულის სხვადასხვა მარცვალში პლასტიკური ძვრა (სრიალი) სხვადასხვა დროს დაიწყება. დისლოკაციების თეორიის ძირითადი იდეა სწორედაც სრიალის აქტის არაერთდროულობაში მდგომარეობს (არ ხდება ისე, რომ ძვრა სრიალის ყველა სიბრტყეში ერთდროულად დაიწყოს. ჯერ დეფორმირდება ერთი ადგილი, შემდეგ – მეორე, მესამე, შესაძლოა შემდეგ – ისევ პირველი და ა.შ. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ ლითონის ცალკეულ ნაწილში დისლოკაცია სხვადასხვაგვარი წინააღობებით მუხრუჭდება).

ახალი დისლოკაციების გენერირების წყაროები მუშაობას (ძვრას) ხელსაყრელად ორიენტირებულ მარცვლებში უფრო ადრე იწყებენ. როცა მეორე მარცვლის მარტივი სრიალის სიბრტყეების მიმართულებები მხები მაქსიმალური ძაბვების მიმართულებას ემთხვევა, მაშინ მეორე მარცვალში ძვრა დაიწყება მხოლოდ მას შემდეგ, როდესაც მხები მაქსიმალური ძაბვა გადააჭარბებს მოცემული ლითონისათვის ძვრის ძაბვის კრიტიკულ („სასტარტო“) სიდიდეს:

$$\tau_{კრ} = \tau_0 + K_s d, \quad (2)$$

სადაც: τ_0 არის ძაბვა (მისი სიდიდე, დაახლოებით, შესაბამისი ან რამდენადმე მეტია ძვრის კრიტიკულ ძაბვაზე მონოკრისტალის მარტივი სრიალის სიბრტყეებში);

K_5 - მეზობელ მარცვალში სრიალის განვითარებაზე დამოკიდებული მუდმივა;

d – მარცვლის (თუ მარცვალში არ არის განვითარებული სუბმარცვლების ბადე) ან სუბმარცვლების ზომა (მარცვლის შინაგანი ძლიერი ფრაგმენტაციის შემთხვევაში).

მარცვლის საზღვართან (ბარიერთან) დაგროვებული დისლოკაციები წარმოქმნიან ჯამურ ძალთა ველს. ძაბვები საზღვარზე მატულობს და დისლოკაციის გადასვლა სრიალის სხვა სიბრტყეზე ძნელდება. მხოლოდ კრიტიკული სიდიდის მიღწევისას იწყება დისლოკაციების გადასვლა სრიალის სხვა სიბრტყეზე. ამიტომ პლასტიკური დეფორმაცია განვითარებული მარცვლის საზღვრის მქონე პოლიკრისტალებისა მნიშვნელოვნად უფრო დიდ ძალებს საჭიროებს, ვიდრე მონოკრისტალების.

დისლოკაციების დაგროვებამ მარცვლის საზღვარზე ერთ მარცვალში აღძრული და დრეკადად გავრცელებული ძაბვების ძალური ველის სიდიდე შესაძლოა ისეთი გახადოს, რომ მეზობელ მარცვალში ფრანკ-რიდის წყაროების ამოქმედება გამოიწვიოს. ამგვარად, პლასტიკური დეფორმაცია მარცვლიდან მარცვალს გადაეცემა არა მოსრიალე დისლოკაციების საზღვარზე გადასვლით, არამედ ესტაფეტურად. ე.ი. ერთ მარცვალში დისლოკაციის სრიალი ააქტიურებს დისლოკაციის სრიალს მეზობელ მარცვალში. ანუ, მეზობელი მარცვლების საზღვრებთან ერთ-ერთ მარცვალში დისლოკაციების დაგროვებით წარმოქმნილი და სიდიდით მზარდი შინაგანი ძაბვის ველი. გარკვეული დროის შემდეგ, დააწვება და მეორე მარცვალში ადაგზნებს უფრო მაღალი „სასტარტო“ ძაბვის მქონე დისლოკაციის წყაროს.

მეზობელ მარცვალში წარმოშობილი დისლოკაციები იწყებენ სრიალს მარცვლის საზღვრიდან სიღრმისკენ, თითქოს პირველ მარცვალში დაწყებულ სრიალს (ძვრას) აგრძელებენ, ანუ მეზობელი მარცვალი პლასტიკურად დეფორმირდება. ამრიგად, მარცვლის საზღვრები მარცვლიდან მარცვლამდე დეფორმაციის გავრცელებას აკავებენ მანამ, სანამ მადეფორმირებელი ძაბვა არ მიაღწევს იმ სიდიდეს, რომლის დროსაც ერთ მარცვალში სრიალის სიბრტყეების სასაზღვრო უბნების ბოლოებზე ძაბვების კონცენტრაცია არ გამოიწვევს დისლოკაციების სრიალს (დეფორმაციას) მეზობელ მარცვლებში.

0,3 $T_{\text{დფ}}$ -ზე მეტად გახურებისას მოქმედებს დისლოკაციების გადაადგილების სხვა მექანიზმი - გადაცოცება. ამ დროს ვაკანსიების მიერთებით ხდება დისლოკაციის დიფუზიური გადაადგილება გისოსის სხვა მეზობელ სიბრტყეში. გადაცოცება ასუსტებს მეორე ფაზის დამუხრუჭების ეფექტს. 0,3 $T_{\text{დფ}}$ -ზე მეტად გახურებისას ვაკანსიები ძლიერ მოძრავია, მათი აუცილებელი რაოდენობის წარმოქმნა კი პლასტიკური დეფორმაციისას ხდება.

დასაწყისში, მოდებული ძაბვების ზრდისას, დეფორმაციაში თანმიმდევრობით მონაწილე მარცვლების დეფორმირებისა და კრისტალოგრაფიული მობრუნების ერთდროულად, ხდება იმ მარცვლებისა და მათი სრიალის სიბრტყეების დეფორმაციისათვის ხელსაყრელ მდგომარეობაში მობრუნება, რომლებიც აქამდე პროცესში არ მონაწილეობდნენ. ამ მარცვლებშიც მათთვის დამახასიათებელი ძვრის ძაბვის კრიტიკული სიდიდის მიღწევას იწყება სრიალი. საბოლოოდ კი პლასტიკურ დეფორმაციაში ებმება ყველა მარცვალი.

ცხადია, პოლიკრისტალურ ლითონში მარცვლები სხვადასხვა კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის გამო, არაიზოტროპულად (არაერთდროულად) დეფორმირდებიან. ამიტომ, მათ შორის უწყვეტობის შესანარჩუნებლად, აუცილებელია შეთანხმებული იყოს ფორმის ცვლილების ინტენსიურობა და მარცვლების ურთიერთსივრცული მდებარეობა მისი მეზობელი მარცვლების დეფორმაციულ ფორმაცვლასა და მოზრუნებასთან. ეს შესაძლებელია მხოლოდ მრავლობითი სრიალის რეალიზაციისას. მარცვლების საზღვრებზე დისლოკაციების დაგროვების შედეგად, მრავლობითი სრიალი (ერთდროული სრიალი სრიალის რამდენიმე სისტემაში) ლითონის დეფორმირების უკვე ადრეულ, საწყის სტადიაზე იწყება. სასაზღვრო მოცულობებში კი უფრო ადრე, ვიდრე მარცვლის შიგნით.

ვარაუდობენ, რომ ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე (ეკვივოგენიურ ტემპერატურაზე დაბლა) დეფორმირებადი მარცვლების სრულ შეთანხმებას-აკომოდაციას (ურთიერთშეწყობასა და ბრუნვას, ანუ ერთი დეფორმირებადი მარცვლის მეზობელი მარცვლების დეფორმაციასთან მთლიანობის დაურღვევლად შეწყობას) უზრუნველყოფს მარცვალშიგა დისლოკაციური სრიალი. კერძოდ, ხდება საზღვრისპირა არეების (მარცვლის საზღვრების ორივე მხრიდან) უფრო ინტენსიური ლოკალური დეფორმირება, რადგან აქ მოქმედებს სრიალის სიბრტყეების ოჯახის უფრო დიდი რაოდენობა, ვიდრე მათგან მოშორებით - მარცვლის სიღრმეში.

საზღვრისპირა არეებში საზღვრების გასწვრივ დისლოკაციების გადაადგილება იწვევს ერთი მარცვლის მეორის მიმართ წანაცვლებას. დეფორმაციაში თვით მარცვლის მონაწილეობის გააქტიურება აადვილებს დეფორმაციას საზღვრისპირა არეებ-

ში. ამასთან, შინაგანი პლასტიკური დეფორმაცია ასუსტებს მარცვლის საზღვრებთან აღძრულ მბევების კონცენტრაციას. დეფორმაციების ერთობლიობა მარცვალსა და საზღვრისპირა არეებში უზრუნველყოფს შეთანხმებულ ფორმაცვლას, ერთი მარცვლის მეორის მიმართ მობრუნებას და მათ შორის მთლიანობის შენარჩუნებას.

3.5 ფრანკ-რიდის დისლოკაციის წყარო

სრიალის განვითარება განიხილება დისლოკაციის წარმოქმნისა და გადაადგილების პროცესად.

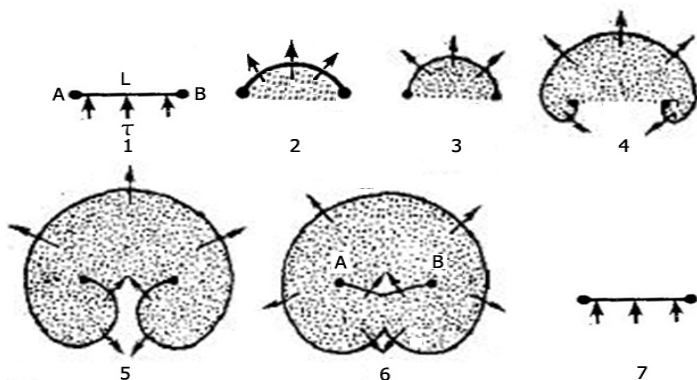
როგორც აღნიშნული იყო, ზოგადად, დისლოკაციები წარმოიქმნება:

1. ნადნობიდან კრისტალების ზრდისას (ენერგეტიკულად ძნელია ატომების ახალი რიგის დაწყება);
2. კრისტალიზაციის პროცესში – ოდნავ განორიენტირებული დენდრიტების (ტემპერატურის გრადიენტით გამოწვეული განორიენტირება, კონვექციური დინებები და სხვ.) შეზრდის გამო, დისლოკაციების მაქსიმალური რაოდენობა მარცვლების საზღვრებზეა;
3. ვაკანსიების დახურვის დროს – კრისტალის შენებისათვის ატომების ნაკლებობის გამო, ვაკანსიების დახურვისას;
4. გამყარების დროს – ქიმიური შედგენილობის არაერთგვაროვნობისას (ორი ფაზის ან ქიმიური კომპონენტების კრისტალური გისოსების დაუმთხვევლობის გამო, პირაპირზე დისლოკაციები წარმოიქმნება);

5. დატვირთვის მოდებისას (წარმოქმნილი დისლოკაციები იძვრიან და იწვევენ პლასტიკურ დეფორმაციას. პლასტიკური დეფორმაციის დროს დისლოკაციები შეიძლება გამრავლდეს ფრანკ-რიდის დისლოკაციის წყაროთი).

იდეალურ კრისტალში გარე ძალების ზემოქმედებით დისლოკაციების წარმოსაქმნელად აუცილებელია ძვრის გამოწვევა სრიალის სიბრტყის რომელიმე ნაწილში. პრაქტიკულად გაიანგარიშება არა მოდებული ძალა, არამედ ძვრის თეორიული ძაბვის ($\tau_{თეორ.}$) სიდიდე ან მხლეჩი ძაბვა სრულყოფილ კრისტალში. დატვირთვის მოდებამდე კრისტალში არსებული დისლოკაციების რაოდენობა საკმარისი არ არის პლასტიკური დეფორმაციისათვის. როგორც წესი, ლითონის დეფორმირებისას კრისტალებში დისლოკაციების სიმკვრივე რამდენიმე რიგით მაღლდება. ამ მოვლენის ასახსნელად უნდა დავუშვათ, რომ კრისტალში არსებობს დისლოკაციის გენერირების რაღაც წყარო. ლითონის დეფორმირებისათვის აუცილებელი დისლოკაციების რაოდენობის შესაქმნელად, ზედაპირზე გამოსული დისლოკაციებისა და ანიჰილაციით გამოწვეული მათი დანაკარგების კომპენსირებისათვის უნდა ამოქმედდეს დისლოკაციების წყაროები კრისტალში.

ახალი დისლოკაციების წარმოქმნის რამდენიმე მექანიზმი არსებობს: ფრანკ-რიდის, ბარდინ-ხერიჩის (დისლოკაციების მოძრაობა ხდება ვაკანსიების ჩასახვით ან შთანთქმით) დისლოკაციები წარმოიქმნება კრისტალიზაციის პროცესში (სტრუქტურული ან შეუსაბამობის დისლოკაცია) და სხვ. მათ შორის ყველაზე მნიშვნელოვანია ფრანკ-რიდის წყარო სურ. 18.



სურ. 18. დისლოკაციების გამრავლება ფრანკ-რიდის მექანიზმით

სურ. 18-ის შესაბამისად, AB ხაზი არის სრიალის სიბრტყეში მდებარე დისლოკაციის უბანი. მისი ბოლოები A და B წერტილებშია დამაგრებული (მაგ., მინარევი ატომებით). უწყვეტად მზარდი გარე მექანიკური ძაბვების მოდებისას, სრიალის სიბრტყეში აღმრული, მხევი ძაბვების მოქმედებით დამაგრებული დისლოკაციის ხაზი გამოიზნიება ისრების მიმართულებით (2,3). ამ დროს ხაზობრივი დაჭიმულობა ეწინააღმდეგება დისლოკაციის ხაზის გამრუდებას და ცდილობს გამართოს (გასწოროს) დისლოკაცია. რომელიღაც მომენტში AB ხაზი ნახევარწრის ფორმას იღებს (3). ამ მომენტში მისი გადაადგილების წინაღობა მნიშვნელოვნად გაზრდილია, ხოლო τ ძაბვა მაქსიმალურია:

$$\tau_{gr} = \frac{Gb}{L}, \quad (3)$$

სადაც L არის A B მონაკვეთის სიგრძე (2R);

G – ძვრის მოდული;

b – ატომთშორისი მანძილი (გისოსის პარამეტრი).

თითოეული გაფართოებული მარყუჟისათვის კრიტიკული მდგომარეობა იქმნება მაშინ, როდესაც მისი რადიუსი, დაახლოებით, დამაგრების A და B წერტილებს შორის L მანძილის ტოლი გახდება, ხოლო ძაბვა საკმარისი იქნება მარყუჟის ამ მდგომარეობაში გადასაყვანად. გამოზნექილი რკალის შუა ნაწილი, ნაპირებთან შედარებით, უფრო ნელა მოძრაობს, რის გამოც დისლოკაციები დამაგრების წერტილების ირგვლივ ტრიალდებიან და მრუდი თანდათან გარდაიქმნება ორ შეუღლებულ ნახევარსპირალად, რომელთა ძალური ველები ერთმანეთს იზიდავენ, ანუ მე-4 მდგომარეობაში დისლოკაციის მარყუჟში ჩნდება საპირისპირო ნიშნის ხრახნული კომპონენტები. ისინი მოძრაობენ შემხვედრად (5) და ანადგურებენ ურთიერთს (6).

როდესაც გარე მექანიკური ძაბვა $\tau > \tau_{კრ}$ -ზე, კონფიგურაცია არასტაბილური ხდება. ამ მომენტიდან სპირალისებრი რკალების შეხებისას, დისლოკაცია გაიყოფა ორ ნაწილად და წარმოქმნის ჩაკეტილ მრუდს (რომლის შიგნით არის პირველსაწყისი მრუდხაზოვანი დისლოკაციის AB მონაკვეთი) და მრუდხაზოვან AB დისლოკაციას.

ძაბვის მოქმედებით ჩაკეტილი მარყუჟი მიიღებს წრის ფორმას და გააგრძელებს გაფართოებას, ხოლო მარყუჟის შიგნით განთავსებული დისლოკაციის AB მონაკვეთი გადადის საწყის მდგომარეობაში (7) და დისლოკაციის გენერატორი მზადაა 1–7 ციკლის გასამეორებლად. ასეთი პროცესები გაგრძელდება მანამ, სანამ დისლოკაციაზე ძაბვა იმოქმედებს.

დისლოკაციების გენერირება, გამრავლება და გადაადგილება იწვევს პლასტიკურ დეფორმირებას. კრისტალის პლასტიკური დეფორმაციისათვის აუცილებელი ძალა განისაზღვრება ორი

ფაქტორით: დისლოკაციების არსებობით და მათი გადაადგილების შესაძლებლობით. აღნაგობის დეფექტების (ჩანართების, გისოსის დამახინჯების) არსებობისას, დეფორმაციის წინაღობა იზრდება, ანუ ისინი ეწინააღმდეგებიან დისლოკაციის მოძრაობას და ლითონს განამტკიცებენ.

აღსანიშნავია, რომ, ერთი მხრივ, აუცილებელია (დეფორმაციის წინაღობის შესამცირებლად) დისლოკაციების წარმოქმნის ხელშემწყობი დეფექტების არსებობა, თუმცა მეორე მხრივ - ისინი ამნელებენ დისლოკაციების მოძრაობას და განამტკიცებენ ლითონს. დეფექტების ასეთი ორგვარი გავლენა სიმტკიცეზე განპირობებულია დეფექტების რაოდენობით.

ფრანკ-რიდის წყაროთი გენერირებული დისლოკაციების რაოდენობა თეორიულად უსასრულოა. პრაქტიკულად ეს რიცხვი დიდდება მანამ, სანამ დისლოკაციების დრეკადი ველების ურთიერთქმედება არ დააბალანსებს ძვრის კრიტიკულ ძაბვას. ამის შემდეგ წყარო პასიურდება.

ფრანკ-რიდის ერთ დისლოკაციას ასეულობით ახალი დისლოკაციის წარმოქმნა და სრიალის პროცესში წარმოქმნილი ახალი დისლოკაციების სიმკვრივის 10^8 დან 10^{12} სმ^{-2} -მდე გაზრდა შეუძლია. სიმტკიცის უდიდესი მნიშვნელობა მიიღება იმ შემთხვევაში, როდესაც დეფორმირებად ლითონში დისლოკაციების სიმკვრივე 10^{12} სმ^{-2} -ს გაუტოლდება. იმ ადგილებში, სადაც დისლოკაციების სიმკვრივე ზღვრულ სიდიდეს მიაღწევს, იქმნება ბზარის ჩასახვის პირობები.

3.6 დისლოკაციების დამუხრუჭების ფაქტორები და მათი ქმედების თავისებურებები

დისლოკაციების მოძრაობის დამუხრუჭება ან მათი სრული შეჩერება შესაძლებელია სხვადასხვა ფაქტორების ზემოქმედებით. განსაზღვრულ პირობებში დისლოკაციების ძალური ველი შეიძლება ისეთი სიდიდის გახდეს, რომ თვითონ დაიწყოს ფრანკ-რიდის დისლოკაციების წყაროს გენერირება და დისლოკაციები ახლიდან აამოძრაონ. დისლოკაციების მოძრაობა და დამუხრუჭება გადამწყვეტ გავლენას ახდენს როგორც ლითონის დამუშავების პროცესებზე (პლასტიკური დეფორმაცია, რეკრისტალიზაცია და ა.შ.), ისე მის მექანიკურ თვისებებზე. არსებობს დისლოკაციების დამუხრუჭების რამდენიმე ფაქტორი: გისოსის ხახუნის ძაბვა (პაიერლს - ნაბაროს ძაბვა); კოტრელის ატმოსფერო; სნუკის ატმოსფერო; სუბუკის ატმოსფეროები; დისლოკაციების დამუხრუჭება მარცვლებისა და სუბმარცვლების საზღვრებით; დისლოკაციების დამუხრუჭება მინარევი არალითონური ჩანართებით; დისლოკაციების დამუხრუჭება სხვა დისლოკაციებით; დისლოკაციების ურთიერთქმედება ვაკანსიებთან და კვანძთაშორის ატომებთან.

განვიხილოთ მათი მოქმედების თავისებურებები.

3.6.1 გისოსის ხახუნის ძაბვა (პაიერლს - ნაბაროს ძაბვა)

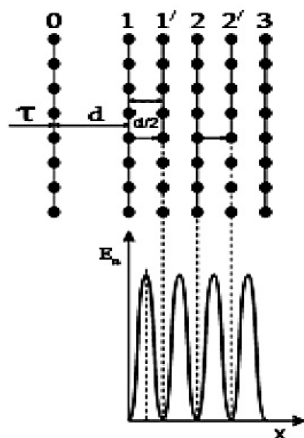
მოსრიალე დისლოკაციის ძირითადი წინააღმდეგობები არის სხვა დისლოკაციები, წერტილოვანი და ზედაპირული დეფექტები და რეალურ კრისტალებში დიდი რაოდენობით არსებული სტრუქტურის სხვა ელემენტები.

დეფექტებისგან თავისუფალ კრისტალში გისოსის პერიოდული ველით განპირობებული, ე.წ., „ხახუნის“ ძალა ეწინააღმდეგება დისლოკაციის სრიალს. ამ ძალის სიდიდე განისაზღვრება გისოსის თვისებებით, რისთვისაც შემოღებულია ცნება „გისოსის ხახუნის“ ძალა. გისოსის ხახუნის, ანუ პაიერლს-ნაბაროს ძალა, შედარებადია იმ ძაბვასთან, რომელიც უნდა გადალახოს დისლოკაციამ ძალიან მსხვილ მარცვლებში მოძრაობისას, ანუ უფრო ზუსტად, შედარებადია სუფთა ლითონების მონოკრისტალების დენადობის ზღვართან.

დისლოკაციის საწყისი მდგომარეობიდან მეზობელ მდგომარეობაში გადაადგილებისას, ატომების გადანაცვლება იწვევს ატომთშორისი ძალების სიმეტრიის დარღვევას. ენერგეტიკულ ორმოში ორი მეზობელი მდგომარეობის გამყოფი პოტენციალური ბარიერის გადასალახად და მინიმალური ენერგიის მქონე (მეზობელ) მდგომარეობაში გადასადგილებლად დისლოკაციას ესაჭიროება, გარე ძალების ზემოქმედებით, პოტენციალური ენერგიის ამადლება. ამ ძალას პაიერლს - ნაბაროს ძალა ეწოდება. რეალურ პირობებში მისი გამოთვლა და ექსპერიმენტულად განსაზღვრა რთულია, რადგან დენადობის ნამდვილი ზღვარი დამოკიდებულია არა მხოლოდ ამ ძალაზე, არამედ სრიალის შემაფერხებელ სხვა ფაქტორებზეც.

დისლოკაციების მოძრაობასთან დაკავშირებით, მასალის მნიშვნელოვან მახასიათებლად ითვლება ე.წ. პაიერლსის ძაბვები (ბარიერები). განვიხილოთ თუ როგორ იცვლება დისლოკაციაზე მოქმედი ძალები ბიურგერსის ვექტორის სიდიდის შესაბამის მანძილზე გადაადგილებისას. მეზობელი სიბრტყეების მხრიდან დისლოკაციაზე მოქმედი განზიდვის ძალები

საწყის მდგომარეობაში ერთნაირია და საწინააღმდეგო მხარეებისკენ სიმეტრიულადაა მიმართული. სურ.19.



სურ. 19. დისლოკაციის გადაადგილება გისოსში და მისი პოტენციალური ენერგიის ცვლილების პერიოდული ხასიათი

საწყისი მდგომარეობიდან (1) დისლოკაციის გადაადგილების დაწყებასთან ერთად, დიდდება განზიდვის ძაბვა და $d/4$ მანძილის გავლისას (d – არის სიბრტყეთა შორის მანძილი) აღწევს მაქსიმუმს. $d/2$ მანძილის შესაბამის $1'$ მდგომარეობაში გადასვლის შემდეგ იგი, მიზიდულობის ძალების გავლენით, მცირდება მინიმუმამდე. პროცესი მეორდება $1'$ მდგომარეობიდან 2 მდგომარეობაში გადასვლისას. ამასთან, ნახევარსიბრტყე 2 დაიძვრება მარჯვნივ და გადადის $2'$ მდგომარეობაში. ძაბვების ასეთი ციკლური ცვლილება ხდება დისლოკაციის მოძრაობის მთელი დროის განმავლობაში. მაშასადამე, გისოსში დისლოკაციის გადაადგილებისას ის განიცდის მამუხრუჭებელი დრეკადი ძაბვების ციკლურ ცვლილებას. ეს ისე გა-

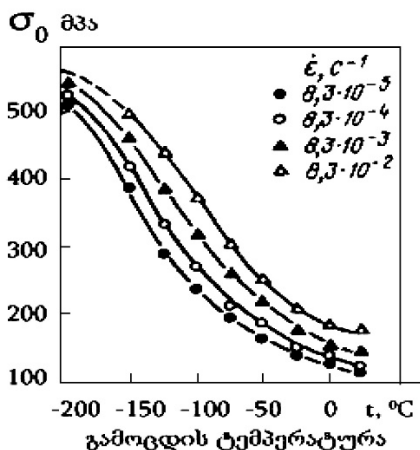
მოიყურება, თითქოს დისლოკაცია გისოსში მუხრუჭდება ხახუნის ძალებით.

E_n -ის მაქსიმალური (ამპლიტუდური) მნიშვნელობა არის პაიერლსის ძალის ბარიერი τ_n . ზოგადად, რაც უფრო მცირეა პაიერლსის ბარიერი (τ_n), მით უფრო ნაკლები ენერგიაა საჭირო დისლოკაციის მოძრაობისათვის. იმისათვის რომ დისლოკაცია თავის სრიალის სისტემაში გადაადგილდეს აუცილებელია, ფაქტობრივად მოდებული ძაბვა $\tau_{\text{მოდ}}$ აღემატებოდეს პაიერლსის ძაბვა- τ_n -ს. ეს ნიშნავს, რომ კრისტალზე (კრისტალიტზე) ძვრის ძაბვის მოდებისას, პლასტიკური დეფორმაცია უფრო ადრე დაიწყება სრიალის იმ სისტემაში, რომელშიც $\tau_{\text{მოდ}}$ სხვებზე ადრე გადააჭარბებს პაიერლსის ძაბვას.

ლითონის ტემპერატურის შემცირებისა და დეფორმაციის სიჩქარის ამალღებისას გისოსის ხახუნის ძაბვა დიდდება. ოთახის ტემპერატურაზე დაბლა ხახუნის ძაბვის ამალღება დასაწყისში ნელია, ხოლო შემდეგ უფრო სწრაფია, როგორც ეს სურ. 20-ზეა წარმოდგენილი. ძალიან დაბალ ტემპერატურებზე σ_0 -ის ამალღება ხელახლა ნელდება, რადგან უახლოვდება თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას. ხახუნის ძაბვა ოთახის ტემპერატურაზე უფრო მაღალ ტემპერატურებზე აღარ არის ტემპერატურაზე დამოკიდებული (დამოუკიდებელ მნიშვნელობებს ინარჩუნებს).

განსაკუთრებით მაღალი სისუფთავის ლითონისათვის - $(C+N) < 10^{-7} \%$ ექსპერიმენტულად დადგენილი σ_0 -ის მნიშვნელობები $18 \div 21$ მპა-ს შეადგენს. ჩანერგვის მინარევები და კრისტალური გისოსის აღნაგობის დეფექტები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ σ_0 -ზე. $(C+N) = 10^{-2} \%$ -ის რაოდენობის

ჩანერგვის მინარევების შემთხვევაში, α რკინისთვის σ_0 -ის მნიშვნელობები 30 მპა-ს შეადგენს, ხოლო ნიკელის ფუძის შენადნობებისა და ლეგირებული აუსტენიტური ფოლადებისათვის - 60 – 70 მპა-ს.



სურ. 20. ფოლადი 10-ის გისოსის ხახუნის ძაბვის σ_0 -ის დამოკიდებულება გამოცდის ტემპერატურასა და დეფორმაციის სიჩქარეზე

აღსანიშნავია, რომ წდკ გისოსის მქონე ტიპურ ლითონებში, რომლებსაც დისლოკაციის დიდი სიფართე და, შესაბამისად, პაიერლს-ნაბაროს მცირე ძალა ახასიათებს, ამ ძალის შენატანი დენადობის ზღვრის რეალურ მნიშვნელობაში ძალიან მცირეა. მდკ გისოსის მქონე გარდამავალ ლითონებში პაიერლს-ნაბაროს ძალა უფრო მეტია, ვინაიდან ასეთი ლითონების გისოსებში ვლინდება ატომთშორისი კავშირების განსაზღვრული მიმართულება და, შესაბამისად, დისლოკაციის სიფართე მცირეა.

3.6.2 კოტრელის ატმოსფერო

დისლოკაცია ურთიერთქმედებს მინარევების ატომებთან, რომლებიც დისლოკაციის სიახლოვეს წარმოქმნიან გროვებს - „ატმოსფერებს“. მინარევი (ან მალეგირებული) ელემენტებისა და დისლოკაციების დრეკადი ძაბვების არეების ურთიერთქმედების შედეგად, მინარევი ატომები დისლოკაციებთან მიზიდებიან. რაც უფრო მეტია მინარევისა და ძირითადი ლითონის ატომებს შორის გეომეტრიული ზომების სხვაობა, მით მეტია დრეკადი ურთიერთქმედების ენერგია მათ შორის.

კიდურ დისლოკაციას აქვს როგორც კუმშვის, ისე გაჭიმვის არეები. მინარევი (ან მალეგირებული) ელემენტების ატომები ამ არეებში ადაბლებენ ძაბვებს. ჩანერგვის ატომებს, ძირითად (გამხსნელ) ლითონის ატომებთან შედარებით, როგორც წესი, ზომები უფრო მცირე აქვთ. მინარევი ატომები მიიზიდებიან გაჭიმული არეებით ექსტრა სიბრტყის კიდის ქვეშ და განთავსდებიან მათში (მათთვის აქ უფრო ადვილია განთავსება, ვიდრე გისოსის უდეფექტო ზონაში).

პრაქტიკულად, ჩანაცვლების ატომებსაც გამხსნელი ლითონის ატომებისაგან განსხვავებული ზომები აქვთ. თუ მათი ზომები გამხსნელის ატომების ზომებს აღემატება, მაშინ ისინი განთავსდებიან გაჭიმვის არეებში, ხოლო თუ ნაკლებია – კუმშვის არეებში. აღსანიშნავია, რომ დისლოკაციებთან ჩანერგვის ატომები ჩანაცვლების ატომებზე ძლიერ მიიზიდებიან.

ჩანერგვის ატომები სრულყოფილ და დამახინჯებულ კრისტალურ გისოსებზე სხვადასხვაგვარად მოქმედებენ: სრულყოფილი გისოსის არეში ისინი ქმნიან ძაბვების არეს (სრულ-

ყოფილი გისოსის დამახინჯების ხარჯზე), დამახინჯებულში კი ამცირებენ გაჭიმული არის დამახინჯებას.

დისლოკაციების დრეკადი ველები დისლოკაციის ღერძის სიახლოვეს მინარევების ამაღლებულ კონცენტრაციას ქმნიან. მყარ ხსნარში დისლოკაციის ხაზის ირგვლივ წარმოქმნილი მინარევი ჩანერგვის ატომების, საშუალოსთან შედარებით, გაზრდილი კონცენტრაციის არეს კოტრელის ატმოსფეროს უწოდებენ. კოტრელის ატმოსფერო (დისლოკაციის ხაზის ირგვლივ წერტილოვანი დეფექტების არაერთგვაროვანი განაწილება) იწვევს დისლოკაციის დამაგრებას (ზოგ შემთხვევაში მინარევების დისლოკაციაზე კოაგულაციას). დამაგრებული დისლოკაციის მინარევი ატმოსფეროდან მოსაწყვეტად კი აუცილებელია მნიშვნელოვანი მექანიკური ძაბვა.

მინარევების ან მალეგირებელი ელემენტების ატომები დისლოკაციებთან კოტრელის ატმოსფეროში დაკავშირებულია დრეკადი ურთიერთობის ძალებით. მოსრიალე დისლოკაცია ისწრაფვის თან გაიყოლოს კოტრელის ატმოსფერო. ასეთ შემთხვევაში დისლოკაციის მოძრაობის სიჩქარე ლიმიტირდება ატმოსფეროში შემავალი ატომების მიგრაციის სიჩქარით, ანუ სრიალის სიჩქარეს განსაზღვრავს ატმოსფეროს ატომების მოძრაობის (დიფუზიის) სიჩქარე. გახსნილი ელემენტების ატომების ატმოსფეროს, მის ცენტრში არსებულ დისლოკაციასთან ერთად, გადაადგილება შეუძლია მხოლოდ მაღალი ტემპერატურებისა და დისლოკაციის მოძრაობის ძალიან დაბალი სიჩქარეებისას (დისლოკაციების კოტრელის ატმოსფეროებთან ერთად სრიალის ნათელი მაგალითია ლითონის ცოცვადობა).

თუ სრიალის სიჩქარე აღემატება ატმოსფეროს ჩამორჩენის დაწყების სიჩქარეს (სრიალის სიჩქარის გადიდებისას ატმოსფე-

რო რამდენადმე ჩამორჩება დისლოკაციის ბირთვს), მაშინ დისლოკაციისა და ატმოსფეროს მიზიდულობის ძალა დისლოკაციებს ამურუქებს.

კოტრელის ატმოსფეროებს, დეფორმირების გარკვეული (ამაღლებული) სიჩქარეებისას ან დაბალ ტემპერატურებზე, არ შეუძლიათ წამოეწიონ მოძრავ დისლოკაციებს და ცდილობენ მათ შეკავებას (დამუხრუჭებას). დისლოკაცია მოძრაობას შეძლებს მხოლოდ საკუთარი ატმოსფეროდან მოწყვეტის შემთხვევაში. დისლოკაციასთან ატმოსფეროს ატომების კავშირის ენერგიას განსაზღვრავს ის მუშაობა, რომლის დახარჯვაც აუცილებელია დისლოკაციის მოსაწყვეტად საკუთარი ატმოსფეროდან. თუ გარედან მოდებული ძაბვა საკმარისი არ არის ატმოსფეროდან დისლოკაციის მოსაწყვეტად, მაშინ დისლოკაცია დარჩება უძრავ, ე.ი. დამაგრებულ, მდგომარეობაში. მინარევებითა და ატომების მცირე დანამატებით კოტრელის ატმოსფეროებით ასეთ დამაგრებებს დიდი წვლილი შეაქვს ლითონის განმტკიცებაში. მინარევების ატმოსფეროებიდან დისლოკაციების მოწყვეტით აიხსნება პლასტიკური დეფორმაციისათვის აუცილებელი ძაბვების მკვეთრი ვარდნა და, ამასთან, დენადობის კბილის წარმოქმნა გაჭიმვის მრუდის დენადობის ზღვარზე.

კოტრელის ატმოსფეროდან დისლოკაციის მოწყვეტას ხელს უწყობს სითბური ფლუქტუაციები. მათ აქვთ უნარი დისლოკაციის ხაზში წარმოქმნან ატმოსფეროს ატომებიდან თავისუფალი რამდენიმე ატომთშორისი მანძილის სიგრძის ნახევარმარყუქი. სურ.21.



სურ. 21. დისლოკაციის მოწყვეტა კოტრელის ატმოსფეროდან

დისლოკაციის გადანაღუნები ერთმანეთს მოდებული ძაბვების მოქმედებით შორდება. დისლოკაცია თანდათან თავისუფლდება მაკავებელი ატმოსფეროდან და იწყებს მოძრაობას. ტემპერატურის დაწვეისას, კოტრელის ატმოსფეროდან დისლოკაციის მოწყვეტაში თერმული აგზნების როლი ეცემა (ფლუქტუაციების მოქმედება წყდება) და დისლოკაციის გასათავისუფლებლად აუცილებელია მოდებული გარე ძაბვების ამადლება.

ტემპერატურის შემცირებისას, კოტრელის ატმოსფეროში მაღლდება მინარევი ატომების კონცენტრაცია და როცა მათი რაოდენობა გადააჭარბებს ხსნადობის ზღვარს, ლითონში მეორე ფაზა გამოიყოფა.

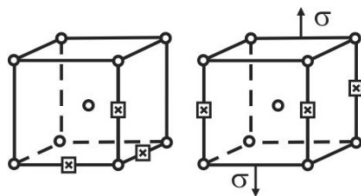
აღსანიშნავია, რომ ლითონში მინარევი და მალეგირებული ატომების თუნდაც მცირე (0,01–0,001 %) რაოდენობის დანამატები იწვევენ კოტრელის ატმოსფეროს წარმოქმნას, დისლოკაციების დამურუჭებას და, პრაქტიკულად, ლითონის მნიშვნელოვან განმტკიცებას.

3.6.3 სნუკის ატმოსფერო

მინარევი ატომების მოწესრიგებულად განლაგება შესაძლებელია კიდური და ხრახნული დისლოკაციების ირგვლივ, ძაბვების ველებში. დისლოკაციებით დამახინჯებულ მდკ კრის-

ტალური გისოსის გაჭიმულ ოქტაედრულ სიცარიელებში მოწესრიგებულად განლაგებული ჩანერგვის ატომებით ფორმირებულ ატმოსფეროებს სნუკის ატმოსფეროები ეწოდება. სხვაგვარად, სნუკის ატმოსფერო ეწოდება მდკ კრისტალურ გისოსებში დისლოკაციის ხაზის ირგვლივ მინარევი ჩანერგვის ატომების მოწესრიგებული განლაგების არეს. სნუკის ატმოსფერო ამუხრუჭებს ამ მოწესრიგების გამომწვევი დისლოკაციის მოძრაობას.

ჩანერგვის ელემენტები (მაგ., რკინაში – ნახშირბადი და აზოტი) ერთნაირი ალბათობით ავსებენ ძაბვებისგან თავისუფალ მდკ გისოსში ოქტაედრულ სიცარიელებს, სამი სხვადასხვა კრისტალოგრაფიული ღერძის გასწვრივ (სურ. 22, ა).



სურ. 22. ჩანერგვის ატომების (x) განლაგება ოქტაედრულ სიცარიელებში:

ა– მოდებული ძაბვების გარეშე;

ბ–გამჭიმავი (σ) ძაბვებისას

მდკ კრისტალურ გისოსზე მოდებული გამჭიმავი ძაბვები, ერთ-ერთი მიმართულების გასწვრივ, რკინის ორ ატომს შორის მანძილის ოდნავ ცვლილებას (გაზრდას) იწვევს. შესაბამისად, განლაგების უკეთესი პირობები ექმნება (სურ.19, ბ) ამ მიმართულებით ჩანერგვის ატომებს. ატომების განლაგების მოწესრიგების ასეთი ეფექტი (სნუკის ეფექტი) შეინიშნება როგორც კიდური, ისე ხრახნული დისლოკაციების ირგვლივ არსებულ

დაძაბულობების ველებში. სნუკის ატმოსფეროების წარმოქმნა ამცირებს კრისტალის თავისუფალ ენერგიას. კოტრელის ატმოსფეროს შედარებით უფრო ნელი წარმოქმნისაგან განსხვავებით (რაც უკავშირდება ატომების მნიშვნელოვან მანძილზე გადაადგილებას), სნუკის მოწესრიგება ხდება უფრო სწრაფად. ამ დროს ადგილი აქვს ატომების გადახტომას კრისტალის ერთი, ოქტაედრული, სიცარიელიდან მეზობელ, ოქტაედრულ, სიცარიელეში.

3.6.4 სუძუკის ატმოსფეროები

გაჭიმული დისლოკაციის წყობის დეფექტებში მინარევი ატომების ან მალეგირებელი ელემენტების საშუალოსთან შედარებით მყარ ხსნარში, განსხვავებული კონცენტრაციის არეს სუძუკის ატმოსფეროს უწოდებენ. ან სხვაგვარად, სუძუკის ატმოსფეროს უწოდებენ გაჭიმული დისლოკაციის წყობის დეფექტში მინარევი ატომების ან მალეგირებელი ელემენტების კონცენტრაციის ცვლილებას. პრაქტიკულად, სუძუკის ატმოსფერო არის წყობის დეფექტებში ფორმირებული, ჩანერგვის ან ჩანაცვლების მინარევი ატომების (ან მალეგირებელი ელემენტების) რამდენიმე ატომური პროცენტით ამალეებული მინარევი ატომების ღრუბლები. მაგ., წდკ კრისტალში გაჭიმული დისლოკაციის წყობის დეფექტი არის ჰმწ გისოსის თხელი შუაშრე, რომელშიც მინარევი ატომების ხსნადობა განსხვავებულია წდკ კრისტალში მათი ხსნადობისაგან.

ზოგადად, წდკ და ჰმწ გისოსებში მინარევი და მალეგირებელი ელემენტების ხსნადობის ზღვრები განსხვავებულია.

მაღალ ტემპერატურაზე წყობის დეფექტებსა და წდკ გისოსს შორის ატომების დიფუზიური გადანაწილება ორ ფაზას შორის ელემენტების დიფუზიური გადანაწილების ანალოგიურია. ამის გამო, სუბუკიმ ასეთ გადანაწილებას გახსნილ ატომებთან გაჭიმული დისლოკაციის ქიმიური ურთიერთქმედება უწოდა. მინარევი ატომები ან დიფუნდირებენ წყობის დეფექტში, ან მისგან გამოდიან. ამასთან, წდკ გისოსის ძირითად მოცულობაში საშუალო კონცენტრაცია, პრაქტიკულად, მუდმივი რჩება. სუბუკის ატმოსფეროში გახსნილი ატომების კონცენტრაციის ცვლილების თვითნებური პროცესი ამცირებს წყობის დეფექტის ენერგიას და ამით აფართოებს გაჭიმულ დისლოკაციას. კოტრელის დრეკადი ურთიერთქმედებისგან განსხვავებით, სუბუკის ქიმიური ურთიერთქმედება წდკ გისოსში ერთნაირად ძლიერია როგორც კიდური, ისე ხრახნული დისლოკაციებისათვის.

სუბუკის ატმოსფეროები დისლოკაციის სრიალს ამუხრუჭებენ. მინარევი ატომების კონცენტრაციის სიმცირის მიუხედავად, დისლოკაციების დამუხრუჭება ვლინდება როგორც შენადნობებში, ისე არალეგირებული ტექნიკური სისუფთავის ლითონებში.

ზოგადად, სუბუკის ატმოსფეროებით დისლოკაციის დამუხრუჭება განაპირობებულია გახსნილი ელემენტის „ქიმიური“ კავშირით გაჭიმულ დისლოკაციასთან. კოტრელის ატმოსფეროები წარმოიქმნებიან დისლოკაციის ხაზის გასწვრივ და გაჯერდებიან მინარევების ძალიან მცირე შედგენილობისას (პროცენტის მეასედი ან მეათასედი ნაწილის შემთხვევაშიც). წყობის დეფექტის დიდი სიფართის გამო, სუბუკის ატმოსფეროები გაჯერდებიან, კოტრელის ატმოსფეროებისაგან განსხვა-

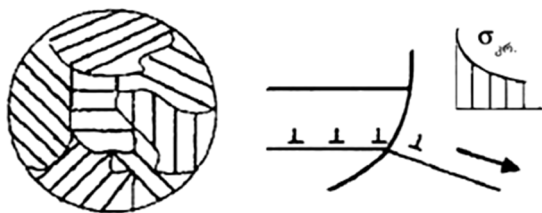
ვებით, მინარევი ატომების ან მალეგირებული ელემენტების შედარებით მაღალი კონცენტრაციისას ($> 1\%$). შესაბამისად, კოტრელის ატმოსფეროების ძლიერი დამამუხრუხუჭებელი მოქმედება ვლინდება მინარევების ძალიან მცირე, ხოლო სუბუკის ატმოსფეროების ბევრად უფრო მაღალი კონცენტრაციისას.

წყობის დეფექტის დიდი სიფართის გამო, თერმული ფლუქტუაციები, პრაქტიკულად, ვერ განბლოკავენ სუბუკის ატმოსფეროებიან გაჭიმულ დისლოკაციას. შესაბამისად, სუბუკის ატმოსფეროები დისლოკაციების დაბლოკვის უნარს შენადნობებში მაღალ ($> 1000^{\circ}\text{C}$) ტემპერატურამდე ინარჩუნებენ და ხელს უწყობენ შენადნობების განმტკიცებას. მათი განბლოკვა შესაძლებელია შენადნობის დეფორმირებით უფრო მაღალ ტემპერატურაზე.

3.6.5 დისლოკაციების დამუხრუჭება მარცვლებისა და სუბმარცვლების საზღვრებით

პოლიკრისტალურ სხეულებში კრისტალური გისოსები მარცვლის საზღვრებზე მკვეთრად იცვლიან ორიენტაციას (სურ. 23).

მარცვლების განორიენტირების ხარისხის შესაბამისად, მარცვლის საზღვრები დისლოკაციებისთვის შეიძლება იყოს გასავლელი ან გაუვლელი. როცა მეზობელი მარცვლების სრიალის სიბრტყეების განორიენტირება უდრის $4-5^{\circ}$ -ს, მაშინ დისლოკაციისათვის იგი ადვილად გასავლელია, თუმცა ამისათვის მაინც საჭიროა დამატებითი ძალები. რაც უფრო დიდია კუთხე სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციებს შორის, მით უფრო ძნელად გასავლელია საზღვარი. მაშასადამე წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურა არის უფრო მტკიცე და პლასტიკური.



სურ. 23. პოლიკრისტალური სხეულის მარცვლებისა და მოსრიალე დისლოკაციის მეზობელ მარცვალში გადასვლის სქემა

მარცვლის საზღვრების ბარიერული მოქმედება, შემთხვევითად ორიენტირებული მარცვლების საზღვრებზე დისლოკაციების გადასვლისას, განპირობებულია სრიალის სიბრტყისა და ბიურგერის ვექტორის მიმართულებების მკვეთრი ცვლილებებით.

დავუშვათ, რომ დისლოკაცია თავისი ბიურგერის ვექტორით გადავიდა მეზობელ მარცვალში, მაშინ ეს ვექტორი ნებისმიერად ორიენტირდება ახალი მარცვლის გისოსის მიმართ და ასეთი დისლოკაციის მოძრაობა გამოიწვევს ატომების წყობის ძლიერ დარღვევას. დისლოკაციის მოძრაობისთვის კი საჭირო გახდება იდეალურ გისოსში ძერის წინაღობის თეორიულთან მიახლოებული სიდიდის ძაბვა. რადგან მოსრიალე დისლოკაციას ასეთი ძაბვა არ მოეძება, იგი იძულებულია გახდეს გაჩერდეს მარცვლის საზღვართან. ე.ი. გენერირებული და დისლოკაციის წყაროდან ამოძრავებული მეთაური დისლოკაცია მარცვალთშორის საზღვართან გაჩერდება - არ „გაიწნეხება“ საზღვრის გავლით მეზობელ მარცვალში. მომდევნო, იმავე მიმართულებით, იმავე სიბრტყეში მოძრავი ერთსახელიანი დისლოკაცია განიზიდება დაბლოკილი პირველი დისლოკაციის დრეკადი ძაბვის ველით და დამუხრუჭდება

მასთან გარკვეული მიახლოების შემდეგ, ანუ მარცვლის საზღვართან „გაჩხერილი“ (მოდრაობის შესაძლებლობას მოკლებული) მეთაური დისლოკაცია იქცევა დაბრკოლებად მასთან მიახლოებული სხვა დისლოკაციისათვის.

ყოველი მომდევნო ერთსახელიანი დისლოკაცია, მოძრავი იმავე მიმართულებით, იმავე სიბრტყეში განიზიდება ადრე გაჩერებული დისლოკაციების დრეკადი ძაბვების ველით და დამუხრუჭდება მათთან გარკვეული მიახლოების შემდეგ. საბოლოოდ მარცვლების საზღვრებზე, როგორც ბარიერებთან, დაგროვდება (დაიხორება) დისლოკაციები. რაც უფრო მეტი დისლოკაციაა გროვაში, მით მეტად ძლიერია განზიდვა და მით უფრო ძნელად დეფორმირდება ლითონი. დისლოკაციების სიმკვრივის გარკვეული მნიშვნელობის მიღწევასა ამ ადგილებში ჩაისახება ბზარი.

ორეულის მარცვალი, ისე როგორც მარცვალთშორისი საზღვარი, დისლოკაციებისათვის წარმოადგენს ბარიერს, მისგან ორივე მხარეზე სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციების სხვაობის გამო.

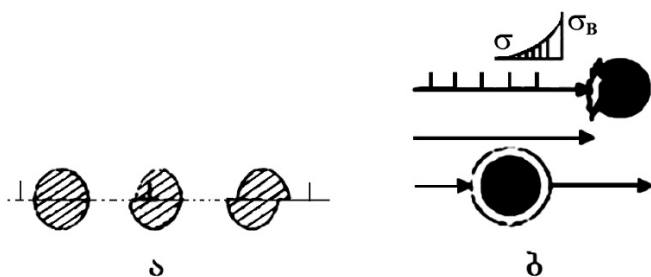
ერთსახელიანი ნიშნის დისლოკაციების განლაგების გეომეტრიულად ყველაზე ხელსაყრელ ხერხს წარმოადგენს მათი ერთმანეთზე განლაგება ვერტიკალური კედლის სახით. ეს კედელი მცირეკუთხიანი საზღვარია, იგი ყოფს კრისტალს ფრაგმენტებად. სუბმარცვლების საზღვრების ბარიერული მოქმედება მარცვალთშორისთან შედარებით ნაკლებეფექტურია. სუბმარცვლების განორიენტირება ძალიან მცირეა და შესაძლოა ცალკეული დისლოკაციის „გამოვარდნა“ დისლოკაციის კედლიდან (სუბმარცვლის საზღვრიდან), მოსრიალე დისლოკაციის სახით. რაც უფრო დიდია მეზობელი მარცვლების განორიენტირების

კუთხე, მით უფრო ახლოს არიან სუბმარცვლები ერთმანეთთან, მით უფრო ძლიერადაა დისლოკაციები დამაგრებული კედელში და, შესაბამისად, სუბმარცვლის ბარიერული მოქმედებაც უფრო ეფექტურია.

3.6.6 დისლოკაციების დამუხრუჭება მინარევი არალითონური ჩანარებით

მინარევი არალითონური ჩანარების (ოქსიდების, სილიკატების, სულფიდების, ნიტრიდების) მაკრო- და მიკრონაწილაკები ლითონებსა და შენადნობებში წარმოიქმნიებიან განჟანგვის ან ლითონის ჟანგვის შედეგად. მოძრავი დისლოკაცია შეიძლება მიეზღინოს მინარევი არალითონური ჩანართს და მასში გამოიწვიოს ძვრა (სურ 24, ა) ან დაგროვდეს არალითონური ჩანარებთან და შექმნას წინააღმდეგობის პიკური ძაბვები (სურ. 24, ბ). როცა ლითონში მრავალი არალითონური მინარევი ჩანარები არის, დისლოკაციებს შემდეგი მოძრაობა არ შეუძლიათ - ლითონი განმტკიცებულია. ამ დროს წარმოქმნილი ძაბვები დეფორმირებადი ლითონის R_m სიდიდეს აღემატებიან და ლითონი მყიფდება (წარმოიქმნება ბზარი).

აღსანიშნავია, რომ ლითონისგან განსხვავებით (ლითონში დისლოკაციის მოძრაობის სიჩქარე მასში ბგერის გავრცელების სიჩქარის ტოლია), არალითონურ მინარევეებში ატომებს მოძრაობა მხოლოდ დიფუზიით შეუძლიათ. შესაბამისად, უმნიშვნელოა დისლოკაციების მოძრაობის სიჩქარე და ამასთან, ძალიან ძლიერაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე.



სურ. 24. მინარევი არალითონური ჩანართებით დისლოკაციების დამუხრუჭების სქემა

3.6.7 დისლოკაციების დამუხრუჭება სხვა დისლოკაციებით

მოსრიალე დისლოკაცია ძლიერ მუხრუჭდება დისლოკაციის „ტყის“ გავლისას. დამუხრუჭების მიზეზები:

1. დისლოკაციის „ტყის“ გადაკვეთისას წარმოქმნილი დიდი რაოდენობის ხრახნული დისლოკაციების ზღურბლები. დისლოკაციების მიყოლებით ზღურბლების გაყვანა (გათრევა) წერტილოვანი დეფექტების გენერირებისათვის საჭიროებს აუცილებელ ენერგიას, რაც, თავის მხრივ, ამაღლებულ ძაბვებს მოითხოვს.

წდკ გისოსში ზღურბლით ერთი ვაკანსიის წარმოსაქმნელად საჭიროა $\approx 0,7$ ელექტრონვოლტი, ხოლო კვანძთშორისი ატომის – 4,8 ევ. ენერგია.

2. კიდური ორიენტაციის კიდური დისლოკაციების ზღურბლები. მათ შეუძლიათ ისრიალონ დისლოკაციებთან ერთად. მაგრამ თუ ისინი დისოცირებულია, ე.ი. წარმოქმნიან ორი მხრიდან ნაწილობრივი დისლოკაციებით შემოსაზღვრულ

წყობის დეფექტებს, მაშინ მათ შესაკრებად და შემდგომი სრიალისათვის აუცილებელია დამატებითი ძაბვები.

გაჭიმული ზღურბლები დისლოკაციებს ეფექტურად ამუხრუჭებენ.

3. წდკ გისოსში (ურთიერთ) შემხვედრად მოძრავი გაჭიმული დისლოკაციების სრიალის გადამკვეთ სიბრტყეებში, მათ (სიბრტყეების) გადამკვეთ ხაზთან მტკიცედ მიბმული ლომერ-კოტრელის დისლოკაციების წარმოქმნა. ლომერ-კოტრელის ბარიერები არა მხოლოდ აჩერებენ მოსრიალე დისლოკაციებს, არამედ, შეუძლიათ ჩაახშონ ახალი დისლოკაციების გენერირება წყაროებით, რაც არის დეფორმაციული განმტკიცების ერთ-ერთი ძირითადი მიზეზი.

3.6.8 დისლოკაციების ქმედება ვაკანსიებსა და კვანძთაშორის ატომებზე

კვანძთაშორისი ატომი მიიზიდება კიდური დისლოკაციის მახლობლად ჰიდროსტატიკური გაჭიმვის არესთან, ხოლო ვაკანსია - ჰიდროსტატიკური კუმშვის არესთან. დისლოკაციასთან მიზიდული ვაკანსიები და კვანძთაშორისი ატომები ანიჰილირდებიან ზღურბლებზე. როდესაც ვაკანსია მიდის საფეხურთან და დაედება მას, მაშინ საფეხური დაიძრება ექსტრასიბრტყის კიდის გასწვრივ ერთი ატომთაშორისი მანძილით. ამასთან, გაქრება ვაკანსია. თუ საფეხურთან მიდის კვანძთაშორისი ატომი და მიუერთდება მას, მაშინ იგი (საფეხური) გადაადგილდება საპირისპირო მიმართულებით, ერთ ატომთაშორის მანძილზე, ხოლო ატომი მიუერთდება ექსტრასიბრტყეს. ამდენად, კიდური დისლოკაცია შეიძლება

გახდეს ვაკანსიებისა და კვანძთშორისი ატომების „ჩასადინარი“, და მით უკეთესი (ჩასადინარი), რაც მეტი იქნება დისლოკაციებზე საფეხურების კონცენტრაცია.

შერეული დისლოკაციები, მათი კიდური კომპონენტის შესაბამისად, კვანძთშორის ატომებთან დრეკადად ზემოქმედებენ (შერეული დისლოკაციები და კვანძთშორისი ატომები დრეკადად ურთიერთქმედებენ).

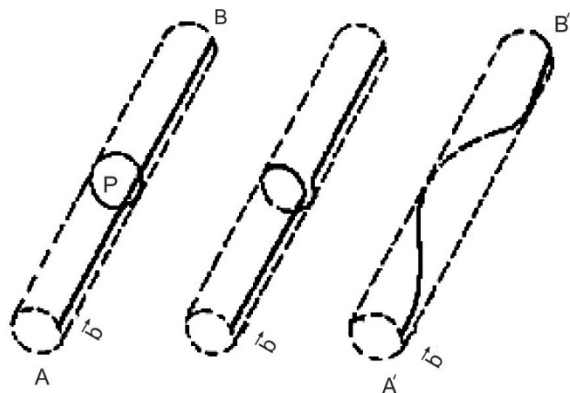
ვაკანსიები ნებისმიერი ტიპის დისლოკაციას მიეზიდება, მათ შორის სუფთა ხრახნულსაც. რადგან ვაკანსია ცარიელი ადგილია, ამის გამო დისლოკაციის დრეკადი ენერგია ლოკალურად მცირდება.

ჰელიკოიდური დისლოკაციების წარმოქმნას ხსნიან ვაკანსიების ხრახნულ დისლოკაციაზე მიზიდვით. მათი დისლოკაციის ხაზი წესიერ სპირალადაა დაგრეხილი (ჰელიკოიდური დისლოკაციის წარმოქმნის ბუნება საბოლოოდ გამორკვეული არაა). სწორხაზოვანი კიდური AB დისლოკაციის, ვაკანსიების P ჯგუფთან მიერთებით, ჰელიკოიდურ A_1B_1 დისლოკაციად გარდაქმნის გეომეტრიის ეტაპები ნაჩვენებია სურ. 25-ზე.

ვაკანსიების მიერთებით სწორხაზოვანი ხრახნული დისლოკაციის ჰელიკოიდურად გადაწყობა არის ხრახნული დისლოკაციის თავისებური გაცოცება. ამასთან, როგორც სურ. 25-დან ჩანს, დისლოკაცია იძენს კიდურ კომპონენტს და ხდება შერეული.

ხრახნული და ჰელიკოიდური დისლოკაციები ერთმანეთისგან მკვეთრად განსხვავებულია (მათი არევა დაუშვებელია). ხრახნული დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი დისლოკაციის ხაზის პარალელურია და დისლოკაციის ბირთვის არეში ატო-

მეზი მისი ღერძის ირგვლივ ხრახნულადაა დახვეული. ჰელიკოიდურ დისლოკაციას სპირალის სახით თვით დისლოკაციის ხაზი აქვს დახვეული, ხოლო ბიუგერის ვექტორი ამ სპირალის პარალელურია და დისლოკაციის ხაზთან, მის სხვადასხვა უბანზე, სხვადასხვა კუთხეს ქმნის.



სურ. 25. ვაკანსიის (P) ხრახნულ დისლოკაციასთან (AB) გაერთიანებისა და ჰელიკოიდურ A_1B_1 -ად გარდაქმნის ეტაპების სქემა

ჰელიკოიდური დისლოკაციები დამახასიათებელია მაღალი ტემპერატურებიდან ნაწრთობი ალუმინის შენადნობებისათვის. წრთობის შემდეგ შენადნობების გისოსები გადაჯერებულია ვაკანსიებით, რაც ჰელიკოიდური დისლოკაციების წარმოქმნაში ვაკანსიების წამყვან როლზე მიგვანიშნებს.

აღსანიშნავია, რომ კიდური დისლოკაციის ურთიერთქმედება მინარევ ატომებთან პრინციპულად განსხვავებულია ვაკანსიებთან და კვანძთშორისი ძირითადი ლითონის ატომებთან მისი ურთიერთქმედებისგან. მათგან განსხვავებით, მინარევი ატომები არ ანიჰილირდებიან, წარმოქმნიან ატმოსფეროებს და ინარჩუნებენ საკუთარ ინდივიდუალობას.

3.7 დისლოკაციების დამუხრუჭებისა და შენადნობების განმტკიცების ურთიერთკავშირი

ზოგადად, პლასტიკური დეფორმაცია არის დისლოკაციების შეუქცევი მოძრაობა. შესაბამისად, ლითონური მასალების სიმტკიცის ასამაღლებლად აუცილებელია დისლოკაციების მოძრაობის შეზღუდვა—დამუხრუჭება. დისლოკაციების მოძრაობას აფერხებენ მარცვლის საზღვრები, ფაზათაშორის ზედაპირები, დისლოკაციები (მოძრავ დისლოკაციებზე შემაკავებლად ზემოქმედებენ ლითონში არსებული სხვა დისლოკაციები), სრიალის სიბრტყის გადამკვეთი სიბრტყეები.

დისლოკაციები, გარედან მოდებული მაღალი ძაბვებისას, ზოგ წინაღობას გაივლის. ასეთია, მაგალითად, სრიალის სიბრტყის გადამკვეთი დისლოკაცია. მარცვლის საზღვრები გადაულახავი წინაღობებია. მათ წინ გროვდებიან დისლოკაციები და წარმოქმნილი დამბულობის ველი მოახლოებულ დისლოკაციას განიზიდავს. რაც უფრო მეტი რაოდენობის დისლოკაციაა გროვაში, მით უფრო ძლიერია განზიდვა და, შესაბამისად, ლითონიც ძნელად დეფორმირდება.

დისლოკაციების სრიალის ერთი სიბრტყიდან მეორეში გადასვლა დაკავშირებულია მნიშვნელოვან ენერგეტიკულ სირთულეებთან. სრიალის სიბრტყის გადამკვეთ სისტემებში მოძრავი ნაწილობრივი დისლოკაციები წარმოქმნიან ნაკლებ-მოძრავ („მჯდომარე“) დისლოკაციებს, რომელთა ბიურგერსის ვექტორი სრიალის არცერთ სიბრტყეში არ მდებარეობს. მჯდომარე დისლოკაციები წარმოადგენენ ლომერ-კოტრელის ბარიერებს, რომლებიც ამცირებენ სხვა დისლოკაციების ძვრადობას და, ამით, ხელს უწყობენ დეფორმაციის წინა-

დობის ამაღლებას. „მჯდომარე“ დისლოკაციების გაერთიანებები ქმნიან კვანძებს, რომელთა ასამოძრავებლადც მნიშვნელოვანი სიდიდის დამატებითი გარე ძაბვებია საჭირო.

სრიალის სიბრტყეების გადამკვეთ სისტემებში მოძრავი ხრახნული დისლოკაციების ურთიერთქმედებისას წარმოიქმნება საფეხური, რომელიც გადაადგილდება ვაკანსიების ან კვანძთშორისი ატომების „ჯაჭვის“ წარმოქმნით. ამგვარად, ხრახნული დისლოკაციების ურთიერთქმედებისას დეფორმაციის წინაღობა დიდდება.

დისლოკაციური განმტკიცების საფუძველი არის ცივი პლასტიკური დეფორმაციისას დისლოკაციის სიმკვრივის ამაღლება, მათ შორის საშუალო მანძილის შემცირება და, შესაბამისად, მათი ურთიერთქმედების გაძლიერება. ამ საფუძვლებს დიდი მნიშვნელობა აქვს ლითონში, მისი დეფორმაციისა და დეფორმირების შემდეგ, გახურების პროცესებში, მიმდინარე სტრუქტურული ცვლილებების გასაგებად.

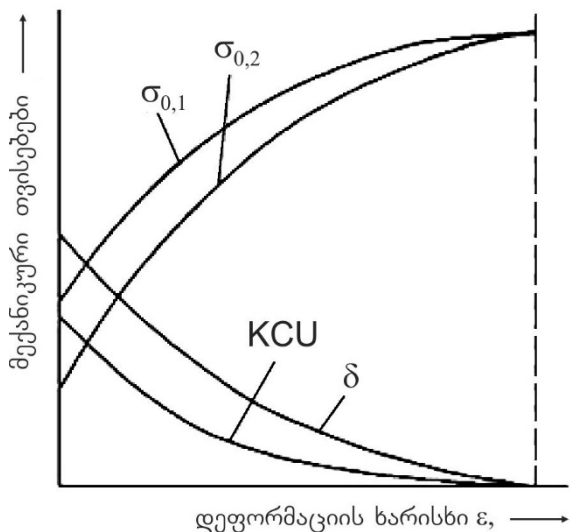
განმტკიცების ხარისხი მკვეთრად მატულობს, როცა დისლოკაციური ხლართები გადაკვეთების ურთიერთქმედებისა და გადანაწილების შედეგად იწყებენ უწყვეტი დისლოკაციური ბადისა და, უფრო გვიან ეტაპებზე, უჯრედოვანი სტრუქტურის წარმოქმნას (სურ.17).

ცივად დეფორმირებული ლითონის განმეორებით დეფორმირებისათვის აუცილებელი ძაბვის სიდიდე აღემატება პირველსაწყისი დეფორმაციის გამომწვევი ძაბვის სიდიდეს. ამ მოვლენას „ცივჭედვა“, ანუ „დეფორმაციული განმტკიცება“, ეწოდება. განმეორებით დეფორმირებისას, გადაადგილების უნარის მქონე (ხელახლა წარმოქმნილმა) დისლოკაციებმა უნდა

„გადალახონ“ წინა დამუშავებიდან დარჩენილი დისლოკაციების მაღალი სიმკვრის არეები. ამ დროს მატულობს შინაგანი ძაბვები და დისლოკაციების საერთო სიმკვრივე. დისლოკაციები მოძრაობენ უფრო ნელა, ძნელდება მათი წარმოქმნის წყაროების მუშაობა და ლითონის შემდგომი დეფორმირებისათვის აუცილებელია მოდებული გარე დატვირთვის გაზრდა.

ცივად დეფორმირებულ ლითონში დეფორმაციაზე დახარჯული ენერგიის $5 \div 10$ %-მდე რჩება. ნარჩენი ენერგია იხარჯება სხეულში დეფექტების ($10^9 - 10^{12}$ სმ⁻² მდე) წარმოქმნასა და გისოსის დრეკად დეფორმაციაზე (დამახინჯებაზე). შედეგად, ცივად დეფორმირებული შენადნობის მექანიკური და ფიზიკური თვისებები იცვლება: მაღლდება სიმტკიცის (სისალე, დენადობის ზღვარი, სიმტკიცის ზღვარი) და დაბლდება პლასტიკურობისა და სიბლანტის (δ , ψ , KCU) მაჩვენებლები.

სურ. 26-ის შესაბამისად, დეფორმაციის ხარისხის ამაღლება დეფორმირების საწყის ეტაპზე იწვევს სიმტკიცის მახასიათებლების ინტენსიურ ზრდას, ხოლო შემდეგ მცირდება სიმტკიცის მახასიათებლების ზრდის ინტენსიურობა. ამასთან, დენადობის ზღვარი მაღლდება დროებითი წინაღობის ზღვარზე უფრო სწრაფად. დეფორმაციის ხარისხის რაღაც მნიშვნელობისას ცივნაჭედი ლითონის ორივე მახასიათებელი ერთმანეთს უტოლდება, ხოლო პლასტიკურობა და სიბლანტე – ნულს (ზღვრული მდგომარეობა დეფექტების 10^{12} სმ⁻² სიმკვრივისას მიიღწევა). დეფორმირების შემდგომი გაგრძელებისას ლითონი ირღვევა.



სურ. 26. დეფორმაციის ხარისხის გავლენა მექანიკურ თვისებებზე

პრაქტიკა აჩვენებს, რომ ცივი პლასტიკური დეფორმაციით შესაძლებელია დროებითი წინაღობის 1,5...3-ჯერ ამაღლება, ხოლო დენადობის ზღვრისა – 3÷7-ჯერ. ამასთან, წახნაგდაცენტრებული კუბური კრისტალური გისოსის მქონე ლითონები უფრო მეტად განმტკიცდებიან, ვიდრე მოცულობადაცენტრებული კუბური- და ჰექსაგონალური კრისტალური გისოსის მქონე ლითონები.

დეფორმაციის ხარისხის გაზრდის დროს იცვლება ფიზიკური თვისებებიც: იზრდება კუთრი ელ-წინაღობა და კოერციტიული ძალა, მცირდება მაგნიტური განვლადობა, ნარჩენი ინდუქცია და ლითონის სიმკვრივე. მოცულობაში ლითონის დეფორმაციის არაერთგვაროვნებით წარმოქმნილი სიმკვრივის სხვადასხვაობა წარმოქმნის ნარჩენ ძაბვებს (გამჭიმავს, მკუმშავს). ცივად დეფორმირებული ლითონი უფრო კოროზირებადია და მეტად მიდრეკილია კოროზიული დასკდომისკენ.

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ პლასტიკური დეფორმაციისას ლითონების განმტკიცება, ანუ დისლოკაციური განმტკიცება $\Delta\sigma_{\phi}$, განპირობებულია ახალი დისლოკაციების წარმოქმნითა და მათი სიმკვრივის ზრდით. რაოდენობრივად ეს დამოკიდებულება (პლასტიკური დეფორმაციისას ლითონების განმტკიცება დისლოკაციების სიმკვრივესთან) ასე გამოისახება:

$$\Delta\sigma_{\phi} = K \sqrt{\rho}, \quad (4)$$

სადაც: ρ არის დისლოკაციების სიმკვრივე,

K - მუდმივა, რომელიც მოიცავს ძვრის მოდულს, ბიურგერის ვექტორს და დამოკიდებულია ყოველ კონკრეტულ შენადნობში დისლოკაციების განაწილების ხასიათსა და ურთიერთქმედებაზე.

ფერიტული ფუძის შენადნობებისათვის K კოეფიციენტის სიდიდე, აუსტენიტურ ფოლადებთან შედარებით, 1,5–2,5-ჯერ ნაკლებია. შესაბამისად, დისლოკაციების ერთნაირი სიმკვრივის პირობებში, პლასტიკური დეფორმაციის შედეგად, ფერიტულ ფოლადებზე უფრო მეტად განმტკიცდებიან აუსტენიტური ფოლადები.

ფერიტ-პერლიტურ ფოლადებში, დისლოკაციების ჩვეულებრივი სიმკვრივისას $\rho = 10^9 \text{ სმ}^{-2}$, დისლოკაციური განმტკიცება მცირეა და ზოგი მონაცემებით σ_{ϕ} 30 მპა-ს არ აღემატება. მდკ გისოსში დისლოკაციების სიმკვრივის მნიშვნელოვანი ზრდა $\rho = 10^{12} \text{ სმ}^{-2}$ -მდე იწვევს ძაბვების კრიტიკულ კონცენტრაციას, ბზარების წარმოქმნას და, დიდი ალბათობით, რღვევას.

ფერიტ-პერლიტური ფოლადების საერთო განმტკიცებაში დისლოკაციური განმტკიცების კომპონენტის შენატანი მცირეა და

ამიტომ მისი უგულებელყოფა შესაძლებელია. აუსტენიტური ფოლადების შემთხვევაში, დისლოკაციური განმტკიცების კომპონენტის შენატანი, დისლოკაციების იმავე სიმკვრივის დროსაც კი, გაცილებით მეტია, ხოლო ρ -ს დიდი მნიშვნელობისას, ეს წილი უკვე მნიშვნელოვნად იზრდება.

დისლოკაციური განმტკიცება, როგორც წესი, უარყოფითად მოქმედებს ფოლადის პლასტიკურობისა და სიბლანტის მახასიათებლებზე. დისლოკაციების სიმკვრივის ზრდა გაჭიმვისას ადაბლებს პლასტიკურობას, ამცირებს დარტყმით სიბლანტეს და ამაღლებს ბლანტ-მყიფე გადასვლის კრიტიკულ ტემპერატურას, რაც ხშირად არასასურველია. დარტყმით სიბლანტეზე თანაბრად განაწილებული დისლოკაციები უფრო ნაკლებმავნე გავლენას ახდენს, ვიდრე მათი გროვები.

დისლოკაციური პლასტიკურობის განვითარება განისაზღვრება დისლოკაციების ძვრადობითა და მათი ჩასახვის ინტენსიურობით. მინარევებისაგან სუფთა მონოკრისტალში იზოლირებული დისლოკაციის ძვრადობა დამოკიდებულია ატომთშორისი კავშირების ხასიათსა და კრისტალში დისლოკაციებისა და ნაწილაკების ურთიერთქმედებაზე. არაიდეალურ კრისტალებში დისლოკაციების ძვრადობა მცირდება მათი ერთმანეთთან და სხვა დეფექტებთან ურთიერთქმედებით. ასეთი ურთიერთქმედებები იწვევს დისლოკაციების დამუხრუჭებას ან მოძრავი დისლოკაციის გაჩერებას. დისლოკაციებზე დალექილი მინარევები, დისლოკაციური ხაზის ზოგ წერტილში, ბლოკავენ მის მოძრაობას. დისლოკაციების მოწყვეტა მინარევებიდან, ე.ი. მისი მოძრაობის ხელშემშლელი წინააღობის დაძლევა ხდება მაღალ ტემპერატურებზე თერმოაქტიურობით.

ლითონების წინასწარი დეფორმაციის დროს შეიმჩნევა სიმ-
ტკიცის როგორც ამალღება, ისე შემცირება. ნაკეთობის წინას-
წარი დეფორმაციის შემდეგ, საწინააღმდეგო მიმართულებით
დატვირთვისას, პლასტიკური დენადობა უფრო დაბალი ძაბ-
ვებისას იწყება (ბაუშინგერის ეფექტი). ამ დროს მოდებულ ძა-
ბვაზე წინასწარი დეფორმაციისას, მასალაში წარმოქმნილი ში-
ნაგანი დამაბულობის ველების ზედდება ხდება, რაც, საწინა-
აღმდეგო მიმართულებით დატვირთვისას, ლითონის დენა-
დობას აიოლებს.

3.8 დისლოკაციების გავლენა მყარი სხეულების თვისებებსა და დისლოკაციებზე დაკვირვების მეთოდები

დისლოკაციების არსებობა მნიშვნელოვნად მოქმედებს მყარი
კრისტალური სხეულების მექანიკურ თვისებებზე (დრეკა-
დობა, პლასტიკურობა, შინაგანი ხახუნი). დისლოკაციების
დრეკადი ველები, თავიანთი ღერძის სიახლოვეს, მინარევი
ატომების კონცენტრაციას ამალღებენ. წარმოიქმნება ე.წ. კოტ-
რელის ატმოსფერო, რომელიც დისლოკაციური ხაზის ირგე-
ლივ წერტილოვანი დეფექტების არაერთგვაროვანი განაწი-
ლებაა. იგი ამაგრებას დისლოკაციებს. დამაგრებული დის-
ლოკაციის მინარევების ატმოსფეროდან მოწყვეტას კი ესაჭი-
როება გარედან მოდებული მნიშვნელოვანი სიდიდის მექანი-
კური ძაბვა. მოვლენების ასეთ განვითარებას დისლოკაციაზე
მინარევების კოაგულაცია შეუძლია. ასეთი კოაგულაცია გამ-
ჭვირვალე კრისტალებში სხეულის ოპტიკური თვისებების
ცვლილებას იწვევს, რაც კრისტალის „დეკორირებით“ (მისი
გამჭვირვალობის ცვლილებით) გამოიხატება.

კიდური დისლოკაციის სიახლოვეს წარმოქმნილი მინარევი ატომების ატმოსფერო წარმოადგენს „ბარიერს“, რომელიც აკავებს დისლოკაციას განსაზღვრულ მდგომარეობაში. ძვრის მცირე ძაბვები, დისლოკაციებთან ერთად, მათი გარშემომკვრელი მინარევების ატმოსფეროების ნელ მოძრაობას იწვევენ. დიდი ძაბვებისას კი შესაძლებელია საკუთარი ატმოსფეროდან დისლოკაციის მოწყვეტა და მისი სწრაფი გადაადგილება. ამ მოვლენით აიხსნება ჩანერგვის ატომების მცირე, $10^{-3} - 10^{-1}$ მას. % კონცენტრაციის შემცველი ზოგი ფოლადის დეფორმაციის მრუდზე დენადობის „კბილის“ არსებობა.

პრაქტიკულად, დატვირთვის მოდებისას, დასაწყისში, ნიმუში დეფორმირდება დრეკადად. დენადობის „კბილის“ გაჩენის შემდეგ დატვირთვა რამდენადმე მცირდება (მინარევების ატმოსფეროებიდან დისლოკაციების მოწყვეტის შემდეგ პლასტიკური დეფორმაციისათვის აუცილებელი ძაბვები მკვეთრად მცირდება და გაჭიმვის მრუდის დენადობის ზღვარზე წარმოიქმნება დენადობის ბაქანი) და მუდმივი შემცირებული დატვირთვისას, ნიმუში განსაზღვრულად დეფორმირდება. შემდეგ კი, დეფორმაციის გაგრძელებისას, მასალა თანდათან განმტკიცდება.

დეფორმირებული ნიმუშის განტვირთვისა და მისი დაუყოვნებლივი განმეორებითი დატვირთვისას დენადობის კბილი არ წარმოიქმნება. ეს იმიტომ, რომ მოკლე დროში დისლოკაციები ვერ ასწრებენ მინარევი ატომების ატმოსფეროს „შემოზრდას“ და, შესაბამისად, ადვილად სრიალებენ. განტვირთვისა და მოლბობის შემდეგ, ნიმუშის ხელახალი მექანიკური დატვირთვისას, დენადობის კბილი ისევ წარმოიქმნება.

მყარ ტანში დისლოკაციის მოძრაობას უკავშირდება ისეთი ტექნიკურად მნიშვნელოვანი პროცესები, როგორიცაა მასალის განმტკიცება (პლასტიკური დეფორმაციის დროს) და განუმტკიცებლობა (მოლბობისას). დისლოკაციის მოძრაობისას მოდებული ძაბვა ასრულებს მუშაობას, რომლის ერთი ნაწილი ხმარდება დისლოკაციის ენერგიის გადიდებას, მეორე – სითბოს სახით განიბნევა, ხოლო მესამე ნაწილი იხარჯება პლასტიკურად დეფორმირებულ ტანში სტრუქტურული დეფექტების წარმოქმნისა და მისი შინაგანი ენერგიის გაზრდაზე. შინაგანი ენერგიის გაზრდა უკავშირდება: კრისტალური გისოსის დამახინჯებას, პლასტიკურად დეფორმირებული კრისტალების დისლოკაციების სიმკვრივის მნიშვნელოვან გადიდებას, მათი დაგროვებით გამოწვეული წინაღობების ამაღლებას, მოძრავი დისლოკაციების „შლეიფებში“ წარმოქმნილი წერტილოვანი დეფექტების რაოდენობის მატებას და ა.შ. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, პლასტიკური დეფორმაციის დროს გისოსის დამახინჯებას ტექნიკაში ცივჭედვას უწოდებენ. იგი პლასტიკურად დეფორმირებულ სხეულს განამტკიცებს (ზრდის პლასტიკური ძვრისადმი მის წინაღობას) და ამყიფებს. ცივჭედვა ხდება ცივი პლასტიკური დეფორმაციის პირობებში. ამ დროს, როგორც წესი, თვითდიფუზიისა და დიფუზიის სიჩქარეები მცირეა, შინაგანი ძაბვების მოხსნის (დასვენების) პროცესი კი შენელებულია.

დისლოკაციები ცვლიან კრისტალების ოპტიკურ თვისებებს, რასაც ეფუძნება გამჭვირვალე მასალებში იზოლირებული დისლოკაციების დაკვირვება-შესწავლა. კრისტალის ქიმიური მდგრადობის შემცირებას იწვევს დისლოკაციის გამოსვლა მყარი სხეულის გარე ზედაპირზე (ამ ადგილებში წარმოიქმნება მიკროსკოპით, ზოგჯერ შეუიარაღებელი თვალითაც შესამჩ-

ნევი „ორმოები“) და კრისტალური გისოსის რეგულარულობის დარღვევა დისლოკაციის ბირთვში. ამ მოვლენებს ეფუძნება შერჩევითი ამოჭმის მეთოდი, რომელიც გაუმჭირვალე მასალების მასიურ ნიმუშებში ცალკეულ დისლოკაციაზე დაკვირვების საშუალებას იძლევა.

დისლოკაციის ბირთვში მოწყვეტილი კავშირების სისტემის გაჩენა განასხვავებს დისლოკაციის ხაზის ელექტრულ, მაგნიტურ და ოპტიკურ დამოკიდებულებებს: ა) დისლოკაციას შეუძლია ატაროს (იქონიოს) ან მიიტაცოს ელექტრული მუხტი და კრისტალის საშუალო დამაგნიტებულობისგან განსხვავებული დამაგნიტებულობა ჰქონდეს; ბ) დისლოკაციები ამაღლებენ გამტარების ელექტროწინაღობას; გ) ნახევარგამტარებში ცვლიან თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაციას; დ) მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ მაგნიტურ კრისტალებში; ე) დიდ გავლენას ახდენენ რელაქსაციურ მოვლენებზე.

დისლოკაციები (კრისტალში) ირიბად მოქმედებენ იმ თვისებებზე, რომლებიც დამოკიდებულია წერტილოვანი დეფექტების (მინარევების, ვაკანსიების და სხვა) განაწილებისა და გადაადგილების ხასიათზე. გარკვეული ხასიათის მოძრაობებისას დისლოკაცია „ასხივებს“ ან შთანთქავს ვაკანსიებს (დისლოკაციების გადაცოცება) და ცვლის კრისტალში მათ საერთო რაოდენობას. დისლოკაციის ღერძის გასწვრივ წერტილოვანი დეფექტების დიფუზიური გადაადგილების სიჩქარე, როგორც წესი, მეტია, ვიდრე მათი დიფუზიის სიჩქარე რეგულარული კრისტალის მოცულობაში. დისლოკაციის გასწვრივ ხაზობრივი დიფუზიის კოეფიციენტი რამდენიმე რიგით აღემატება მოცულობითი დიფუზიის კოეფიციენტს. ამდენად, წერტილოვანი დეფექტები დისლოკაციის ბირთვში

ადვილად გადაადგილდებიან დიდ მანძილებზე. ამ მოვლენაზეა დაფუძნებული დისლოკაციების დეკორირების მეთოდი, რომელიც საშუალებას იძლევა დისლოკაციის ირგვლივ ხელოვნურად შეიქმნას მინარევი ატომების ატმოსფერო და ისინი ხილული გახდნენ.

სრულყოფილ კრისტალში რენტგენის დიფრაქციული ხაზი მცირე სიგანისაა. რეალური კრისტალების დამახინჯება (ატომური სიბრტყეების გამრუდება, ბლოკური სტრუქტურის წარმოქმნა და ა.შ.) კი მას აგანიერებს. ეს იწვევს დიფრაქციულ კონტრასტს, რაც კრისტალში, დისლოკაციების მცირე სიმკვრივის დროს (დისლოკაციების დიდი სიმკვრივისას წარმოიქმნება ე.წ. დისლოკაციური „ტყე“. ასეთ შემთხვევაში შეუძლებელია ცალკეული დისლოკაციის გარჩევა), ცალკეული დისლოკაციის აღმოჩენის საშუალებას იძლევა. ამ ეფექტზეა დაფუძნებული რენტგენული ტოპოგრაფიის მეთოდი, რომლის საშუალებითაც ცალკეული დისლოკაციის კარგად გარჩევა არის შესაძლებელი.

ლითონების დეფორმაცია განპირობებულია დისლოკაციების მოძრაობით. დეფორმირებისას ლითონის განმტკიცების საფუძველი არის დისლოკაციების მაღალი სიმკვრივე. დადგენილია, რომ სრიალის სიბრტყეში ათობით დისლოკაცია არის განთავსებული და მათი ამ სიბრტყის გასწვრივ თანმიმდევრობით გადაადგილება ლითონის პლასტიკურ (გა)დინებას იწვევს.

პლასტიკური (გა)დინებისას დისლოკაციის ხაზი გამოდის კრისტალის ზედაპირზე. ამის შემდეგ იგი განშტოვდება სხვა დისლოკაციებზე ან წარმოქმნის კრისტალში ჩაკეტილ მარყუჟებს, ანუ ურთიერთდაკავშირებულ ბადეს. კრისტალებში ყველაზე ხშირად სწორედ უკანასკნელი რეალიზდება. დის-

ლოკაციების რაოდენობის პროპორციულად იზრდება კრისტალის ზედაპირზე გამოსული საფეხურის სიმაღლე. მიკროსკოპით დამზერილ საფეხურს სრიალის ხაზს უწოდებენ.

როგორც წესი, სრიალის ხაზები ერთმანეთისგან სხვადასხვა მანძილზეა განთავსებული და, შესაბამისად, კრისტალებში დეფორმაცია ვრცელდება არაერთგვაროვნად. სრიალის ხაზების ახლო განლაგებული ჯგუფი წარმოქმნის სრიალის ზოლებს. პლასტიკური დეფორმაცია პირველ რიგში ვითარდება იმ სისტემაში, რომელშიც მხები ძაბვები უფრო ადრე აღწევს კრიტიკულ სიდიდეს. დეფორმაციის საწყის სტადიას ადვილი სრიალის სტადიას უწოდებენ. დეფორმაციის ზრდასთან ერთად, სრიალი ვრცელდება სრიალის სხვა სისტემებზეც და, შესაბამისად, აღიძვრება მრავლობითი სრიალი. ამ სტადიაზე, დისლოკაციების გადამკვეთ სიბრტყეებში გადაადგილებასთან ერთად, მატულობს მათი მოძრაობის წინაღობა და წარმოიქმნება რთული დისლოკაციური სტრუქტურა.

დისლოკაციის არეში პოტენციალური ენერგიის მინიმალური მდგომარეობიდან ატომების დაძვრა იწვევს დამაბულობის ველის წარმოქმნას და, შესაბამისად, პოტენციალური ენერგიის ამაღლებას. მაშასადამე, დისლოკაციები გარშემორტყმულია ძალური ველებით. პლასტიკური დეფორმაციისას ისინი ერთმანეთზე ზემოქმედებენ. სრიალის ერთ სიბრტყეში მყოფი სხვადასხვასახელიანი დისლოკაციები მიიზიდებიან ერთმანეთისკენ და ერთმანეთს გააქრობენ (ანიჰილირდებიან), ხოლო ერთსახელიანი დისლოკაციები განიზიდებიან.

3.9 დისკლინაციები

კონდენსირებულ არეებში, დისლოკაციების გარდა, არსებობს ხაზობრივი დეფექტის კიდევ ერთი ტიპი - დისკლინაცია. თანამედროვე ფიზიკაში დისლოკაციების მნიშვნელობა კარგადაა ცნობილი და შესწავლილი, ხოლო წარმოდგენები დისკლინაციებზე შედარებით გვიან შეიქმნა. მეცნიერები დისკლინაციისადმი არასაკმარის ყურადღებას იჩენდნენ, რადგან ერთეული სრულყოფილი დისკლინაციის წარმოქმნა კრისტალური გისოსის ენერგეტიკულად არამომგებიან დიდ მობრუნებას ითხოვდა. დროთა განმავლობაში დისკლინაციისადმი დამოკიდებულება შეიცვალა, რადგან დისკლინაციური წარმოდგენების საფუძველზე სრულიად ბუნებრივად იხსნება, კლასიკური კრისტალოგრაფიის კანონებით „აკრძალული“, ბუნებაში არსებული ხუთჯერადი და შვიდჯერადი ფსევდოსიმეტრიები მცირე მარცვლებში (კრისტალიტებში). გარდა ამისა, ბოლო წლების კვლევებმა აჩვენა, რომ მთელი რიგი ტოპოლოგიურად მოუწესრიგებული არეებისა და ნანოკრისტალური მასალების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების აღწერა დისკლინაციური წარმოდგენებითაა შესაძლებელი.

დისლოკაცია არის კრისტალის ნაწილების ბიურგერსის ვექტორის - b სიდიდით ტრანსლაციური გადაადგილება (ძვრა). მაშასადამე, დისლოკაციები ტრანსლაციური ტიპის ხაზობრივი არასრულყოფილებებია. არსებობს, ასევე, ხაზობრივი დეფექტები, რომლებიც განპირობებულია კრისტალის ნაწილების მობრუნების ვექტორის α მობრუნებით. ისინი არიან როტაციული ტიპის ხაზობრივი დეფექტები - დისკლინაციები.

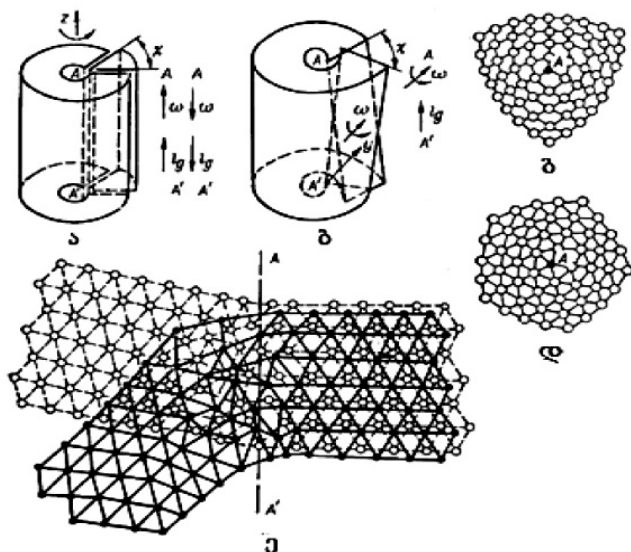
განვიხილოთ დისკლინაციების აგებულების ზოგი თავისებურება. სურ. 27-ის შესაბამისად, თუ ცილინდრულ კრისტალს ჩავჭრით და ჩანაჭრის ნაწიბურებს გავწევთ z ღერძის ირგვლივ, მაშინ წარმოიქმნება χ მობრუნების კუთხის სიდიდის სოლისებრი ღრეჩო (სურ. 27, ა), რომელიც შეიძლება ისეთნაირად შეივსოს მასალით, როგორადაც შეჰყავთ ზედმეტი ექსტრა სიბრტყე, კიდური დისლოკაციის წარმოქმნისას.

კრისტალიდან შესაძლებელია მისი სოლისებრი ნაწილის ამოღებაც, ასევე ჩანაჭრის ნაწიბურების ერთმანეთის მიმართ z ღერძის ირგვლივ მობრუნება. კრისტალში წარმოქმნილი საზღვარი არის სოლისებრი დისკლინაცია z ღერძის გასწვრივ, ორიენტირებული χ მობრუნების ვექტორით.

დისკლინაციას ეწოდება სრული, თუ მისი მობრუნების ვექტორი შეესაბამება მოცემული კრისტალის სიმეტრიის მობრუნებას. ასეთ შემთხვევაში მობრუნების (ტრანსლაციის) ჯგუფი (SO) ტოლია $\pm \pi/2$ ან $\pm \pi/3$ -ის. სიმეტრიის ტიპის მიხედვით, ე.ი. SO მნიშვნელობიდან გამომდინარე, ასხვავებენ 60° -იან (სურ. 27, გ) და 90° -იან (სურ. 27, დ) სოლისებრ დისკლინაციებს. დისკლინაციის ხაზი გადის მობრუნების ღერძთან შეთავსებულ A წერტილში. ცენტრალური ატომი A წერტილში დანარჩენ ატომებზე ნაკლები რაოდენობის მეზობლებითაა გარშემორტყმულია. გისოსი დისკლინაციის სიახლოვეს, მკუმშავი და გამჭიმავი ძაბვების მოქმედებით, დამახინჯებულია.

თუ ცილინდრულ კრისტალს ჩავჭრით და ჩანაჭრის ნაწიბურებს მოვაბრუნებთ ჩანაჭრის ზედაპირთან პერპენდიკულარულ, მობრუნების ვექტორზე, ე.ი. y ღერძის პარალელურად, მაშინ წარმოიქმნება გრეხის დისკლინაცია (სურ. 27, ბ).

გრეხის დისკლინაციის რაიონში ატომების განლაგების სქემა ნაჩვენებია სურ. 27-ზე.



სურ.27. დისკლინაციების წარმოქმნის სქემები და ატომების განლაგება სხვადასხვა ტიპის დისკლინაციების რაიონში; AA' არის დისკლინაციის ხაზი

დისკლინაციას ახასიათებს დისკლინაციის ხაზისა და მობრუნების ვექტორის სივრცობრივი განლაგება. სოლისებრ დისკლინაციებს განსხვავებული ნიშანი ექნებათ იმ შემთხვევაში, თუ მათი მობრუნების ვექტორები სიდიდით ტოლი და მიმართულებით ურთიერთსაწინააღმდეგო იქნება. სოლისებრი დისკლინაცია არის დადებითი, თუ ის წარმოქმნილია კრისტალიდან სოლის ამოღებით, ხოლო უარყოფითია - თუ წარმოქმნილია კრისტალში სოლის ჩანერგვით.

დისკლინაციის წარმოქმნა ამაღლებს კრისტალის შინაგან ენერგიას. დადგენილია, რომ დისკლინაციების ენერგია, გაან-

გარიშებებით, თითქმის ოთხი რიგით აღმატება დისლოკაციების ენერგიას. ამის გამო, დისკლინაციები დისლოკაციებზე უფრო ძნელად წარმოიქმნება.

დისკლინაციები ერთმანეთზე ზემოქმედებენ. ორი ერთნაირნიშნიანი დისკლინაციები, ისე როგორც დისლოკაციები, განიზიდებიან, სხვადასხვა ნიშნიანები კი მიიზიდებიან. სოლისებრი დისკლინაციების ურთიერთქმედების ძალა, დაახლოებით, ოთხჯერ მეტია, ვიდრე გრეხის დისკლინაციებისა.

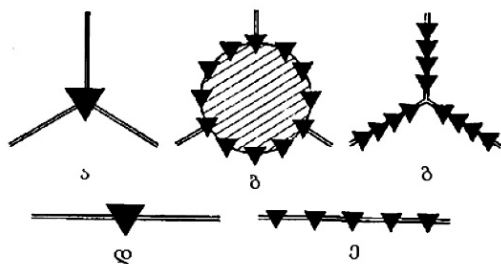
დისკლინაციების დისლოკაციებთან ურთიერთქმედების ხასიათი დამოკიდებულია ბიურგერის ვექტორისა და მობრუნების ვექტორის ურთიერთორიენტაციებზე. ამ ფაქტორის გათვალისწინებით, შესაძლებელია:

1. დისლოკაციების გადაცოცება და სრიალი;
2. დისლოკაციის ბრუნვა, რომელიც გამოიწვევს პირველსაწყისი მდგომარეობიდან კრისტალის ნაწილის χ კუთხით ძვრას;
3. დისკლინაციის გადაკვეთა მოძრავი დისლოკაციით (ზღურბლების წარმოქმნა);
4. დისლოკაციების შთანთქმა დისკლინაციით (დისლოკაციურ-დისკლინაციური კომპლექსის წარმოქმნა).

დისკლინაციები მოქმედებენ წერტილოვან დეფექტებზე. უარყოფითი სოლისებრი დისკლინაციებით ვაკანსიები მიიზიდებიან და დადებითებით განიზიდებიან. კრისტალში დისკლინაციებიც, ისე როგორც დისლოკაციები, წერტილოვანი დეფექტების შთანთქმით ან ამოფრქვევით (გამოშვებით) გადაცოდებიან.

დისკლინაციები კრისტალში პლასტიკური დეფორმაციის დროს წარმოიქმნება. დისკლინაციების წყარო დისლოკაციების ფრანკ-რიდის წყაროს ანალოგიურია.

სურ. 28-ის შესაბამისად, შესაძლებელია კრისტალში დისკლინაციების გახლეჩა.



სურ. 28. დისკლინაციების გახლეჩის მოდელები

განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს მარცვლების სამმაგი შეპირაპირების საზღვარზე მდებარე (სურ. 28, ა) დისკლინაციის გახლეჩა. ამ დროს მცირდება სისტემის დრეკადი ენერგია. დისკლინაციის მოცულობითი გახლეჩა (სურ. 28, ბ) უფრო მცირე სიმძლავრის დისკლინაციებად იწვევს ლოკალურ ამორფიზაციას მარცვლების სამმაგი შეპირაპირების არეში. სხვა ვარიანტია საწყისი დისკლინაციის სამ რიგად გახლეჩა, მეზობელი კრისტალიტების საზღვრების გასწვრივ განლაგებულ, უფრო მცირე სიმძლავრის დისკლინაციებად (სურ. 28, გ). გარდა ჩამოთვლილი შემთხვევებისა, შესაძლებელია საწყისი (სურ. 28, დ) დისკლინაციის ხაზობრივი გახლეჩა, მარცვლის საზღვრის გასწვრივ განლაგებულ, უფრო მცირე სიმძლავრის დისკლინაციებად (სურ. 28, ე).

რაც მეტი ახალი დისკლინაცია წარმოიქმნება, მით მეტად მცირდება მარცვალთსასაზღვრო დისკლინაციის საწყისი დრეკადი ენერგია. დრეკადი ენერგია, ხაზობრივი გახლეჩის შემთხვევაში, ყველაზე მეტად მცირდება ერთმანეთისგან მაქსიმალურად დასაშვებ მანძილზე (ე.ი. მარცვლის საზღვრის სიგრძის ტოლ მანძილზე) დაშორებული ორი დისკლინაციის წარმოქმნისას.

დისკლინაციების გახლეჩა, ნანოკრისტალური მასალების გამყოფ საზღვრებში, დრეკადი ენერგიის ეფექტურ რელაქსაციას იწვევს. ამას თან ახლავს გამყოფი საზღვრის სტრუქტურის ცვლილება (წყობის დეფექტების წარმოქმნა), მიკრობზარების ჩასახვის ალბათობის შემცირება გამყოფი საზღვრების სიახლოვეს და მარცვალთსასაზღვრო დიფუზიის სტიმულირება.

მთლიანობაში, ნანოკრისტალური მასალების ძირითად თავისებურებას წარმოადგენს შორმოქმედი დრეკადი ძაბვების ველები, მარცვლის მცირე ზომებთან და გამყოფი საზღვრების დიდი სიგრძესთან ერთად.

თავი IV

დისპერსიული განმტკიცება

4.1 დისპერსიული განმტკიცების მექანიზმი

შენადნობების მყარხსნარული განმტკიცების მექანიზმისაგან განსხვავებით, განიხილება ის შემთხვევა, როდესაც შენადნობებში კომპონენტები განსაზღვრულად იხსნებიან და ერთ-ერთი მათგანის - გახსნილი ელემენტის - შემცველობა ძირითად კომპონენტში მისი ხსნადობის ზღვარს აღემატება. ასეთ შემთხვევაში, ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად, ხსნადობის ზღვარიც მცირდება. ე.ი. მყარი ხსნარი არაწონასწორულია და მიდრეკილება აქვს დაშლისკენ.

მყარი ხსნარის დაშლის პროცესს ეწოდება დაძველება. იმ შენადნობებში, რომელთა წრთობისას პოლიმორფული გარდაქმნები არ ხდება, წრთობის შემდეგ შენარჩუნებული - გადაჯერებული - მყარი ხსნარი იშლება. შენადნობებში დარჩენილი ან გადაჯერებული მყარი ხსნარების დაშლისას გამოყოფილი სხვა ფაზის ნაწილაკები მნიშვნელოვან წინააღმდეგობას უწევენ დისლოკაციების მოძრაობას. დაძველებისას, გამხსნელი ლითონის კრისტალური გისოსიდან გამოიყოფა ჭარბი ელემენტი, უწვრილესი ნაწილაკების - დისპერსული ფაზის სახით. მყარ ხსნარში თანაბრად განაწილებული დისპერსული ფაზა ამახინჯებს ფუძის (მყარი ხსნარის) კრისტალურ გისოსს და ცვლის შენადნობის მექანიკურ თვისებებს. სისალისა და სიმტკიცის ამაღლება შეიმჩნევა იმ შემთხვევაში, როცა დისპერსული ფაზისა და მყარი ხსნარის ატომურ-კრისტალური გისოსების კოჰერენტულობა შენარჩუნდება.

თერმული დამუშავების შედეგად, დისპერსული ჩანარების გამოყოფით, მიღებულ განმტკიცებას ეწოდება დისპერსიული განმტკიცება, ხოლო დისპერსული ნაწილაკების საწყის კაზმში შეტანით, შემდეგი დაფორმებითა და შეცხოვით გამოწვეულ განმტკიცებას - დისპერსული განმტკიცება.

დისპერსიული გასაღება დიფუზიური პროცესია. შესაბამისად, დისპერსიული გასაღების ეფექტი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული დამკვლელის ხანგრძლივობაზე. რთულად - რამდენიმე მაღეგირებელი ელემენტით - ლეგირებულ ფოლადებში დისპერსიული გასაღება, ხშირად, განსხვავებულად (სხვაგვარად) ვლინდება, ერთი ელემენტით ლეგირებულ ფოლადებთან შედარებით. დამატებით მაღეგირებელ ელემენტებს შეუძლიათ გაადიდონ ან შეამცირონ დისპერსიული გასაღების გამოწვევი ძირითადი მაღეგირებელი ელემენტის ხსნადობა და ამით გაზარდონ ან შეამცირონ მასალის განმტკიცების ეფექტი. ჩვეულებრივ, ასეთი ფოლადების თერმული დამუშავების პროცესს თან მოსდევს (შემდეგ იწყება) დისპერსიული გასაღება, რომელიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მათ თვისებებზე. ფოლადის ძირითადი განმამტკიცებელი ფაზებია: კარბიდები, ნიტრიდები, ინტერმეტალიდები, ქიმიური ნაერთები და სხვ.

სამრეწველო შენადნობებში მეორე ფაზა (გინიე-პრესტონის ზონების გარდა) უფრო ხშირად გადანაწილებულია ძირითად ფაზაში (მატრიცაში). სხვადასხვა კრისტალური გისოსის გამო, ასეთი შენადნობების ყოველ ფაზას საკუთარი სრიალის სისტემა და მიმართულება აქვს. შესაბამისად, ამ სისტემებში დისლოკაციების ასამოძრავებლად განსხვავებული ძვრის კრიტიკული ძაბვებია საჭირო. გარდა ამისა, მეორე ფაზის

ნაწილაკები თავის ირგვლივ შინაგანი ძაბვების მაღალი ლოკალური კონცენტრაციის უბნებს ქმნიან (ნაწილაკისა და მატრიცის კრისტალური გისოსის პარამეტრებისა და გისოსის ტიპების შეუთავსებლობის გამო). ეს უბნები დისლოკაციების ძვრადობას დამატებით ზღუდავენ და, შესაბამისად, აძლიერებენ განმტკიცების ინტენსიურობას. ბუნებრივია, დისლოკაციების მოძრაობა ასეთი აღნაგობის შენადნობებში უფრო რთულია, ვიდრე მყარი ხსნარის ერთგვაროვანი სტრუქტურის შენადნობებში.

ამრიგად, მეორე ფაზის ნაწილაკები მოქმედებენ როგორც ძვრის წინაღობები და აფერხებენ დისლოკაციების მოძრაობას კრისტალურ გისოსში. ზოგადად, მასალის ეფექტურ დისპერსიულ განმტკიცებას იწვევს მოძრავი დისლოკაციის მიერ მატრიცაში თანაბრად განაწილებული მეორე ფაზის დისპერსული გამონაყოფი ნაწილაკების შემოვლა (ოროვანის მექანიზმი) ან გა(და)კვეთა. მეორე ფაზის ნაწილაკების გავლენა დისლოკაციების მოძრაობის წინააღმდეგ სხვადასხვანაირია და შეესაბამება თვითონ ნაწილაკების დეფორმირების ხარისხს. გამონაყოფი ორი სახისაა: დეფორმირებადი (გასაკვეთი) და არადეფორმირებადი.

4.2 დისპერსიული განმტკიცება დეფორმირებადი გამონაყოფი ნაწილაკებით

დეფორმირებადი გამონაყოფებია გინიე-პრესტონის ზონები და კოჰერენტული ან ნაწილობრივ კოჰერენტული ფაზების წვრილდისპერსული გამონაყოფები. მათი კრისტალური გისოსები მატრიცასთან დრეკადაა შეუღლებული და თვით

მარცვალზე დისლოკაციის სრიალის [მარცვლის გა(და)კვეთის] შესაძლებლობას ქმნის. გინიე-პრესტონის ზონა, გახსნილი ატომების გროვებია. ისინი იწვევენ მყარი ხსნარის გისოსის პერიოდის ადგილობრივ ცვლილებას და ამ დროს წარმოქმნილი შინაგანი ძაბვები აძნელებენ დისლოკაციების მოძრაობას. ზონისა და მისი გარემომცველი დამახინჯებულგისოსებიანი არის გამჭოლად გასავლელად უფრო მაღალი გარე ძაბვის მოდებაა საჭირო. ჩვეულებრივ, დისლოკაციის გადაადგილების წინაღობა გროვაში გახსნილი ატომების რაოდენობის შესაბამისად იცვლება.

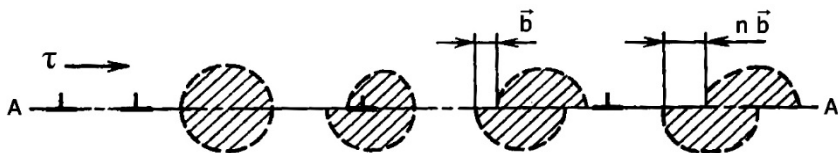
დაძველების განსაზღვრულ ეტაპზე (რომელიმე ნაერთისათვის დამახასიათებელი შემადგენელი კომპონენტების კონცენტრაციის სტექიომეტრიული თანაფარდობის მიღწევისას) კრისტალური გისოსის აღნაგობა გადაეწყობა და მატრიცასთან კოჰერენტულად დაკავშირებული სხვა პარამეტრებიანი გისოსის მქონე ახალი ფაზა წარმოიქმნება.

იმ შემთხვევაში, როცა ლითონისა და მინარევის კრისტალური გისოსები ერთმანეთისგან დიდად არ განსხვავდებიან, ასეთი ფაზები გა(და)იკვეთება მოძრავი დისლოკაციებით (სურ. 29). მოძრავ დისლოკაციას შეუძლია მცირე ზომების (≤ 200 ნმ) და მატრიცის ლითონის სისალის თანაზომადი სისალის ნაწილაკების გა(და)კვეთაც. უფრო ხშირად ეს ხდება ნაწილაკებს შორის მანძილების შემცირებისას. ამასთან, (3)-ის თანახმად, დისლოკაციის გამოსაზნექად აუცილებელი ძაბვები შეიძლება იმდენად გაიზარდოს, რომ მარცვლის გა(და)კვეთა ენერგეტიკულად უფრო მომგებიანი გახდეს.

როცა ნაწილაკის გისოსი მატრიცის გისოსისაგან განსხვავებულია, მაშინ დისლოკაცია იწვევს ძლიერ დარღვევებს ძვრის

სიბრტყეში. ნაწილაკი იძვრის ბიურგერის ვექტორის სიდიდით და, შესაბამისად, ნაწილაკზე (გა)ჩნდება ბიურგერის ვექტორის ტოლი დისლოკაციის საფეხური. ამ დროს ნაწილაკის შიგნით წარმოიქმნება მაღალენერგეტიკული გამყოფი ზედაპირი, ანუ მატულობს ნაწილაკსა და ლითონურ მატრიცას შორის გამყოფი ზედაპირის განფენილობა.

ყველა ეს პროცესი არის ერთ-ერთი მიზეზი მოძრავი დისლოკაციის დამუხრუჭებისა და, შესაბამისად, ორფაზა შენადნობების განმტკიცებისა. ზოგადად, დისლოკაციის გადასვლას მინარევის გისოსში თან ახლავს დისლოკაციის სრიალის სიბრტყის შეცვლა და მასზე (მინარევზე) საფეხურის წარმოქმნა.



სურ. 29. მოსრიალე დისლოკაციით მეორე ფაზის ნაწილაკის გაკვეთის სქემა:

A—A არის სრიალის სიბრტყე;

τ —მოდებული ძაბვა;

$\vec{b}$ —ბიურგერის ვექტორი

ამრიგად, შენადნობის განმტკიცებას განაპირობებს ნაწილაკების შიგნით, ატომთშორისი კავშირების გადაწყობისას აღძრული, მოძრავი დისლოკაციის წინაღობის ამაღლება და ახალი გამყოფი ზედაპირების წარმოქმნა მეორე ფაზის ნაწილაკსა და მატრიცას შორის. განმტკიცებაში თავისი წვლილი შეაქვს მარცვლების ირგვლივ არსებულ ძაბვათა ველებისა და დისლოკაციების ურთიერთქმედებასაც (ე.წ. ნაწილაკების ირგვლივ

არსებული ძაბვების დრეკადი ველების შორს მოქმედი მექანიზმი). ასეთი ძაბვები შეიძლება აღიძრას ნაწილაკისა და მატრიცის (რომლისაგანაც ის გამოიყო) ხვედრითი მოცულობებისა და თერმული გაფართოების კოეფიციენტებს შორის სხვაობებით. წარმოქმნილი ძაბვების დრეკადი ველები, ნაწილაკამდე მისაღწევ მოძრაობის გზაზე, მოძრავი დისლოკაციების შეფერხებას ცდილობენ.

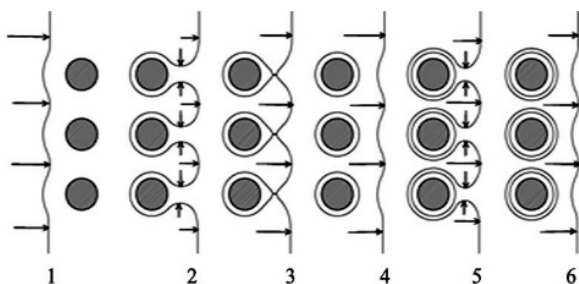
უნდა აღინიშნოს, რომ განმტკიცების ეს მექანიზმები, განსაკუთრებით წვრილი ნაწილაკების შემთხვევაში, პირველხარისხოვანი მნიშვნელობისაა.

4.3 დისპერსიული განმტკიცება არადეფორმირებადი გამონაყოფი ნაწილაკებით

არადეფორმირებადი გამონაყოფებია არაკოჰერენტული მეორე ფაზები. არაკოჰერენტული მეორე ფაზები წარმოიქმნებიან შენადნობების თერმული დამუშავებისას, გადაჯერებული მყარი ხსნარის დაშლის უფრო გვიანდელ სტადიებზე და დამკვლევის პროცესების უფრო მაღალ ტემპერატურებზე. ისინი, ჩვეულებრივ, კოჰერენტულ გამონაყოფებზე უფრო მსხვილია, ხასიათდებიან დიდი სიხისტითა და ურთიერთშორის დიდი (მათ დიამეტრებზე მნიშვნელოვნად მეტი) მანძილებით. მატრიციდან გამოყოფილი ჩანართი ნაწილაკისა და ძირითადი ლითონის ატომური სტრუქტურები და ორიენტაციები ერთმანეთისგან ძლიერ განსხვავდებიან. კოჰერენტულობისა და მატრიცა-გამონაყოფის გისოსების იდეალური შეუღლების დარღვევა (ფაზებს შორის საზღვარზე ატომების მოწესრიგებისა და განლაგების ცვლილება) ცვლის დისლოკაციის მო-

ძრაობის ხასიათს. ასეთი ჩანარები ძლიერი წინაღობებია და მოძრავი დისლოკაციებით ვერ გა(და)იკვეთებიან.

შენადნობების დეფორმირებისას ასეთი გამონაყოფები, მრავალ შემთხვევაში, მოძრავი დისლოკაციებისათვის გადაულახავი წინაღობებია. ისინი ბლოკავენ დისლოკაციების სრიალს როგორც პირდაპირ (ეწინააღმდეგებიან დისლოკაციების გავლას უშუალოდ გამონაყოფის ტანზე), ისე ირიბად (დისლოკაციებისა და ნაწილაკების ირგვლივ არსებულ ძაბვათა ველების ურთიერთქმედებით). ამის გამო, დისლოკაციების სრიალი შესაძლებელია მხოლოდ მატრიცაში. ასეთ შემთხვევებში (შენადნობის პლასტიკური დინებისას, არადეფორმირებადი მეორე ფაზის ნაწილაკებთან მოძრავი დისლოკაციის მიჯახებისას) დისლოკაცია იძულებულია (რადგან ნაწილაკის გაკვეთა შეუძლებელია) შემოუაროს ნაწილაკებს და მათ შორის სრიალით გაიაროს მატრიცაში (სურ. 30).



სურ. 30. დისლოკაციების მოძრაობა მყარ ხსნარში მეორე ფაზის არსებობისას:

1,2,3,4 წარმოადგენს 1 დისლოკაციის ჩანარებებს შორის გავლის ეტაპების თანმიმდევრობას;

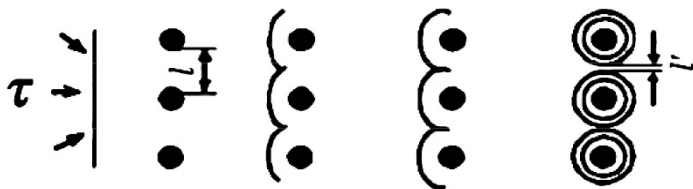
5,6 ეტაპები - მეორე დისლოკაციის გავლის შედეგებს

გარედან მოდებული დატვირთვის მოქმედებით ჩანართებთან შეხვედრისას (1), მოძრავი დისლოკაცია დასაწყისში მოიღუწება და წარმოიქმნება ერთმანეთის შემხვედრად მოძრავი ორი შვერილი (2). შვერილების შეკვრის შემდეგ დისლოკაცია ჩანართიდან „მოწყდება“ (3). დისლოკაციის დარჩენილი უდიდესი ნაწილი (4) მოძრაობას აგრძელებს, ხოლო შედარებით ნაკლები ნაწილი ჩანართების ირგვლივ ქმნის დისლოკაციურ მარყუჟებს – რგოლებს (ოროვანის მექანიზმი). დისლოკაციების ასეთი მოძრაობა დამატებით დამახინჯებებს წარმოქმნის მატრიცის გისოსში.

მოძრავ დისლოკაციას ჩანართებთან შეხვედრისას დამატებითი ენერგეტიკული დანახარჯები უზნდება დისლოკაციის სიგრძის მოსამატებლად, მოსალუნად, შვერილების, ჩანართების ირგვლივ მარყუჟებისა და მატრიცის გისოსში ახალი დამახინჯებების წარმოსაქმნელად. ასეთი წინაღობების დასაძლევად და მოძრაობის გასაგრძელებლად დისლოკაციებს, ცხადია, ესაჭიროება მოდებული გარე ძაბვების ამაღლება. დისლოკაცია, მოძრაობის გზაზე, რაც მეტ ასეთი სახის წინაღობებს შეხვდება, მით მეტი ნალუნები, შვერილები, დისლოკაციური მარყუჟები და, შესაბამისად, კრისტალურ გისოსში მეტი დამახინჯებები წარმოიქმნება. ცხადია, დისლოკაციის შემდგომი მოძრაობისათვის საჭირო გახდება უფრო და უფრო მაღალი გარე ძაბვის მოდება.

ყოველი შემდეგი მოძრავი დისლოკაცია, ნაწილაკებს შორის გავლისას, თითოელი მათგანის ირგვლივ თითო-თითო დისლოკაციურ მარყუჟს ტოვებს (სურ. 30. 5,6). სურ. 31-ის შესაბამისად, ყოველი შემდეგი დისლოკაციის გავლისას მეორე ფაზის ნაწილაკებს შორის l მანძილი მცირდება. დისლოკაციის მოძრაობა რთულდება და, როცა l' გაუტოლდება $l_{კრ}$ -ს,

მოცემული დაბრკოლება დისლოკაციისათვის შეუღწევი ხდება. ე.ი., დეფორმაციის დროს ნაწილაკების ირგვლივ ურთიერთგანმზიდავი დისლოკაციური მარყუქების მატებისას (მარყუქები ერთნაირნიშნანია), ნაწილაკების ირგვლივ არეში აღიმკრება ძლიერი დრეკადი შინაგანი ძაბვები, რომლებიც წყაროდან მომავალი ახალი დისლოკაციების ნაწილაკებს შორის გაღწევას ართულებენ.



სურ. 31. მეორე ფაზის ნაწილაკებს შორის დისლოკაციების გავლის სქემა

როდესაც დისლოკაციური მარყუქების ერთობლიობით შექმნილი ძაბვათა ველები ნაწილაკებს შორის მანძილებს გადაფარავენ და სიდიდით დისლოკაციის სრიალის გამომწვევი ძაბვების სიდიდეს გადააჭარბებენ, დისლოკაციების მოძრაობა შეწყდება - დისლოკაციები დაიბლოკება. ამ მომენტიდან იწყება ნაწილაკების წინ სრიალის სიბრტყეში დაბლოკილი დისლოკაციების დაგროვება (დახორვა). სრიალის სიბრტყეში გროვებისა და მარყუქების ერთობლიობა კი დისლოკაციების წყაროებზე მოქმედი და მათი მუშაობის (ახალი დისლოკაციების გენერირების) გამომწვევი ძაბვების საწინააღმდეგო ნიშნის ძაბვებს წარმოქმნის. როდესაც გროვებისა და მარყუქების მიერ ერობლივად წარმოქმნილი ძაბვათა ჯამი გადააჭარბებს წყაროს მუშაობისათვის აუცილებელი ძაბვის სიდიდეს, წყაროს მუშაო-

ბა დაიბლოკება და, საბოლოოდ, შენადნობის სიმტკიცე მნიშვნელოვნად გაიზრდება.

დეფორმაციის გასაგრძელებლად მოდებული ძაბვების სიდიდის შემდგომი ამაღლება იწვევს ნაწილაკების ძვრას (ნაწილაკის ერთი ნაწილი იძვრის მეორის მიმართ). მაგრამ, რადგან ნაწილაკის კრისტალური გისოსი მატრიცის გისოსისაგან განსხვავებულია, მის გადაჭრას თან ახლავს მოძრავი დისლოკაციების ძლიერი დამუხრუჭება ან ლითონის რღვევა (შესაძლოა ძაბვების კონცენტრაცია საკმარისი აღმოჩნდეს მიკროზზარების ჩასახვისათვის). დეფორმაციის ტემპერატურის დადაბლებასთან ერთად, მატულობს დისლოკაციების ძლიერი დამუხრუჭებისა და ლითონის რღვევისადმი მიდრეკილება.

ზოგადად, რაც მეტია პლასტიკური დეფორმაცია (ციკქედვა), მით უფრო მტკიცდება ლითონი. რაც უფრო წვრილია დაბრკოლებები (მეორე ფაზის ნაწილაკები ან მინარევი ატომები), რაც უფრო ახლოს არიან ისინი განლაგებული ერთმანეთთან და მეტია მათი რაოდენობა, მით მეტია (ძნელდება დისლოკაციების მოძრაობა) განმტკიცება. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ორფაზა სტრუქტურა, როდესაც მეორე ფაზის წვრილი ჩანართები თანაბრადაა განაწილებული პლასტიკურ მატრიცაში. ასეთი ტიპის სტრუქტურა მიიღება თერმული დამუშავებით, ფხვნილოვანი მეტალურგიის ან სხვა მეთოდებით.

მეორე ფაზის დისპერსული ნაწილაკებით დისლოკაციების დამუხრუჭების მოვლენა ფართოდ გამოიყენება მაღალმტკიცე მასალების შემუშავებისას. მეორე ფაზის ნაწილაკების შემოვლისა და მათ კოაგულაციისათვის საჭიროა დამატებითი ენერგია. აი რატომ არის უფრო მტკიცე ორ- და მეტფაზიანი შენადნობები ერთფაზიანთან შედარებით.

4.4 მრავალფაზიანი სტრუქტურის დეფორმირების თავისებურებები

პლასტიკურად დეფორმირებადი მასალების განმტკიცება მიიღწევა რამდენიმე გზით: კრისტალიტების ზომების შემცირებით, მყარი ხსნარის წრთობით, დეფორმაციული განმტკიცებით, დისპერსიული განმტკიცებით, არმირებით (ნაწილაკებით ან ბოჭკოებით). თითოეული ეს მეთოდი ცალკეულ მასალას გამოყენების საკუთარი დამაბულობისა და ტემპერატურის არეებს უსაზღვრავს. ამვე დროს, ამა თუ იმ მეთოდის გამოყენებისას, გათვალისწინებული უნდა იქნეს მატრიცის მექანიკური მახასიათებლების გამაუმჯობესებელი მარცვლის საზღვრების როლიც.

მეტალურგები მასალის მაკროსკოპულ თვისებებს საზღვრავენ ისეთი ექსპერიმენტული მონაცემებით, როგორიცაა დეფორმაციის ძაბვაზე დამოკიდებულების, დაღლილობის, ძაბვის რელაქსაციისა და ცოცვადობის მრუდები, რომლებიც დამოკიდებული არიან გარე ფაქტორებზე (ტემპერატურაზე, დეფორმაციის ან დატვირთვის მოდების სიჩქარეზე) და მასალის შინაგან აღნაგობაზე. მისი საპასუხო რეაქციის ეს ძირითადი გამოვლინებები, შენადნობის სხვადასხვა მექანიკურ და სითბურ ზემოქმედებებზე, ითვლება მონაცემთა იმ ნაკრებად, რომლითაც ხელმძღვანელობენ როგორც პრაქტიკოსი ინჟინრები, ისე თეორეტიკოსი მეტალურგები. ელექტრონული მიკროსკოპიის ფართოდ გამოყენებამ მეცნიერებს შესაძლებლობა მისცა ღრმად გარკვეულიყვნენ დეფორმაციის მიკროსკოპულ მექანიზმებში.

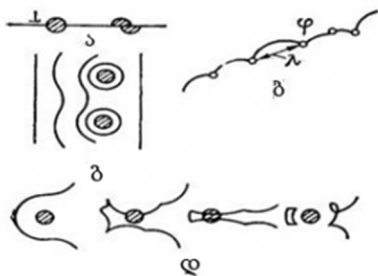
ორ- და მეტფაზიანი შენადნობების შემუშავებისას, მკვლევარების მთავარ მიზანს წარმოადგენს დენადობის ზღვრის

ამაღლება გისოსის ხახუნის ძაბვაზე (ძვრის კრიტიკულ ძაბვაზე) ან გახსნილი და გამხსნელი ნივთიერებების ატომების ზომების განსხვავებით განმტკიცებული მყარი ხსნარის კრისტალურ გისოსში გამოწვეულ ძაბვებზე. ისეთი სალი ნაწილაკები, როგორიცაა მაგ., კარბიდები, მოსრიალე დისლოკაციების მოქმედებით, ძვრის დეფორმაციას არ ექვემდებარებიან, ზომებსა და განაწილებას ძალიან მაღალ მუშა ტემპერატურამდე არ იცვლიან.

ნაწრთობი ფოლადის მოშვებისას წარმოქმნილი კარბიდები მარტენსიტს აღარიბებენ ნახშირბადით და, შესაბამისად, ამცირებენ მყარხსნარული მექანიზმით გამოწვეულ განმტკიცებას. გარდა ამისა, უწყვეტობის შენარჩუნება ართულებს ფაზების გამყოფი ზედაპირების გასწვრივ პლასტიკურ დენადობას. ე.ი. მრავალფაზიანი შენადნობების დეფორმირება, ერთფაზიანთან შედარებით, უფრო რთულია. ცალკეულ ფაზას საკუთარი სრიალის სისტემა და ძვრის საკუთარი კრიტიკული ძაბვა აქვს. პლასტიკური დენადობის სირთულიდან გამომდინარე, ორფაზა შენადნობები, ერთფაზიანთან შედარებით, სიმტკიცის უფრო მაღალი და პლასტიკურობის უფრო დაბალი მახასიათებლებით ხასიათდებიან.

ორფაზა შენადნობის დეფორმირების პროცესი დამოკიდებულია შენადნობში მეორე ფაზის არა მხოლოდ შედგენილობაზე, არამედ სტრუქტურაში მათი განაწილების ხასიათზეც. მარცვლის ირგვლივ უწყვეტი ბადის სახით გამოყოფილი მყიფე მეორე ფაზა შენადნობს ამყიფებს. შენადნობის პლასტიკურ მატრიცაში ცალკეული მარცვლის სახით გამოყოფილი მყიფე მეორე ფაზის იგივე რაოდენობა შენადნობს განამტკიცებს, მაგრამ პლასტიკურობას უნარჩუნებს. ორფაზიანი შენადნობის

პლასტიკურ მატრიცაში მოძრავი დისლოკაცია, მისთვის გაუვალ თანაბრად განაწილებულ მეორე ფაზის წვრილ ჩანართებთან შეხვედრისას, გაივლის მათ შორის და ყოველთვის ტოვებს დისლოკაციურ მარყუებს ჩანართების ირგვლივ (სურ. 32). მარყუეების რაოდენობა პირდაპირ აისახება განმტკიცების ხარისხზე (მეტი მარყუეი – მეტი განმტკიცება). ჩანართების რაოდენობის ზრდა და მათ შორის მანძილის შემცირება კრიტიკულ (~15 ნმ) მნიშვნელობამდე ამაღლებს ძვრის წინააღობას.



სურ. 32. დისლოკაციებისა და ჩანართების ნაწილაკების ურთიერთქმედება

რეალურ ლითონებში არსებული მეორე ფაზის ნაწილაკები დისლოკაციებთან ურთიერთქმედებენ. იმ შემთხვევაში, როცა ლითონისა და მინარევის კრისტალური გისოსები ერთმანეთისგან დიდად არ განსხვავდებიან, მოძრავ დისლოკაციას შეუძლია გაიაროს მინარევი (სურ. 32, ა). ამ დროს ნაწილაკზე წარმოიქმნება დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორის ტოლი საფეხური. შედეგად, ნაწილაკში ჩნდება გამყოფი ზედაპირი. ამის გარდა, საფეხურის გაჩენასთან ერთად, მატულობს გამყოფი ზედაპირის განფენილობა ნაწილაკსა და ლითონურ მატრიცას შორის, რაც ორფაზა შენადნობების განმტკიცების ერთ-ერთი მიზეზია. ზოგადად, მინარევის გისოსში დისლო-

კაციის გადასვლას თან ახლავს დისლოკაციის სრიალის სიბრტყის შეცვლა და მინარევზე საფეხურის წარმოქმნა.

უფრო ხშირად ჩანართი ნაწილაკისა და ძირითადი ლითონის ატომური სტრუქტურები ერთმანეთისგან ძლიერ განსხვავდებიან, რის გამოც ნაწილაკები დისლოკაციების მოძრაობას აფერხებენ. ასეთ ჩანართებთან შეხვედრისას, დისლოკაციები ფკუთხემდე გაიჭიმება (სურ. 32, ბ). იმ შემთხვევაში თუ ძაბვა საკმარისი იქნება ნაწილაკებს შორის დისლოკაციის ნახევარწრედ ამოსალუნად, დისლოკაცია შემოუვლის ნაწილაკებს და მათ ირგვლივ დატოვებს მარყუჟებს (სურ. 32, გ). ნაწილაკის ირგვლივ გაჩენილი დისლოკაციური მარყუჟი ხელს უწყობს ორფაზა შენადნობის განმტკიცებას.

დისლოკაციებს განივი სრიალითაც შეუძლიათ შემოუარონ ჩანართს და ხრახნული დისლოკაციის შემთხვევაში მათ უკან ერთი დისლოკაციური მარყუჟი დატოვონ (სურ. 32, დ).

4.5 დისპერსიული განმტკიცების პრაქტიკული მნიშვნელობა

ითვლება რომ დისპერსიული ნაწილაკებით გასაღება, ანუ დისპერსიული განმტკიცება $\sigma_{დ.გ.}$ უდიდეს მნიშვნელობას იძენს ფერად ლითონებში, კერძოდ: დურალუმინებში, კობალტის, ნიკელისა და სპილენძის ფუძის შენადნობებში. დამუშავებულია ახალი შენადნობები რკინის ფუძეზე, რომელთა სიმტკიცე მნიშვნელოვნად განისაზღვრება დისპერსიული გასაღებით. ფართო გამოყენება პოვებს მიკროლეგირებულმა საკონსტრუქციო ფოლადებმა და მარტენსიტულად დაძველებადმა ფოლადებმა. მიკროლეგირებული საკონსტრუქციო ფო-

ლადები შეიცავს მცირე რაოდენობით Ti, V, Zr, Nb-ს, რომლებიც ნახშირბადთან და აზოტთან წარმოქმნიან სალ დისპერსულ კარბონიტრიდის ნაწილაკებს, ხოლო რკინაში გახსნილი Al აზოტთან—AlN-ის სალ ნაწილაკებს.

მარტენსიტული დამველებადი ფოლადების შედგენილობა ისეა შერჩეული, რომ, დამველებისას, უნახშირბადო მარტენსიტულ მატრიცაში წარმოიქმნება Ni_3Ti , FeAl და სხვა ტიპის გასალების ხელშემწყობი სალი ინტერმეტალური ნაერთები.

ამრიგად, დისპერსული ჩანართების გამოყოფით მიღებული განმტკიცება მით მეტია, რაც უფრო მეტია პლასტიკური დეფორმაცია, უფრო მცირე ზომისაა დაბრკოლებები, უფრო ახლოს არიან ისინი განლაგებული ერთმანეთთან და რაც მეტია მათი რაოდენობა. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ორფაზა სტრუქტურის ისეთი მდგომარეობა, როდესაც მეორე ფაზის მცირე ზომის ჩანართები თანაბრადაა განაწილებული პლასტიკურ მატრიცაში. ასეთი ტიპის სტრუქტურა მიიღება თერმული დამუშავებით, ფხვნილოვანი მეტალურგიის ან სხვა მეთოდებით.

ფერიტ-პერლიტური ფოლადების განმტკიცებას განაპირობებს ფერიტში დაწყებული დისლოკაციების მოძრაობის (დეფორმაციის) პერლიტური კოლონიებით შეფერხება. რაც უფრო მეტი იქნება პერლიტური მდგენელი და მაღალი იქნება მისი დისპერსულობა (ნაკლები მანძილი ცემენტიტის ცალკეულ ფირფიტებს შორის), მით მეტი იქნება ფოლადის განმტკიცების ხარისხი. ფოლადების განმტკიცებასთან ერთად, მკვეთრად უარესდება მათი დარტყმითი სიბლანტის მაჩვენებელი და მაღლდება ბლანტ-მყიფე გადასვლის ტემპერატურა.

4.6 დისპერსული განმტკიცება

ფხვნილოვან ნარევეში შეტანილი ძნელდნობადი განმამტკიცებელი ნაერთებით ან შინაგანი ჟანგვით წარმოქმნილ და შეცხოვისას ან ექსპლუატაციისას გახსნილი ოქსიდური ჩანართებით განმტკიცებულ მასალას დისპერსულად განმტკიცებულს უწოდებენ. ამგვარად, ასეთი კლასის მასალის დამახასიათებელი თავისებურებაა ლითონურ ფუძეში, ლითონის ნაწილაკებს შორის, თანაბრად განაწილებული და მასთან ქიმიურად ინერტული წვრილდისპერსული განმამტკიცებელი ფაზების ჩანართები.

დისპერსულად განმტკიცებადი მასალების შემუშავებისას გადასაწყვეტია ოთხი ძირითადი ამოცანა:

1. განმამტკიცებელი ფაზისა და მისი მოცულობითი შედგენილობის არჩევა;
2. განმამტკიცებელი ფაზის მატრიცაში შეტანის ხერხის არჩევა;
3. კომპაქტური მასალის მიღების ხერხის არჩევა;
4. თერმული- და თერმომექანიკური დამუშავების რეჟიმების არჩევა.

განმამტკიცებელ ფაზებს მოეთხოვება:

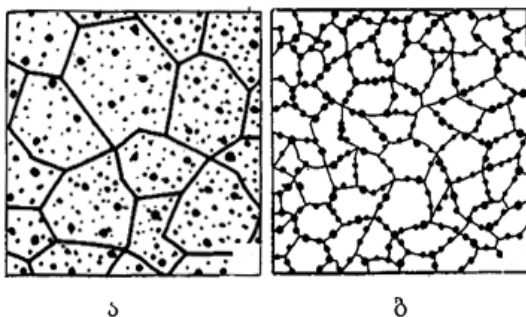
1. წარმოქმნის მაღალი თავისუფალი ენერგია;
2. მატრიცაში ფაზის კომპონენტების მცირე ხსნადობა და დიფუზიის დაბალი სიჩქარე;
3. დისპერსული ფაზის მაღალი სისუფთავე და დიდი ჯამური ზედაპირი.

ასეთი თვისებების განმამტკიცებელი ფაზებია: Al_2O_3 , SiO_2 , ThO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , Cr_2O_3 და სხვა ოქსიდები, გარდამავალი

ლითონების კარბიდები და ნიტრიდები, Ni_3Al და MnAl_6 ტიპის ინტერმეტალიდები და ზოგი ძნელდნობადი ლითონი.

განმამტკიცებელი ფაზის დასაშვები მოცულობითი შედგენილობა განისაზღვრება არჩეული დისპერსულობის ნაწილაკების თანაბრად განაწილების ტექნოლოგიური შესაძლებლობებით.

განმამტკიცებელი ფაზის ნაწილაკების მატრიცაში შეტანის ხერხი დამოკიდებულია დისპერსულად განმტკიცებული მასალის სტრუქტურის ტიპის არჩევაზე, რომელიც შეიძლება იყოს დისპერსული (სურ. 33, ა) ან აგრეგატული (სურ. 33, ბ). რეალურ მასალებში ეს სტრუქტურები თანაარსებობენ, თუმცა ისწრაფვიან უფრო უმჯობესი დისპერსული სტრუქტურისაკენ.



სურ. 33. დისპერსულად განმტკიცებული მასალის სტრუქტურის ტიპები:

ა—დისპერსული;

ბ—აგრეგატული

ფხვნილოვანი ნარევების მიღების ხერხები:

1. მატრიცის ლითონისა და განმამტკიცებელი ფაზის ფხვნილების მექანიკური შერევა;

2. ლითონის ოქსიდებისა და განმამტკიცებელი ფაზის ფხვნილების მექანიკური შერევა და ფუძის ლითონის ოქსიდის შემდგომი აღდგენა;

3. ძირითადი ლითონის ფხვნილის ზედაპირული ჟანგვა;

4. ქიმიური შერევა, რომელიც ითვალისწინებს მარილების ერთობლივ დალექვას და მათ აღდგენას (გავარვარების შემდეგ), რომლის დროსაც ხდება ლითონის წარმოქმნა და განმამტკიცებელი ოქსიდური ფაზის შენარჩუნება;

5. ფხვნილების შინაგანი ოქსიდირება ან დააზოტება.

პირველი სამი მეთოდით, უპირატესად, მიიღება აგრეგატული სტრუქტურა, ხოლო შემდეგი ორით – დისპერსული.

ნაკეთობის მისაღებად მომზადებულ კაზმს წნეხენ და აყალიბებენ (სასურველი ფორმით) ჰიდრო- და გაზოსტატებში ან გლინავენ. შეცხოვას აწარმოებენ წყალბადის ატმოსფეროში საჭირო ტემპერატურაზე განსაზღვრული დროით. ნახევარფაზრიკატების შემდგომი გადამუშავება ხდება ადიდვით, გლინვით, როტაციული ჭედვით და სხვ.

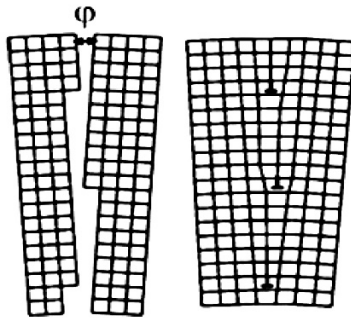
სხვადასხვა აგრესიულ არეებში საექსპლუატაციოდ მდგრადი მხურვალმტკიცე მასალების შემუშავებისას, პრაქტიკულად დადგენილია განმტკიცების ყველაზე ეფექტური პარამეტრები: განმამტკიცებელი ფაზა მოცულობითი 3-15%; მარცვლის ზომა ≤ 1 მკმ (უმჯობესია 0,01-0,05 მკმ) და მათ შორის მანძილი 0,1 - 0,5 მკმ. ასეთი დისპერსულად განმტკიცებული მასალები, დეფორმაციისა და თერმული დამუშავების პროცესებში ჩამოყალიბებულ მიკროჰეტეროგენულ აღნაგობას, დისლოკაციურ სუბსტრუქტურას და, შესაბამისად, მუშაობის უნარს მატრიცის 0,9-0,95 $T_{დნ}$ ტემპერატურებამდე ინარჩუნებენ.

თავი V

მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება

5.1 მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცების მექანიზმი

მარცვალთ- და სუბმარცვალთშორისი საზღვრები პოლიკრისტალური ლითონების სტრუქტურის განუყოფელი ელემენტებია. ისინი წარმოადგენენ საზღვრის ორივე მხარეს ერთმანეთისგან ორიენტაციით განსხვავებულ სივრცული კრისტალური გისოსების მქონე მარცვლების გამყოფ ზედაპირებს. სხვაგვარად – სხვადასხვა ორიენტაციის ერთმანეთთან მიერთებულ მონოკრისტალებს შორის ერთი მონოკრისტალიდან მეორეზე უწყვეტ გადასასვლელს. თუ მარცვლებს შორის განორიენტირების კუთხე - φ $5 \div 10^0$ -ს არ აღემატება, მაშინ საზღვრებს მცირეკუთხოვანს ან სუბსაზღვრებს უწოდებენ, ხოლო მათ მიერ შემოსაზღვრულ არეს - სუბმარცვლებს (სურ. 34). ასეთი საზღვრები არსებობს როგორც პოლიკრისტალში, ისე მონოკრისტალში. თუ მარცვლებს შორის განორიენტირების კუთხე 10^0 გრადუსს აღემატება, მაშინ საზღვარს დიდკუთხოვანს უწოდებენ. მონოკრისტალები დიდკუთხოვან საზღვრებს არ შეიცავენ.



სურ. 34. მარცვლები და მცირეკუთხოვანი საზღვარი

ატომების სწორი განლაგება განსხვავებული ორიენტაციების სივრცული კრისტალური გისოსების ურთიერთშეხების საზღვრის ორივე მხარეზე ირღვევა. შესაბამისად, მარცვლებს შორის საზღვრები მოძრავი დისლოკაციებისთვის ეფექტური ბარიერი ხდება.

მარცვლების ან ფრაგმენტების საზღვრებს საკუთარი დამაბულობის ველებით დისლოკაციების შეჩერება შეუძლიათ. განორიენტირების კუთხის გადიდებასთან ერთად, ძლიერდება მარცვლების საზღვრების, წინააღმდეგობის ეფექტურობა, რადგან ნახტომისებრად საზღვრის გადაკვეთისას იცვლება სრიალის სიბრტყის ორიენტაცია. მარცვლების საზღვრებზე, როგორც წესი, გროვდება მინარევები, რაც ხელს უწყობს სიმტკიცის მახასიათებლების ამაღლებას.

მარცვლის საზღვრების წინააღმდეგობის ეფექტურობას ისიც აძლიერებს, რომ ერთმანეთს არ ემთხვევა სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციები საზღვრების არცერთ მხრიდან. მაშასადამე, რაც მეტია მარცვლების განორიენტირების კუთხე, მით მეტია სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციების ერთმანეთთან დაუმთხვევლობა და პოლიკრისტალური სხეულების დეფორმაციის საერთო წინააღმდეგობა. მარცვალთშორისი საზღვრებით სრიალის გართულებისა და მარცვლიდან მარცვალში დეფორმაციის გაცემის შეზღუდვის გამო, პოლიკრისტალური სხეულების მაკროპლასტიკურ დეფორმაციას, მონოკრისტალურთან შედარებით, უფრო მაღალი გარე დატვირთვის მოდება ესაჭიროება.

დისლოკაციისათვის მარცვლების საზღვრები შეიძლება იყოს გასავლელი და გაუვლელი. თუ მეზობელი მარცვლების სრიალის სიბრტყეების ერთმანეთთან მობრუნების კუთხე 4 – 5°-ს არ აღემატება, მაშინ დამატებითი ძალის საჭიროების

მიუხედავად, მარცვლის საზღვარი დისლოკაციისათვის გასავლელია. რაც მეტია სრიალის სიბრტყეებს შორის მობრუნების კუთხე, მით ძნელად გასავლელია საზღვარი. ამით აიხსნება ის ფაქტი, რომ წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის შენადნობებს მეტი სიმტკიცე და უკეთესი პლასტიკურობა აქვთ.

განორიენტირებული ($>5^{\circ}$ -ზე) მარცვლებიდან ერთ-ერთ მარცვალში მოსრიალე დისლოკაცია უშუალოდ მეორე მარცვალში მოძრაობას ვერ გააგრძელებს. ამისათვის საჭიროა სრიალის სიბრტყისა და ბიურგერსის ვექტორის ცვლილება. თუ დავუშვებთ, რომ დისლოკაცია თავისი ბიურგერსის ვექტორით გადავიდა მეზობელ მარცვალში, მაშინ ეს ვექტორი მეორე მარცვლის გისოსის მიმართ ნებისმიერად იქნება ორიენტირებული და ასეთი დისლოკაციის მოძრაობა ატომების წყობას ძლიერ დაარღვევს. ამრიგად, მეორე მარცვალში მოსრიალე დისლოკაციის მოძრაობის გასაგრძელებლად საჭიროა იდეალურ გისოსში ძვრის წინააღმდეგ თეორიული სიდიდის შესაბამისი ძაბვა. იმის გამო, რომ მოსრიალე დისლოკაციას ასეთი სიდიდის ძაბვა არ მიეწოდება იგი იძულებულია მარცვლის საზღვართან გაჩერდეს.

მარცვლის საზღვრის მიმართულებით იმავე სიბრტყეში მოძრავი შემდეგი დისლოკაცია განიზიდება ადრე გაჩერებული დისლოკაციის დრეკადი ძაბვების ველით და მასთან გარკვეული მიახლოების შემდეგ ისიც დამუხრუჭდება, და ა.შ. რაც მეტი დისლოკაციაა გროვავში, მით უფრო ძლიერია განზიდვა და მით უფრო ძნელად დეფორმირდება ლითონი. დისლოკაციების სიმკვრივის გარკვეული მნიშვნელობის მიღწევასას, ასეთ ადგილებში ზნარი ჩაისახება.

დეფორმირების პროცესში პოლიკრისტალური ლითონების

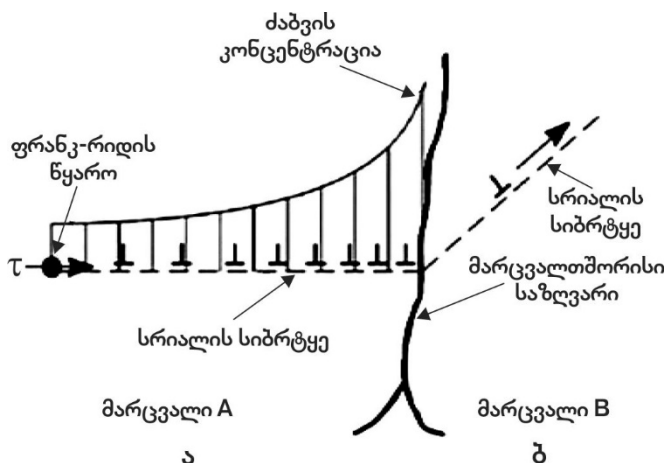
განმტკიცება, დისლოკაციური მექანიზმის გარდა, მჭიდროდაა დაკავშირებული მარცვლების განორიენტირებასთან, მარცვლების საზღვრების სიგრძისა და აღნაგობის თავისებურებებთან. რაც მეტია მარცვლების საზღვრების სიგრძე და კრისტალოგრაფიულად სხვადასხვაგვარი ორიენტაციის მარცვლების რაოდენობა (ე.ი. რაც უფრო მეტია დისლოკაციის მოძრაობის წინაღობა), მით მეტია ამ ფაქტორების შენატანი განმტკიცებაში. მარცვალთშორისი საზღვრების სიგრძის მატებასთან ერთად, ბუნებრივია, მატულობს პოტენციალური დისლოკაციური წყაროების (ფრანკ-რიდის წყაროების) რიცხვიც. ამასთან, ჩნდება მეტი ალბათობა მეზობელ მარცვალში სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციების არდამთხვევისა. ნათელია, რომ პლასტიკური დინების ერთსა და იმავე სტადიაზე წვრილმარცვლოვანი მასალები, დისლოკაციების უფრო სწრაფი ჩასახვისა და დაგროვების გამო, უფრო სწრაფად მტკიცდებიან და სიმტკიცის უფრო მაღალი დონე აქვთ, ვიდრე მსხვილმარცვლოვანს (მაგ., მარცვლის ზომის 10-ჯერ შემცირება სიმტკიცეს 3-ჯერ ამადლებს). უნდა აღინიშნოს, რომ მარცვლის ზომების შემცირებისას, განმტკიცების პროცესი რთულდება. ამ დროს მცირდება მარცვლის საზღვართან დაგროვებული დისლოკაციების რიცხვი და, შესაბამისად, მცირდება ძაბვათა ველიც, მაგრამ მთავარი ისაა, რომ მატულობს განორიენტირებული მარცვლების რაოდენობა, რაც, ჯამურად, მარცვლის საზღვრებს უფრო ეფექტურ ბარიერებად ხდის.

დისლოკაციის წყაროს ასამუშავებლად აუცილებელი სიდიდის ძაბვა, როგორც წესი, წარმოიქმნება მოქმედი ძაბვების მიმართულებასთან სრიალის სიბრტყეების ხელსაყრელი ორიენტაციის კრისტალში (უფრო ადრე ვიდრე მეზობელ კრისტალში) და დისლოკაციებს გადაადგილებს მარცვლის საზღვრების

მიმართულებით. სურ. 35-ის შესაბამისად, A მარცვლის საზღვართან, როგორც ბარიერთან, გროვდება დისლოკაციები. პოლიკრისტალების მარცვალში, საზღვართან დამუხრუჭებული დისლოკაციების დაგროვებით, წარმოქმნილი ძაბვები დრეკადად ვრცელდება მარცვლის საზღვრებზე და მეზობელ B მარცვალში იწყებს დისლოკაციების გენერირებას (მოქმედებაში მოჰყავს ფრანკ-რიდის წყაროები). როცა ძაბვების დონე გადააჭარბებს მეზობელი მარცვლების „სასტარტო“ ძაბვის სიდიდეს ($\tau_{\text{კ}}$), პლასტიკური დეფორმაცია მეზობელ მარცვალშიც გავრცელდება. მაშასადამე, მარცვლიდან მარცვალს პლასტიკური დეფორმაცია გადაეცემა არა მოსრიალე დისლოკაციების საზღვარზე გადასვლით, არამედ - ესტაფეტურად. აღსანიშნავია, რომ სრიალის სიბრტყეების არახელსაყრელი კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის გამო, როგორც წესი, $\tau_{\text{კ}}$ სიდიდით მეზობელ მარცვალში უფრო მეტია ვიდრე მოქმედ ძაბვებთან ხელსაყრელად ორიენტირებულ დეფორმირებად საწყის (პირველად) მარცვალში.

პოლიკრისტალური მასალებისათვის სიმტკიცის აუცილებელი პირობა მარცვლის საზღვრების სიმტკიცეა. მათ სიმტკიცეზე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მასალების პლასტიკური თვისებები. საზღვრისპირა შრეებს, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გავლენით, უფრო დამახინჯებული კრისტალური გისოსი აქვთ, ვიდრე მარცვლის შიგა შრეებს. შესაბამისად, პლასტიკურ დეფორმაციას მარცვლის საზღვრები, მარცვლის ტანთან შედარებით უფრო დიდ წინააღმდეგობას უწევენ. ამის გამო, წვრილმარცვლოვანი შენადნობები პლასტიკური დეფორმაციისადმი უფრო მაღალი წინააღმდეგობით ხასიათდებიან და, ძირითადად, მარცვალზე ირღვევიან (ბლანტი

რღევვა), მსხვილმარცვლოვან შენადნობებში კი მარცვლის საზღვრები ირღევვა. აღნიშნული მდგომარეობა დასტურდება მობრუნების მოვლენით და ე.წ. კოგეზიური სიმტკიცის ტემპერატურის (რომლის დროსაც მარცვლისა და მისი საზღვრების სიმტკიცე ერთნაირია) არსებობით. აუსტენიტის მარცვლის საზღვრების სიმტკიცე მათ აღნაგობაზეა დამოკიდებული. უხეში საზღვრები, წვრილ საზღვრებთან შედარებით, როგორც წესი, დაბალი სიმტკიცისაა და უფრო სწრაფად ირღევვა.



სურ. 35. დისლოკაციის მოძრაობის სქემა მეზობელ მარცვლებში:

- ა. - A მარცვალში მოქმედი დატვირთვისადმი სრიალის სიბრტყე ხელსაყრელადაა ორიენტირებული;
- ბ. - B მარცვალში მოქმედი დატვირთვისადმი სრიალის სიბრტყე არახელსაყრელადაა ორიენტირებული

მარცვლების საზღვრებით განპირობებულია მასალათა თვისებების ცვლის უნიკალური თავისებურება. მასალის დეფორმირებისას (განსაკუთრებით დეფორმირების საწყის ეტაპზე), უპირატესად საზღვრების სიახლოვეს განვითარებული დის-

ლოკაციების განივი სრიალი ასუსტებს დისლოკაციის ბლოკირებას და მათი კონცენტრაციის ადგილებში ძაბვები რელაქსირდება. შესაბამისად, დეფორმირებისას, მასალა გარკვეული ხარისხით ინარჩუნებს პლასტიკურობასა და სიბლანტეს. წვრილმარცვლოვანი მასალა, მსხვილმარცვლოვანთან შედარებით, დისლოკაციების განივი სრილის მეტი მასობრიობით ხასიათდება. აქედან გამომდინარე, მარცვლის დაწვრილმანება იწვევს სიმტკიცის, სიბლანტისა და მყიფე რღვევისადმი წინაღობის ერთდროულ ამაღლებას.

ზოგადად, მარცვლების საზღვრების სიმტკიცეზე გავლენის განხილვისას ძნელია თვით საზღვრების გავლენის გაცალკავება საზღვრებზე და საზღვრისპირა არეებში დაგროვებული მინარევების გავლენისაგან (მინარევების თუნდაც უმნიშვნელო რაოდენობა ყოველთვის არსებობს რეალურ ლითონებში). უსუფთავესი ლითონის საზღვრების გავლენა სიმტკიცეზე გაცილებით ნაკლებია, მათ დადებით გავლენასთან შედარებით პლასტიკურობასა და სიბლანტეზე. ამგვარად, სიმტკიცისა და პლასტიკურობის მახასიათებლების დამოკიდებულება მარცვლის ზომებზე, „სუფთა“ ლითონებთან შედარებით, „დაბინძურებული“ ლითონებისათვის უფრო მნიშვნელოვანია. ზესუფთა პოლიკრისტალებში მსხვილმარცვლოვან ლითონებს უკეთესი სიბლანტე აქვს.

როგორც აღნიშნული იყო, სიმტკიცეზე განსაზღვრულ გავლენას ის ფაქტიც ახდენს, რომ დატვირთვისას, პლასტიკური დინების უკვე საწყის სტადიებზე, მარცვლის საზღვრების ცალკეულ უბნებს მეზობელ მარცვლებში დისლოკაციების აღძვრა („გამოსხივება“) შეუძლია. ასეთ შემთხვევაში საზღვრისპირა მიკრომოცულობებში დისლოკაციების სიმკვრივე

მატულობს და დეფორმაციების ლოკალიზება ძლიერდება. აქედან გამომდინარე, მონოკრისტალისა და პოლიკრისტალის ცალკეული მარცვლის ტოლი სიდიდით დეფორმირებისას, დისლოკაციების სიმკვრივე და, შესაბამისად, დეფორმაციის საერთო წინაღობაც პოლიკრისტალის ცალკეულ მარცვალში, მონოკრისტალთან შედარებით, ყოველთვის უფრო მაღალია.

ამრიგად, მარცვლების საზღვრები მოძრავი დისლოკაციებისათვის წარმოადგენს როგორც ბარიერს, ისე (მათი ცალკეული უბნები) მეზობელ მარცვალში მოძრავი დისლოკაციების გენერირების დამატებით წყაროს. რაც უფრო მეტადაა განვითარებული მარცვალთშორისი საზღვრები, მით უფრო წვრილმარცვლოვანია მასალა, მეტია განმტკიცების ხარისხი, მეტი დამატებითი წყარო წარმოიქმნება, გაიზრდება მოძრავი დისლოკაციების რაოდენობა და, შესაბამისად, - ლითონის პლასტიკურობის მახასიათებლებიცა და სიბლანტეც.

განმტკიცების მექანიზმების განხილვისას გასათვალისწინებელია მარცვლის არამონოლითურობა. მარცვალი არ არის აგებული მკაცრად პარალელური ატომური შრეებით, ამასთან, მისი შემადგენელი ცალკეული ბლოკების (სუბმარცვლების), კრისტალოგრაფიული სიბრტყეები ერთმანეთის მიმართ მცირე კუთხითაა (რამდენიმე კუთხური წუთით) მობრუნებული. ბლოკებს შორის საზღვრები წარმოადგენს ბარიერს ერთი ბლოკიდან მეორეში დისლოკაციების თავისუფალი მოძრაობისათვის და, შესაბამისად, იწვევს ლითონის დამატებით განმტკიცებას. მარცვლის ასეთი აღნაგობა იწოდება მოზაიკურ სტრუქტურად, ხოლო მისი შემადგენელი ბლოკები - მოზაიკის ბლოკებად. ერთმანეთის მიმართ რამდენიმეგრადუსიანი კუთხით ორიენტირებული ბლოკების უფრო მსხვილ აგრეგატებად

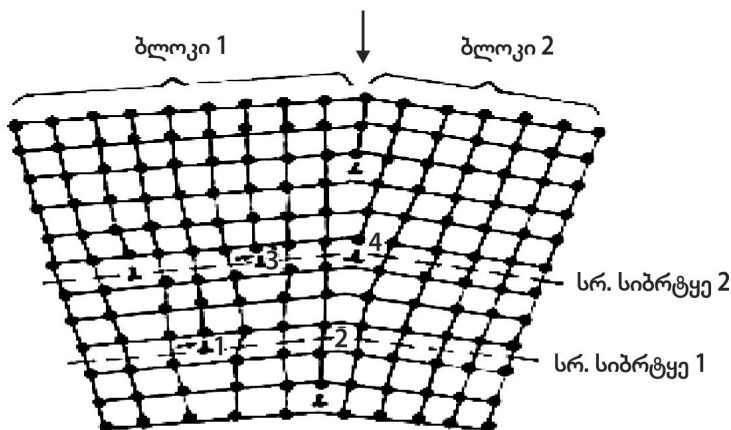
გაერთიანებას ფრანგმენტები ეწოდება. რაც მეტია მარცვლის აღნაგობის საერთო ფრაგმენტაცია, მით მეტია (თითქმის ყოველთვის) ლითონის სიმტკიცე და სიბლანტე – ერთდროულად.

ამრიგად, ლითონებზე მარცვლის ზომის სრული გავლენის შეფასებას ართულებს მარცვლებში არსებული სუბსტრუქტურები. სუბსტრუქტურას შეაქვს დამატებითი ეფექტი ლითონის განმტკიცებაში. მარცვლების საზღვრების მსგავსად, სუბსტრუქტურების სუბსაზღვრებსაც შეუძლია წარმოქმნას („გამოასხივოს“) დისლოკაციები და ამით ხელი შეუწყოს შინაგანი ძაბვების რელაქსაციას. სუბსაზღვრების აღნაგობის (დახრის მცირეკუთხოვანი აღნაგობის) მთავარი ღირსება არის სუბსაზღვრებში შემავალი ყველა დისლოკაციის კოლექტიური სრიალის უნარი და მოძრავი დისლოკაციების მიერ საზღვრების განვლადობა.

სურ. 36. შესაბამისად, ბლოკებს შორის ისრით ნაჩვენები საზღვარი შეესაბამება ერთიმეორეზე ვერტიკალურად გაწყობილი ერთსახელიანი კიდურა დისლოკაციების დაჯგუფებას, რომელიც წარმოქმნის, ე.წ. დისლოკაციურ კედელს. კედლის ორივე მხრიდან ბლოკების ატომური წყობა სიმეტრიულია, რის გამოც, ორივე ბლოკის სრიალის სიბრტყეები, საზღვარზე მცირე მობრუნებით (მოღუნვით), ერთმანეთს აგრძელებენ. ასეთი აღნაგობის საზღვარს დახრის სიმეტრიული სუბსაზღვარი ეწოდება (არსებობს დახრის არასიმეტრიული და გრების სუბსაზღვრებიც).

სუბსაზღვარში შემავალი დისლოკაციები ერთმანეთზე ძლიერ მოქმედებენ. მათი ინდივიდუალური მოძრაობა ბლოკების შიგნით თავისუფალი (იზოლირებული) დისლოკაციების მოძრაობაზე უფრო შეზღუდულია. ბლოკის საზღვრებში, თითქმის სრულყოფილ გისოსში (ბლოკის საზღვრებში გისოსს,

უმთავრესად, იდეალურთან მიახლოებული აღნაგობა აქვს. იგი ირღვევა ვაკანსიებით, ფუძის ლითონის დისლოცირებული ატომებით, უცხო მინარევებით, ერთეული დისლოკაციებით) დისლოკაციის მოძრაობა არის ძვრის ელემენტარული აქტი, მაგრამ საზღვარზე იგი რთულდება.



სურ. 36. დისლოკაციის მოძრაობა ბლოკებს შორის სიმეტრიულად დახრილ საზღვარზე

თუ სრიალის I სიბრტყეზე (ს.ს.I) მოძრავ 1 დისლოკაციას მოძრაობის გზაზე (საზღვარში) არ ხვდება უძრავი დისლოკაცია, მაშინ საზღვართან მიახლოებისას იგი, შედის რა ურთიერთქმედებაში საკუთარი სრიალის სიბრტყის მალა და დაბლა განლაგებულ დისლოკაციებთან, მიიზიდება საზღვარზე და შეჩერდება ბლოკებს შორის მე-2 მდგომარეობაში. მეორე ბლოკში მოძრაობის გასაგრძელებლად (უპირველესად, მისი კედლიდან „ამოსაგდებად“), ხოლო შემდეგ მეზობელ ბლოკში ნაკლებად ხელსაყრელი ორიენტირების სრიალის სიბრტყეების მიერ შექმნილი მოძრაობის წინაღობის დასაძლევად, მას ესაჭიროება დამატებითი მამოძრავებელი გარე ძაბვა. რაც მე-

ტია ბლოკებს შორის განორიენტირების კუთხე, მით დიდი გარე ძაბვებია საჭირო დისლოკაციის მე-2 მდგომარეობიდან მეორე ბლოკში მოძრაობის გასაგრძელებლად.

სხვა სიტუაცია იქმნება მე-3 დისლოკაციის მოძრაობისას. მისი გადაადგილების გზაზე, სრიალის II სიბრტყეში, საზღვარზე, იმყოფება უძრავი დისლოკაცია 4. მე-4 დისლოკაციის მისადგომთან ის, როგორც ერთნიშნისანი დისლოკაცია, შეჩერდება და განიზიდება. შემდეგი დისლოკაციები (სრიალის იმავე სიბრტყეში) მე-4 დისლოკაციასთან მიახლოებისას, შეჩერდებიან მის წინ და იქ დაგროვდებიან. გროვის ირგვლივ წარმოიქმნება დრეკადი ძაბვების ველი, გროვაში არსებული დისლოკაციების რაოდენობის პროპორციული სიდიდისა, რომელიც დააწება მე-4 დისლოკაციას. იგი, დრეკადი ძაბვების ველის კრიტიკული სიდიდის მნიშვნელობის მიაღწევისას, გამოიდევენება ბლოკების საზღვრიდან და მოძრაობას გააგრძელებს მეორე ბლოკში. ე.ი. მოხდება 1 ბლოკიდან მე-2 ბლოკისთვის სრიალის (დეფორმაციის) ესტაფეტური გადაცემა.

ანალოგიური პროცესები ვითარდება განსახილველი ბლოკების სრიალის სხვა სიბრტყეებში და სხვა მეზობელ სუბმარცვლებშიც.

ამრიგად, სუბმარცვლების დეფორმაცია დაკავშირებულია ერთი და იმავე მოძრავი დისლოკაციის ერთი ბლოკიდან მეორეში გადასრიალებასთან. ან მოძრავი დისლოკაციები, სუბსაზღვართან მიახლოებისას, სუბსაზღვრებიდან აძევებენ მოძრაობის გზაზე მყოფ დისლოკაციებს და ისინი მეზობელ ბლოკში იწვევენ სრიალს (ძვრას).

განხილული საზღვრების (დახრის სიმეტრიული საზღვრების) უმნიშვნელოვანესი თვისება არის მათი ძვრადობა. ისინი

ადვილად გადაადგილდებიან საზღვარში (კედელში) არსებული ყველა დისლოკაციის კოლექტიური (კოოპერატიული) სრიალისას. მაგრამ, რაც უფრო რთულია საზღვრის აღნაგობა და მეტია **სუბმარცვლებს** შორის კრისტალური გისოსების განზორიენტირების კუთხე, მით უფრო ძლიერია მოძრავი დისლოკაციის დამუხრუჭება და მით მეტია განმტკიცების სიდიდე.

დახრის არასიმეტრიული და გრების საზღვრების შემთხვევებში, საზღვრებს სრიალი არ შეუძლიათ (მათი შემადგენელი დისლოკაციების სრიალის სიბრტყეების არაპარალელობის გამო), რაც მეტწილად მასალის დეფორმაციისადმი წინაღობას ამაღლებს.

სუბმარცვლების საზღვრები, როგორც დისლოკაციის ბარიერები, მარცვალთშორის საზღვრებთან შედარებით, მნიშვნელოვნად ნაკლებეფექტურია. სუბმარცვლის საზღვარზე გადასვლისას გისოსის ორიენტაცია სუსტად იცვლება. მოსრიალე დისლოკაციით შესაძლოა ცალკეული დისლოკაციის გამოღწევა (ამოგდება) დისლოკაციის კედლიდან (სუბმარცვლების საზღვრებიდან). რაც უფრო დიდია განზორიენტირების კუთხე ორ მეზობელ სუბმარცვალს შორის, მით უფრო ახლოსაა ერთი დისლოკაცია მეორესთან და დისლოკაციები კედელში უფრო ძლიერაა შეზოქილი, შესაბამისად, უფრო ეფექტურია სუბმარცვლების საზღვრების ბარიერული მოქმედება.

ორეულის საზღვარი, ისე როგორც მარცვალთშორისი, საზღვრისგან ორივე მხარეზე სრიალის სიბრტყეების ორიენტაციების სხვაობის გამო, ბარიერს წარმოადგენს დისლოკაციებისათვის. საზღვართან მიახლოებული მოძრავი დისლოკაციის ორიენტაციიდან გამომდინარე, ორეულის საზღვარი დისლოკაციის

მოდრაობას მხოლოდ ცალკეულ შემთხვევებში ეწინააღმდეგება. კერძოდ, წდკ გისოსის ლითონებში ორეულის საზღვარი {111} არ ეწინააღმდეგება საზღვრის პარალელური ბიურგერის ვექტორებიანი დისლოკაციების გავლას.

პრაქტიკულად, მარცვლის ზომების შემცირება ხელს უწყობს დენადობის ზღვრის ამაღლებას. სიმტკიცის ცვლილება ფასდება ჰოლი-პეტჩეს ემპირიული თანაფარდობით მარცვლის ზომებსა და პოლიკრისტალური მასალების დენადობის ზღვარს შორის (დამოკიდებულება სამართლიანია სუბსტრუქტურისა და მეორე ფაზების არმქონე სუფთა ლითონებისათვის ან შენადნობებისათვის). დენადობის ზღვარზე მარცვლის ზომების გავლენა გამოისახება განტოლებით:

$$Re = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (5)$$

სადაც σ_0 არის გისოსის ხახუნის ძაბვა (დისლოკაციის მოძრაობის საწყისი ძაბვა, როდესაც d მიისწრაფის უსასრულობისაკენ - მონოკრისტალისაკენ);

k - კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე რიცხობრივად განსაზღვრავს დისლოკაციის მოძრაობისადმი მოცემული ლითონის მარცვლის საზღვრების წინაღობას (ითვალისწინებს მარცვლის საზღვრების სტრუქტურას, დისლოკაციების დამაგრების ხარისხს და ლეგირებას);

d - მარცვლების საშუალო ზომა.

აუსტენიტური ფოლადებისათვის k - კოეფიციენტის სიდიდე ფერიტ-პერლიტური ფოლადებისაზე, დაახლოებით, 2-ჯერ ნაკლებია. გარდა ამისა, ფერიტული ფუძის ფოლადების ფაზური გადაკრისტალებისას მნიშვნელოვნად მცირე ზომის მარცვლები მიიღება. ფერიტული ფუძის შენადნობების

ფაზური გადაკრისტალების შემდეგ მარცვლების ზომა არის 10 - 30 მკმ, ხოლო აუსტენიტურ ფოლადებში - 70 - 100 მკმ. ამ ფაქტორებიდან გამომდინარე, α -რკინის ფუძის შენადნობებთან შედარებით, აუსტენიტურ ფოლადებში მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცება ნაკლებეფექტურია.

ფერიტის მარცვლების ზომა დამოკიდებულია გამოსავალი აუსტენიტის მარცვლის ზომებსა და კარბონიტრიდული ფაზების არსებობაზე. ეს ფაზები, გახურების პროცესში, კრიტიკული A_{c3} წერტილის გავლისას, ახალი აუსტენიტური მარცვლების ჩანასახებად გვევლინებიან, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი მომატებისას მარცვლების ზრდას ამუხრუჭებენ. გაცივებისას $\gamma \rightarrow \alpha$ გარდაქმნის პროცესში კარბონიტრიდული ფაზები ფერიტის ახალი მარცვლების წარმოქმნის ცენტრებად იქცევიან. ამგვარად, დისპერსული ნაწილაკები ხელს უწყობენ ფერიტის მარცვლების დაწვრილმანებას და დამატებითი წვლილი შეაქვთ მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცებაში. ამასთან, V, Nb, Zr, Ti-ით შენადნობების მიკროლეგიერებისას წარმოქმნილი კარბონიტრიდული დისპერსული ფაზები, ერთდროულად, ხელს უწყობენ როგორც დისპერსიულ, ისე მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცებას.

მარცვლის დაწვრილმანება შეიძლება სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით: ლეგიერებით, თერმული დამუშავებით (თერმოციკლირება), თერმომექანიკური დამუშავებით და თერმომექანიკური დამუშავების ერთ-ერთი ნაირსახეობით - საკონტროლებელი გლინვით. თერმული- და სხვადასხვა სახის თერმომექანიკური დამუშავება განმტკიცებას იწვევს რამდენიმე მექანიზმით ერთდროულად. შესაბამისად, ეს მექანიზმები

მოქმედებენ ერთმანეთზე და შენადნობებს განამტკიცებენ კოლექტიურად.

მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცებას, სხვა მექანიზმებთან შედარებით, გარკვეული უპირატესობა აქვს. მას არ ახლავს გამყიფება. როგორც აღნიშნული იყო, მარცვალთსასაზღვრო განმტკიცების უნიკალური თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ ამ მექანიზმის რეალიზაციისას ერთდროულად მაღლდება ფოლადის სიმტკიცის, პლასტიკურობისა და სიბლანტის მაჩვენებლები. მარცვლის დაწვრილმანებით დაბლდება ბლანტ-მყიფე გადასვლის კრიტიკული ტემპერატურა და მატულობს მყიფე რღვევისადმი წინაღობა.

ფერიტ-პერლიტური ფოლადების განმტკიცებაში ძირითადი მექანიზმების მიერ შენატანი (წილები) პროცენტულად დაახლოებით ასეთია: მარცვალთსასაზღვრო 30-40%, მყარხსნარული 25-40% და დისპერსიული 25-30 %. აღსანიშნავია, რომ ამ მექანიზმების შენატანის ერთმანეთისაგან მკაფიოდ გამოიჯვნა, პრაქტიკულად, შეუძლებელია.

განხილულ თვისებათა ცვლილებების გათვალისწინებით შეიძლება, დავასკვნათ: ფოლადის მარცვლის დაწვრილმანება, სიმტკიცის, სიბლანტისა და ცივმეტეხობისადმი მედეგობის ამაღლებასთან ერთად, ამაღლებს რღვევის სიბლანტესაც. ლითონის პლასტიკური დინება დამოკიდებულია დისლოკაციების საშუალო განარბენზე წყაროდან მარცვლის საზღვრებამდე - დაბლოკვამდე. მარცვლის საზღვრები დისლოკაციებისათვის გადაულახავი წინაღობებია. წვრილმარცვლოვან სტრუქტურაში დისლოკაციების სიმკვრივე მეტია ხოლო განარბენი - ნაკლები (რაც ზრდის ფოლადის სიბლანტეს). მარცვლის საზღვ-

რები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ლითონური მასალის ელექტროგამტარობაზე, ოპტიკურსა და სხვა თვისებებზე.

5.2 მარცვლის დაწვრილმანების გზები

აღნიშნული იყო, რომ ფოლადების მარცვლის დაწვრილმანება, ძირითადად, ლეგირებით, თერმული და დეფორმაციული დამუშავებებით მიიღწევა.

ფოლადის განმტკიცება იზრდება გახსნილი მალეგირებელი ელემენტის კონცენტრაციის ამაღლების და რკინისა და ამ ელემენტის ატომურ რადიუსებს შორის სხვაობის შესაბამისად. ნელა გაცივებული ფერიტის სისალეს ყველაზე ძლიერ Si, Mn, Ni, ანუ ის ელემენტები ამაღლებენ, რომლებსაც Fe_{α} -გან განსხვავებული კრისტალური გისოსი აქვთ. შედარებით სუსტად მოქმედებენ Mo, V და Cr ელემენტები, რომელთა კრისტალური გისოსები Fe_{α} -ს იზომორფულია. შენადნობებში გოგირდის, ფოსფორის, აირული ელემენტების - ჟანგბადის, წყალბადისა და აზოტის შემცველობის შემცირება მეტალურგიული ხერხებით მიიღწევა.

თერმული დამუშავება მარცვლის დაწვრილმანებისა და ციკ-მეტეზობის ამაღლების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მეთოდს წარმოადგენს. ფოლადის სხმულებისთვის, ჩვეულებრივ, იყენებენ ნორმალიზაციას, ხოლო დეფორმირებული ლითონისათვის - თერმულ გაუმჯობესებას. ამ დროს მინიმუმამდე მცირდება გრანულაციური ბადის წარმომქმნელი პირველადი აუსტენიტის მარცვლების საზღვრების კვალი.

ფოლადების სტრუქტურის დაწვრილმანების ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური ხერხი არის მაღალტემპერატურული თერმომექანიკური დამუშავება. იგი აერთიანებს აუსტენიტის პლასტიკურ დეფორმაციასა და დეფორმირებული აუსტენიტის მარტენსიტში გარდაქმნის პროცესებს. მაღალტემპერატურული თერმომექანიკური დამუშავება უზრუნველყოფს ფოლადის მაღალი სიმტკიცის, ამღლებული პლასტიკურობის, სიბლანტისა და რღვევის წინააღობის სასურველ შეხამებას.

ლითონური მასალის სტრუქტურის დეფორმაციული დაწვრილმანება (ფრაგმენტაცია) მდგომარეობს საწყისი მარცვლების მცირეკუთხიანი ან საშუალოკუთხიანი საზღვრებით ურთიერთგანორიენტირებულ უფრო მცირე ზომის არეებად (სუბმარცვლებად) დაყოფაში. ფრაგმენტაცია ფუნდამენტური მოვლენაა. იგი შეინიშნება სხვადასხვა ტიპის კრისტალური გისოსის მქონე კრისტალური მასალების პლასტიკური დეფორმაციების სხვადასხვაგვარ სქემებსა და რეჟიმებში. ამ პროცესის განხორციელების ერთადერთ პირობას წარმოადგენს დეფორმაციის მაღალი ხარისხის მიღწევა. პლასტიკური დეფორმაციისას ფრაგმენტების საშუალო ზომები თანდათან მცირდება, რაღაც მინიმალურ ზომებამდე (100–200 ნმ-მდე). ამის ერთდროულად ხდება მათი დიდკუთხიან საზღვრებამდე ურთიერთგანორიენტირება.

სტრუქტურის დეფორმაციული განმტკიცება არის საფუძველი საკონსტრუქციო მასალების ისეთი განმამტკიცებელი ტექნოლოგიებისა, როგორიცაა გლინვა, ჰიდროექსტრუზია, ადიდვა, ჭედვა და ა.შ. ამჟამად ინტენსიურად ვითარდება დეფორმაციულ განმტკიცებაზე დაფუძნებული სუბმიკრო და ნანოკრისტალური საკონსტრუქციო მასალების მიღების მეთოდები.

ჩვეულებრივ, დეფორმირებადი საწყისი საკონსტრუქციო მასალები პოლიკრისტალურია და მათი მარცვლების ზომა რამდენიმე ათეული მიკრონია. დეფორმაციის განსაზღვრულ პირობებში მარცვლის დაწვრილმანება შეიძლება სუბმიკრო (მარცვლის $D < 1\text{მკმ-ზე}$) ან ნანოკრისტალურ (მარცვლის $D < 100\text{ ნმ-ზე}$) მდგომარეობებამდე და შენადნობის პრინციპულად ახალი ფიზიკური და მექანიკური თვისებების გამოვლენა. დღეისათვის, სხვადასხვა ლითონისა და შენადნობის მასიურ ნიმუშებში ნანოსტრუქტურის მისაღებად აქტიურად გამოიყენება სტრუქტურის დეფორმაციული დაწვრილმანების მეთოდი. მიუხედავად მრავალი კვლევისა, ჯერ კიდევ მოცემული (სასურველი) პარამეტრების სუბმიკრო- და ნანოკრისტალური მასალების მიღება შეუძლებელია.

ფრაგმენტაციის მიზეზების მრავალწლიანი კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ პოლიკრისტალებში ფრაგმენტაციის პირველსაწყისი მიზეზი მძლავრი დრეკადი ძაბვებია, რომელთა წყაროები აღიძვრება მარცვალთშორის საზღვრებსა და მარცვლების შეპირაპირების კვანძებში. არსებითად, ფრაგმენტაცია არის პლასტიკური აკომოდაციის შედეგი, რომლის არაერთგვაროვნება ვლინდება მარცვლის მოცულობაში ფრაგმენტირებული სტრუქტურის სახით. სახელდობრ, შეპირაპირების ან საწყისი საზღვრების მორფოლოგიური თავისებურებების (საფეხურები, მოღუნვები) სიახლოვეს შეინიშნება ახალი საზღვრის ჩასახვა, რომელიც მარცვლის შიგნით ამოიზრდება და მარცვალს ურთიერთგანორიენტიბულ კრისტალურ ელემენტებად ჰყოფს.

ფრაგმენტაციის მამოძრავებელი ძალა, ე.ი. შინაგანი ძაბვის წყაროები (პლასტიკური შეუთავსებლობა) საზღვრებზე გროვ-

დება. მათი წარმოშობის მიზეზი მომიჯნავე მარცვლების საკუთარი პლასტიკური დეფორმაციის ურთიერთგანსხვავებაა. ასეთი შეუთავსებულობის გაჩენა გარდაუვალია, რადგან საწყისი მარცვლები, მათზე მოდებულ მადეფორმირებელ მაკროძაბვის მიმართულებასთან შეფარდებით, სხვადასხვაგვარად არის ორიენტირებული. ამის გამო, ისინი სხვადასხვა დამყოლობას იჩენენ. განორიენტების ზრდასთან ერთად წარმოქმნილ ფრაგმენტებს შორის ზემოთ აღწერილი პროცესი განმეორდება. მათ საზღვრებსა და შეპირაპირების კვანძებზე უკვე ახალი თაობის ფრაგმენტები წარმოიქმნება და ა. შ. ამგვარად, სტრუქტურული ელემენტების შიგნით პლასტიკური დეფორმაციის მიმართ გისოსის ერთგვაროვანი ორიენტაცია არამდგრადია, ფრაგმენტაციის პროცესი კი უწყვეტია.

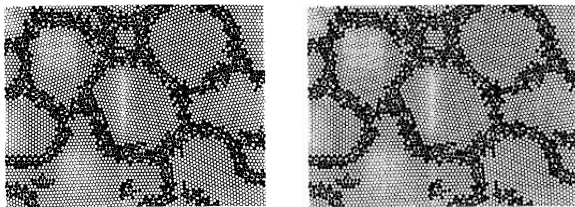
თავი VI

ნანოკრისტალური მასალები

6.1 ნანოკრისტალური მასალების განმტკიცება

ნანოკრისტალური და მსხვილმარცვლოვანი პოლიკრისტალური მასალების განსხვავებული თვისებები დაკავშირებულია მარცვლების სხვადასხვა სიდიდესა და მეტისმეტად განვითარებულ გამყოფ საზღვრებთან. კომპაქტური ნანოკრისტალური მასალების თანამედროვე მკვლევრები მათი თვისებების განსხვავებას მარცვლების საზღვრების სიგრძესა და გამყოფი საზღვრების სპეციფიკურ აღნაგობას უკავშირებენ. აქედან გამომდინარე, კვლევები კომპაქტური ნანოკრისტალური მასალების მიკროსტრუქტურისა მარცვალთშორისი საზღვრების განსაკუთრებული აღნაგობის შესწავლას ემსახურება.

კომპაქტირებული ნანოკრისტალური მასალები, უმარტივეს შემთხვევაში, სტრუქტურულად განსხვავებულ ორ კომპონენტს შეიცავენ: 5 – 20 ნმ ზომის მოწესრიგებულ მარცვლებს და 1,0 ნმ-მდე სიგანის მარცვალთშორის საზღვრებს (სურ. 37). შესაბამისად, ყველა კრისტალს ერთნაირი სტრუქტურა აქვს და ერთმანეთისგან მხოლოდ ზომებითა და კრისტალოგრაფიული ორიენტაციებით განსხვავდებიან.



სურ. 37. ნანოკრისტალური მასალის ატომური სტრუქტურის ორგანო-ზომილებიანი მოდელი

მეზობელი მარცვლების სხვადასხვა ორიენტაცია მარცვლის საზღვრებში ნივთიერების სიმკვრივეს რამდენადმე ამცირებს. გარდა ამისა, გამყოფი საზღვრების ატომების უახლოესი გარემოცვა განსხვავებულია მარცვლის შემადგენელი ატომების გარემოცვისგან. დასაწყისში, მარცვალთშორისი ნივთიერების სტრუქტურაზე, ე.წ. აირისებრი სტრუქტურის მოდელი (ატომების ნებისმიერი განლაგება, ახლო და შორი წყობის არარსებობა) არსებობდა. დღეისათვის იგი უარყოფილია და მის ალტერნატივად ითვლება ამჟღავნებული ენერგიების მქონე გამყოფი არაწონასწორული ზედაპირები. ეს ზედაპირები უშუალოდ გამყოფ საზღვარში შედგენილია დისლოკაციებისგან და სამმაგი შეპირაპირების ადგილებში – დისკლინაციებისგან.

დადგენილია, რომ ნანომასალების გამყოფი საზღვრების სტრუქტურა ახლოსაა ჩვეულებრივი პოლიკრისტალური მასალის მარცვალთსაზღვრო ზედაპირების სტრუქტურასთან და ნანომასალებში გამყოფი საზღვრების სიგანე 0,4 - 1,0 ნმ-მდე ცვალებადობს.

როგორც აღვნიშნეთ, მარცვლების ზომების შემცირება ამჟღავნებს ლითონური მასალების სიმტკიცეს. დამოკიდებულება მარცვლის ზომებსა და პოლიკრისტალური მასალების დენადობის ზღვარს შორის განისაზღვრება ჰოლი პეტჩის მე-5 განტოლებით. დადგენილია, რომ ნანომასალებში ეს წესი განსაზღვრულ ზღვრებში მოქმედებს. მაგ., Fe-Si-B, Fe-Co-Si-B, Fe-Cu-Nb-Si-B და Pd-Cu-Si ამორფული შენადნობების კრისტალიზაციით ნანოკრისტალურ შენადნობებში ნაწილაკების d ზომის 30 - 35-დან 10 ნმ-მდე შემცირებისას დენადობის ზღვარი მაღლდება, ხოლო d -ს (შემდეგი) შემცირებისას - დაბლდება.

ულტრადისპერსული ნანოფაზური ლითონებისა და შენადნობების სიმტკიცის ამაღლების მექანიზმი, ხარისხობრივად, ეთანხმება ჰოლი პეტჩეს დამოკიდებულებას, მაგრამ განსხვავებული ბუნება აქვს. მარცვლების ასეთი მცირე ზომებისას დისლოკაციების გენერირება ფრანკ-რიდის ჩვეულებრივი მექანიზმით გამოირიცხება, დეფორმაცია კი სხვა მექანიზმით ხდება.

ნანოსტრუქტურული მასალები (რომლებსაც მეტად განვითარებული გამყოფი ზედაპირები აქვთ), სასაზღვრო პროცესების ინტენსიურობის შედეგად, არამხოლოდ მაღალი სიმტკიცით, არამედ მნიშვნელოვანი პლასტიკურობითაც ხასიათდებიან. მარცვლების არაწონასწორული საზღვრები შეიცავენ მრავალ დისლოკაციას და, შესაბამისად, დისლოკაციის მაღალი სიმკვრივით ხასიათდებიან. ამასთან, მარცვლების სამმაგ კვანძებში (შეპირაპირებებში) არაკომპენსირებული დისკლინაციების სიმრავლეა. ანუ მარცვლის შიგნით, კვანძებთან შედარებით, დისკლინაციების სიმკვრივე მნიშვნელოვნად დაბალია. მარცვლის საზღვრებისა და სამმაგი კვანძების სიახლოვეს კონცენტრირდება ძაბვების ველები და ნანომასალებში მარცვლების საზღვრების მაღალი ჭარბი ენერგიები წარმოიქმნება.

ნანოკრისტალური მასალების თვისებების ანალიზისას გამოიყენება შეპირაპირების დისკლინაციის გახლეჩვის (სამმაგი შეპირაპირების ლოკალური ამორფიზაციის) მოდელი. შეპირაპირების დისკლინაციები ორ როლს ასრულებენ: მცირე პლასტიკური დეფორმაციებისას ადაბლებენ პლასტიკურობას, დიდი დეფორმაციებისას კი ამაღლებენ. ლოკალური ამორფიზაცია წარმოადგენს მარცვალთშორისი საზღვრების სამმაგ შეპირაპირებებზე მიკრობზარების ჩასახვის ალტერნატივას.

სამმაგ შეპირაპირებებზე დისკლინაციების გახლეჩვას, კრისტალურზე უფრო მეტად, ამორფული ფაზის მოუწესრიგებელი სტრუქტურით განპირობებული ჭარბი ენერგია ამუხრუჭებს.

პლასტიკური დეფორმაციის მაღალი ხარისხისას შეპირაპირების დისკლინაციები სამმაგი შეპირაპირებების ლოკალურ ამორფიზაციას იწვევენ. ლოკალურად ამორფიზებული შეპირაპირების არე ეწინააღმდეგება მიკრობზარის ჩასახვას (ამ არეში), რითაც ხელს უწყობს პლასტიკურობის ამაღლებას. მაგალითად, ნანოსტრუქტურული Cu/Nb კომპოზიტების სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე არის 2 გპა, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება—10%. ამგვარად, ნანოსტრუქტურულ მასალებზე გადასვლით შესაძლებელია ფარდობა სიმტკიცე/პლასტიკურობა თანამედროვე საკონსტრუქციო მასალებზე მნიშვნელოვნად უკეთესი გახდეს. თანამედროვე საკონსტრუქციო მასალების სიმტკიცის ამაღლება, ჩვეულებრივ, პლასტიკურობის დადაბლებას იწვევს, რითაც მათი გამოყენება იზღუდება.

ნანოკომპოზიტების კვლევების მონაცემები აჩვენებენ, რომ სტრუქტურული ელემენტების ზომების შემცირება მაღალი სიმტკიცის მაღალ პლასტიკურობასთან შეხამებული, ახალი ტიპის მასალების შექმნის შესაძლებლობას იძლევა. ამასთან, ნანოზომის ნაწილაკების კომპაქტირებით მიღებული ნანოფაზური მასალები მარცვლის ზომების დიდი სტაბილურობით ხასიათდებიან.

თერმულ დამუშავებასთან შეხამებული ნადნობის სწრაფი წრთობის მეთოდი საშუალებას იძლევა მაღალი დონის მექანიკური სიმტკიცის, კარგი მაგნიტური თვისებებისა და ამაღლებული კოროზიული მედეგობის არაკრისტალური

მასალები იყოს მიღებული. ლეგირების ეფექტური შერჩევა მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ამ დროს ფორმირებული შერეული ნანოსტრუქტურის ტიპს. იგი შედგება ამორფულ მატრიცაში განაწილებული დისპერსული ნაწილაკებისაგან და მიიღება უშუალოდ ნადნობის სწრაფი წრთობისას ან ამორფული შენადნობის კრისტალიზაციისას.

ნანოსტრუქტურის ფორმირების ხელშემწყობი მალეგირებელი ელემენტების დამახასიათებელი თავისებურებებია:

1. დნობის მაღალი ტემპერატურა;
2. ატომის დიდი ზომა ან შენადნობის კომპონენტების ატომების ზომების დიდი ფარდობა;
3. ძირითად კომპონენტთან დიდი უარყოფითი შერევის სიძლიერე;
4. ნულთან მიახლოებული ზღვრული ხსნადობა შენადნობის ძირითად კომპონენტში.

კონსტრუქციული და ფუნქციური მასალების უნიკალური სტრუქტურების სინთეზის ახალი შესაძლებლობების გამოსავლენად საჭიროა კრისტალური ფაზების ჩასახვისა და ზრდის პროცესების შესწავლა, ასევე ცოდნა ლეგირების გავლენისა ნანოკრისტალური სტრუქტურების ფორმირებაზე. მიკროსტრუქტურის ნანოსტრუქტურული დისპერსულობის დონემდე ცვლილებისას მნიშვნელოვნად იცვლება მასალის ფიზიკური თვისებები.

ასეთი უნიკალური თვისებების რეალიზაციისათვის საკონსტრუქციო და ფუნქციური მასალებიდან დამზადებულ ნაკეთობებში განმსაზღვრელი მნიშვნელობა ენიჭება ნაკეთობის

ნანოკრისტალური სტრუქტურის სტაბილურობის შენარჩუნებას დამზადებისა და ექსპლუატაციის ტექნოლოგიური ოპერაციებისას.

კომპაქტირებული ნანოკრისტალური Pd-ის ($d=5 - 15$ ნმ) და Cu-ის ($d=25 - 50$ ნმ) ნიმუშების ძაბვა-დეფორმაციის დამოკიდებულების შესწავლისას ნაჩვენებია, რომ ნანოკრისტალური მასალების დენადობის ზღვარი 2–3-ჯერ აღემატება მსხვილმარცვლოვანი მასალების დენადობის ზღვარს.

ზოგადად, ნანოკრისტალური ლითონების სიმტკიცე გაჭიმვაზე 1,5–8-ჯერ უფრო მაღალია მსხვილმარცვლოვანზე. ამის მთავარ მიზეზად ითვლება მცირე ზომების მარცვლებით დისლოკაციების წარმოქმნა და მოძრაობის შეფერხება, ასევე შორმოქმედი დრეკადი ძაბვების ველების არსებობა. პლასტიკური დეფორმაციის ზემოთ განხილული მოდელით, პლასტიკური დეფორმაცია ნანომასალებში განპირობებულია დისკლინაციების მოძრაობით, რომელთა ენერგია 10 000-ჯერ მეტია დისლოკაციის ენერგიაზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ სიმტკიცის მახასიათებლების ცვლილება მასალების ნანოკრისტალურ მდგომარეობაში გადასვლისას ჯერ კიდევ სიღრმისეულ შესწავლას ითხოვს.

6.2 თანამედროვე ნანოტექნოლოგიების მიმართულებები და მიღწევები

ნანოტექნოლოგიების შემუშავება და მათი პრაქტიკაში დანერგვა არის თანამედროვე მსოფლიო ტექნოლოგიური პროგრესის ძირითადი მიმართულება. ახლანდელი მომენტის

თავისებურება მდგომარეობს ნანოტექნოლოგიების კვლევის სფეროდან ტექნოლოგიურ ბაზარზე გასვლაში. დღეისათვის იგი ბაზრის ყველაზე დინამიკურად განვითარებადი სეგმენტია. ნანოტექნოლოგიების განვითარებასა და მათ ბაზაზე მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლების ახალი მასალების შემუშავებაზე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ელექტრონიკის, მედიცინის, მასალათმცოდნეობის, მანქანათმშენებლობის, კოსმოსურისა და მრავალი სხვა დარგის პროგრესი.

ლითონების ფუძეზე საკონსტრუქციო ნანომასალების შესაქმნელად კვლევები და დამუშავებები (მაგ., ფოლადების, შენადნობების, კერამიკისა, თუ სხვათა) მსოფლიოს ყველა განვითარებულ ქვეყანაში მეცნიერების განვითარების პრიორიტეტული მიმართულებებია (აქვე შევნიშნავთ, რომ ნაშრომში მხოლოდ არაორგანული ნანომასალებია განხილული).

საკონსტრუქციო მასალები, როგორც წესი, იწარმოება სამრეწველო მასშტაბებით. თანამედროვე მსოფლიო პრაქტიკით შენადნობებისა და ფოლადების წილი საკონსტრუქციო მასალების საერთო მოცულობაში 90%-ს აღემატება. ამდენად, ბუნებრივია მოთხოვნა რკინის შენადნობების ფიზიკურ-მექანიკური კომპლექსის ამაღლების ახალი ტექნოლოგიების შექმნაზე.

უკანასკნელ წლებში მსოფლიო მეცნიერებაში ჩამოყალიბდა საკონსტრუქციო მასალების შემუშავებისა და შენადნობების თვისებების ამაღლების ახალი მიმართულებები - მოცულობითნანოსტრუქტურირებული, ულტრაწვრილმარცვლოვანი და ნანოკრისტალური. მიღწეული შედეგები (შეჯერებული მონაცემებით) მრავლისმთქმელი და, ალბათ, არაზღვრულია.

ტრადიციულ მასალებთან შედარებით ნანომეტრული მასალების სისაღე იზრდება 2 - 7-ჯერ, სიმტკიცის ზღვარი 1,5 - 8-ჯერ, ხოლო დენადობის ზღვარი 2 - 3-ჯერ. ამასთან, ვლინდება ეფექტები ნანომეტრულ ლითონებში—ზეპლასტიკურობისა და კერამიკებში - პლასტიკურობისა და ა.შ. დღეისათვის ჯერ კიდევ დასადგენია მათი თვისებების ზღვრული შესაძლებლობები. მეცნიერთა პროგნოზით, აღნიშნული მიმართულებებით, სამომავლო კვლევების შედეგად, დამუშავდება ხარისხობრივი და რაოდენობრივი თვალსაზრისით კარდინალურად გაუმჯობესებული თვისებების მქონე ახალი კლასის მასალები.

თანამედროვე მასალათმცოდნეობის აქტუალურ მიმართულებებს შორის მთავარია მოცულობა - ნანოსტრუქტურირებული მასალების შემუშავება. ნანოსტრუქტურირებულ მასალებში ხშირად იცვლება ფუნდამენტური, ჩვეულებრივ, სტრუქტურულად არამგრძნობიარე მახასიათებლები: დრეკადობის მოდულები, კიურისა და დებაის ტემპერატურები, დამაგნიტებულობის გაჯერება და სხვ. ყოველივე ეს არსებული მასალების გაუმჯობესებისა და პრინციპულად ახალი საკონსტრუქციო და ფუნქციური მასალების შექმნის პერსპექტივას ქმნის. ლითონების ფუძეზე შემუშავებული ნანოსტრუქტურირების მეთოდები:

1. ნანოფხვნილების კომპაქტირება;
2. ამორფული შენადნობების კრისტალიზაცია;
3. პლასტიკური დეფორმაცია;
4. სადებზე (მათ შორის დეტალების ზედაპირზე) დალექვა.

განვიხილოთ ლითონური ფუძის მოცულობა ნანოსტრუქტურირებული შენადნობების და ამაღლებული სიმტკიცის საკონსტრუქციო მასალების ინტენსიური პლასტიკური დეფორმაციის მეთოდით მიღების პროცესი. იგი წარმოადგენს უფრო ლითონებისა და შენადნობების 100 ნმ-მდე ზომის მარცვლების მიღების მეთოდს. ამ დროს დიდი პლასტიკური დეფორმირების შედეგად ფორმირდება ძალიან ფრაგმენტირებული და განორიენტირებული სტრუქტურა, რომელიც დეფორმაციის შემდეგ ინარჩუნებს რეკრისტალიზებული ამორფული მდგომარეობის ნიშნებს. ე.ი. რეკრისტალიზაციის ტემპერატურაზე დაბლა დეფორმირების შედეგად ლითონში ნარჩენი დეფორმაციის მაღალი დონე რჩება. მეცნიერების შეფასებით, საკონსტრუქციო მასალების სამრეწველო მასშტაბით ნანოსტრუქტურირებისათვის ყველაზე დინამიკურად განვითარებადი და პერსპექტიული არის ინტენსიური პლასტიკური დეფორმაციის მეთოდი. ამავე დროს, იგი ყველაზე უფრო უნივერსალურია და გამოიყენება პრაქტიკულად ყველა ლითონისა და მათ ფუძეებზე შემუშავებული შენადნობებისათვის.

ინტენსიური პლასტიკური დეფორმაციის ტექნოლოგია წარმატებით გამოიყენება თანამედროვე წარმოებაში Al, Ti, Cu-ის ფუძის შენადნობებისა, ასევე დაბალნახშირბადიანი და უჟანგავი ფოლადებისათვის. ამ მასალებიდან კი მიიღება მაღალი საკონსტრუქციო სიმტკიცისა და ტექნოლოგიური პლასტიკურობის, გამძლეობის ამაღლებული ზღვრის, მაღალი ელექტროგამტარობის, კოროზიული მედეგობის და სხვა სპეციალური თვისებების მქონე ნამზადები და ნაკეთობები - ფურცლები, წნელები, მავთულები.

ინტენსიური კვლევებია მიმართული ლითონებისა და შენადნობების მოცულობანაოსტრუქტურირების ისეთი ახალი მეტალურგიული მეთოდებისა და ტექნოლოგიების დასამუშავებლად, როგორიცაა:

1. არადენდრიტული ანუ მიმართული კრისტალიზაცია;
2. იშვიათ მიწათა და/ან გარდამავალი ელემენტების მცირე დანამატებით ლეგირება - მოდიფიცირება;
3. მასალებში ამორფული და შერეული ანუ ამორფულ-კრისტალური სტრუქტურის შექმნა;
4. ინტენსიური პლასტიკური დეფორმაციით ლითონების, შენადნობების და კერამიკული მარტივი მასალების ნანოფხვნილების კონსოლიდაცია.

ერთ-ერთი ახალი მიმართულება თანამედროვე მეტალურგიაში არის Al და Mg-ის შენადნობების არადენდრიტული კრისტალიზაცია. არადენდრიტული კრისტალიზაციის რეალიზაციისათვის იყენებენ თხევად აბაზანებში კავიტაციური დამუშავების მეთოდს. იგი ქმნის პირობებს, უწყვეტი ჩამოსხმით მიღებულ იქნეს: მცირე, საშუალო და დიდი კვეთის სხმულები. განვითარებული კავიტაციის რეჟიმში ჩანასახების წარმოქმნის გააქტიურების უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს ნადნობის ნაკადის ულტრაბგერით დამუშავება. ამ დროს არადენდრიტული კრისტალიზაციის ჭარბი ცენტრების შესაქმნელად ნადნობის ნაკადში შეაქვთ ჩანასახწარმომქმნელი მოდიფიკატორიანი ლიგატურის წნელი.

პრაქტიკამ აჩვენა, რომ სხმულების არადენდრიტული სტრუქტურა და ამალელებული პლასტიკურობა არა მხოლოდ აადვი-

ლებს ცხელი პლასტიკური დეფორმაციის პროცესს, არამედ დაწვრილმანებულ სტრუქტურასა და პლასტიკურობას ნამზადი ინარჩუნებს მემკვიდრეობით.

რეგლამენტირებული სტრუქტურის მიღების სხვა მიმართულებას წარმოადგენს იშვიათმიწათა და/ან გარდამავალი ელემენტების მცირე დანამატებით ლეგირება - მოდიფიცირება. ნანოფხვნილების ან ნანოსტრუქტურირებულზედაპირიანი ლიგატურის ნადნობში მცირე რაოდენობით შეტანა ასტიმულირებს არადენდრიტულ კრისტალიზაციასა და ნანოსტრუქტურის წარმოქმნას.

ღია პუბლიკაციების (არადაწვრილებითი) მონაცემებით, უკვე დამუშავებულია ალუმინის შენადნობების თერმული დამუშავების ახალი მიდგომები, ასევე ბუნებრივი დამკველების რეჟიმები. ისინი სიმტკიცესა და პლასტიკურობას შორის თანაფარდობის, აგრეთვე კოროზიული მედეგობის ოპტიმიზაციის საშუალებას იძლევა. ეს მეთოდები სამეცნიერო წრეებში ცნობილია, როგორც მობრუნებისა და განმეორებით დამკველების - RRA (Retrosgression and Re-Aging) - მეთოდი.

ამერიკელი და რუსი მეცნიერების მიერ ერთობლივად დამუშავდა ნანოსტრუქტურირებული საავიაციო ალუმინის შენადნობის (7075) მიღების ტექნოლოგია. RRA-სა და ინტენსიური პლასტიკური დეფორმაციის მეთოდების გააერთიანებით მიღწეულია ფოლადის მახასიათებლებთან მიახლოებული სიმტკიცე 1 გიგა პასკალი და 5%-იანი ფარდობითი წაგრძელება.

ელექტროტექნიკისათვის უდიდესი მნიშვნელობა აქვს ნანოსტრუქტურული სპილენძის შენადნობებს. დამუშავებულია ბიმეტალური ფოლად-სპილენძის მავთულის დამზადების

ტექნოლოგია. მავთულის გული არის 1370 მპა-მდე სიმტკიცის ულტრაწვრილდისპერსული დაბალნახშირბადიანი ფოლადი.

ინტენსიურად მიმდინარეობს ტიტანისა და მისი შენადნობების ნანოსტრუქტურირების კვლევა. ასეთი მასალები მეტად მნიშვნელოვანია ტექნიკის მრავალი დარგისა და ადამიანის ყოფისათვის. თანამედროვე ქირურგიასა და სტომატოლოგიას მაღალი ქიმიური ინერტულობისა და სიმტკიცის ლითონები და შენადნობები ესაჭიროება. მათ საგანგებო მნიშვნელობა აქვთ სამედიცინო იმპლანტანტების, პროთეზების, ინსტრუმენტებისა და სხვათა დასამზადებლად. ფართო გამოყენებას პოულობს სამრეწველო ტექნოლოგიებით ნანოსტრუქტურირებული ტიტანის შენადნობები ენერგეტიკაში აირტურბინების, ძრავების, ხანმედეგი და დაღლილობის მაღალი წინაღობის ფრთების დასამზადებლად. ასევე საავიაციო, კოსმოსური და გემთმშენებელი მრეწველობისათვის სამაგრი ნაკეთობების დასამზადებლად და სხვ.

თანამედროვე მასალათმცოდნეობის შედარებით ახალი მიმართულებაა ლითონურ შენადნობებში ამორფული და ამორფულ-კრისტალური სტრუქტურის შექმნა. ასეთი ტიპის სტრუქტურის შენადნობებს მრავალი ღირებული საექსპლოატაციო თვისება გააჩნია, მაგ., მაღალი სისალე, სიმტკიცე, ცვეთა- და კოროზიამდეგობა. ამორფული მაგნიტური ნანომასალები, სიმტკიცის მაღალ მაჩვენებლებთან ერთად, კოერციტიული ძალისა და მაგნიტური წინაღობის ამაღლების უნარსა და სუპერმაგნეტიზმის ეფექტს ავლენენ.

ჩატარებული კვლევებით (ძირითადად იაპონიაში) ნაჩვენებია, რომ შენადნობების შედგენილობების კრისტალიზაციისას, მა-

თი გაცივების სიჩქარისა და თერმული დამუშავების სხვადასხვაგვარი რეჟიმების ვარიაციით შესაძლებელია განსაზღვრულ შენადნობებში შერეული სტრუქტურების მიღება (მაგ., ამორფული+კრისტალური, კრისტალური+კვაზიკრისტალური).

ნანოკვაზიკრისტალები მეკუთვნება მასალების სრულიად ახალ კლასს. ისინი ხასიათდებიან ფანტასტიკური თვისებებით. აღსანიშნავია, რომ ალუმინის შენადნობებში ამორფული ან ამორფულ-კრისტალური სტრუქტურის სიმტკიცისა და სისალის მაღალი მნიშვნელობები მიღებულია მხოლოდ 20–900 მკმ-ის სისქის ლენტის ან ფირფიტის სახის ნიმუშებზე. ამდენად, მათი სამრეწველო წარმოებაში გამოყენების პერსპექტივა ჯერ საკმაოდ შეზღუდულია.

ნანომასალების მიღების ფართო შესაძლებლობებს იძლევა ფხვნილთა მეტალურგიის მრავალსახეობა. დისპერსული ნაწილაკების შემჭიდროებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ისეთი პარამეტრები, როგორიცაა: ნაწილაკების საშუალო ზომა, მინარევების შედგენილობა, ზედაპირის მდგომარეობა, ნაწილაკების ფორმა და დაწნეხის მეთოდი. სამრეწველო წარმოებისათვის განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს ნანოფხვნილოვანი შენადნობები. ისინი ხასიათდებიან მაღალი ცვეთამდედეგობით და კარგი ტრიბოლოგიური თვისებებით. მათ განვითარების საუკეთესო პერსპექტივა აქვთ. ამჟამად ნანოფხვნილების წარმოება 15%-ით აღემატება სხვა ნანოსტრუქტურული კომპოზიციური მასალების წლიურ წარმოებას.

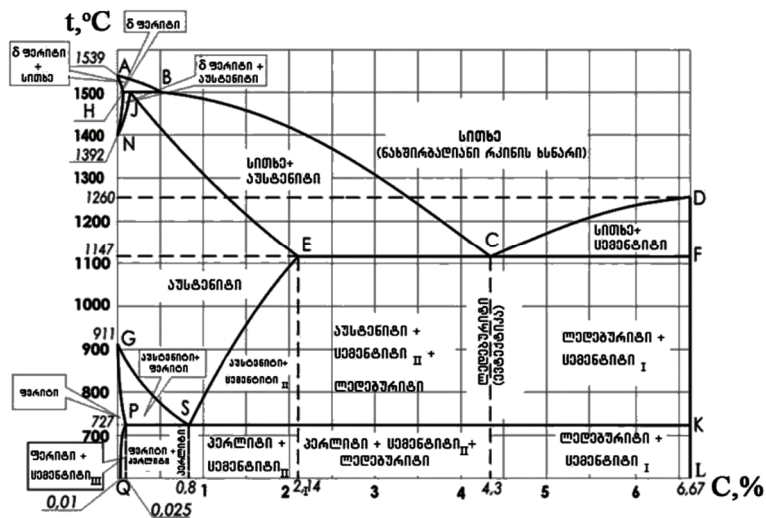
ცხრილი: ძირითადი მექანიკური თვისებების აღნიშვნები დადგენილი რუსული და საერთაშორისო სტანდარტებით

თვისება	აღნიშვნა		განსაზღვრება
	რუსულ	საერთაშორისო	
დრეკადობის მოდული	E	E	დრეკადი დეფორმაციის ზღვრებში ძაბვის ნაზრდის შესაბამისი წაგრძელების ნაზრდთან ფარდობა
დენადობის ფიზიკური ზღვარი	σ_T	Re	ძაბვის სიდიდე, რომლის დროსაც—მუდმივი დატვირთვისას—მასალა იცვლის თავის სიგრძეს
დენადობის პირობითი ზღვარი	$\sigma_{0,2}$	$R_{p^{0,2}}$	ძაბვის სიდიდე დენადობის ბაქანის არმქონე მასალისათვის, რომლის დროსაც ნარჩენი წაგრძელება პირველსაწყისი სიგრძის 0,2%-ს შეადგენს
დროებითი წინაღობა, ანუ სიმტკიის ზღვარი	σ_B	R_m	ნიმუშის რღვევისწინა უდიდესი დატვირთვის შესაბამისი ძაბვა
ფარდობითი წაგრძელება	δ	A_5, A_{10}	რღვევის შემდეგ საანგარიშო სიგრძის ნაზრდის ფარდობა საწყის საანგარიშო სიგრძესთან პროცენტებში
ფარდობითი შევიწროება	ψ	Z	პირველსაწყისი განივკვეთის ფართობისა და რღვევის შემდეგ ნიმუშის მინიმალური განივკვეთის ფართობის სხვაობის ფარდობა პირველსაწყის ფართობთან

დანართი 1 (გაგრძელება)

ცოცვადობის ზღვარი წაგრძელებაზე	$\sigma_{0,2/100}^{700}$	$R_{0,2/100}^{700}$	მაგალითი: ძაბვა, რომელიც იწვევს 0,2 % დეფორმაციას 100 სთ-ში, 700 °C ტემპერატურაზე
ხანგრძლივი სიმ-ტკიცის ზღვარი	σ_{1000}^{700}	R_{1000}^{700}	მაგალითი: 1000 სთ-ში, მუდმივ 700 °C ტემპერატურაზე ლითონის რღვევის გამომწვევი ძაბვის სიდიდე
გამძლეობის ზღვარი	σ_R	σ_R, τ_R	მაქსიმალური ძაბვა, რომელსაც დაურღვევლად უძლებს მასალა საკმაოდ მრავალ ⁹ (გარკვეული რიცხის) ნიშანცვლადი დატვირთვისას
სისაღე ბრინელის მიხედვით	HB	HB	გამოსაცდელ მასალაში ჩაწნეული ფოლადის ბურთულას დატვირთვის ფარდობა ლითონში აღბეჭდილი სფერული ფოსოს ზედაპირის ფართობთან
დარტყმის მუშაობა	KT, KU, KV	KT, KU, KV	ნიმუშის დარღვევაზე დახარჯული მუშაობა
დარტყმითი სიბლანტე	KCT, KCU, KCV	KCT, KCU, KCV	დარტყმის მუშაობის სიდიდის ფარდობა, ნიმუშის კონცენტრატორის (T, U, V ფორმის ჩანაჭრების) ადგილზე, განიკვეთის ფართობთან

Fe-Fe₃C მდგომარეობის დიაგრამა



დიაგრამის ხაზი	სტრუქტურული გარდაქმნები	კრიტიკული წერტილის აღნიშვნა	
		გახურებისას	გაცივებისას
PSK	აუსტენიტ- პერლიტური	Ac_1	Ar_1
GS	აუსტენიტურ- ფერიტული	Ac_3	Ar_3
SE	ცემენტიტის გამოყოფა აუსტე- ნიტიდან ან მისი გახსნა	Ac_m	Ar_m

შენიშვნა: A არის ფრანგული სიტყვის პირველი ასო - arret -
გაჩერება;

c – ფრანგული სიტყვის პირველი ასო - chauffage - გახურება;

r – ფრანგული სიტყვის პირველი ასო - refroidissement-გაცივება.

ტერმინთა განმარტებები

აკომოდაცია - შეგუება, შეწყობა, მიმარჯვება (გარემოს შეეგუა / შეეწყობა).

ალოტროპია - ზოგიერთი ელემენტის ორი ან რამდენიმე კრისტალური ფორმით არსებობის უნარი გარე პირობების (ტემპერატურის, წნევის) ცვლილებისას.

ანიზოტროპია - მყარ სხეულში თვისებათა სიდიდის დამოკიდებულება მიმართულებასზე.

ანიჰილაცია - სიტყვასიტყვით ნიშნავს „განადგურებას“, „გაქრობას“.

ატმოსფერო/კოტრელის - მყარ ხსნარში მინარევი ჩანერგვის ატომების საშუალოსთან შედარებით გაზრდილი კონცენტრაციის არე დისლოკაციის ხაზის ირგვლივ.

ატმოსფერო / სწუკის - მინარევი ჩანერგვის ატომების მოწესრიგებული განლაგების არე დისლოკაციის ხაზის ირგვლივ.

ატმოსფერო / სუბუკის - საშუალოსთან შედარებით შეცვლილი კონცენტრაცია წყობის დეფექტში მინარევი ჩანერგვის ან ჩანაცვლების ატომების მყარ ხსნარებში.

ბირთვი / დისლოკაციის - მილაკის მსგავსი არე (დისლოკაციის ღერძის მახლობელი არე) დისლოკაციის ღერძის ირგვლივ, ღერძიდან 3-4 ატომთშორისი მანძილით დაშორებული.

გისოსი / კრისტალური - სივრცული ბადე, რომლის კვანძებშიც კრისტალური გისოსის ელემენტების პირობითი ცენტრებია განთავსებული.

დინება / ლამინარული (ლათ. lamina - ფირფიტა) - მოწესრიგებული დინება (როდესაც ნივთიერება დინების პარალელურად, თითქოს შრეობრივად გადაადგილდება).

დინება / ტურბულენტური (ლათ. turbulentus - უწესრიგო) - მოუწესრიგებელი (ბოზოქარი) დინება.

დისლოკაცია - 1. კრისტალური მესრის ხაზობრივი დეფექტი. იგი არღვევს ატომური სიბრტყეების სწორ მონაცვლეობას და არის კრისტალის შიგნით ძვრის ზონის საზღვარი, რომლის გასწვრივ და მახლობლად რეგულარული კრისტალებისათვის დამახასიათებელი ატომების წესიერი განლაგება დარღვეულია. 2. ხაზობრივი დეფექტი, რომლის ირგვლივ ბიურგერის კონტური შეუკვრელია (ჩაუკეტავია).

დისლოკაცია / გაჭიმული - ორ ნაწილობრივ დისლოკაციად გახლეჩილი სრული დისლოკაცია, შეერთებული წყობის დეფექტით.

დისლოკაცია / დამაგრებული - მალეგირებული ელემენტების (ლეგირებისას გახსნილი) ატომებისა და დისლოკაციის უშუალო ურთიერთქმედებით გამოწვეული დისლოკაციის ბლოკირება (გახსნილი ატომები უძრავ დისლოკაციებზეა თავმოყრილი).

დისლოკაცია / კიდური - 1. დისლოკაცია, რომლის ბიურგერის ვექტორი დისლოკაციის ღერძის (ხაზის) პერპენდიკულარულია. 2. გისოსის დრეკადი არასრულყოფილების არე, ექსტრასიბრტყის ნაპირის (კიდის) ირგვლივ, რომელიც დისლოკაციის ხაზს/ბირთვს წარმოადგენს.

დისლოკაცია / ლომერ-კოტრელის - სამი ნაწილობრივი დისლოკაციისა და წყობის სოლისებრი დეფექტის ერთობლიობა.

დისლოკაცია / მარცვალთსასაზღვრო - კიდური დისლოკაცია, რომელიც მდებარეობს ერთ მარცვალში და მის საზღვარზე მთავრდება. იგი იწვევს თანამთხვევადი კვანძების გისოსის პარამეტრების ცვლილებას.

დისლოკაცია / მოსრიალე - დისლოკაცია, რომელიც სრიალის სიბრტყეში გადაადგილდება (დისლოკაცია, რომელიც თავისი ბიურგერის ვექტორით ერთ სიბრტყეში მდებარეობს).

დისლოკაცია / მოძრაობა - დისლოკაცია, რომელიც კრისტალში გადაადგილდება და იწვევს პლასტიკურ დეფორმაციას.

დისლოკაცია / მრავალჯერადი - დისლოკაცია რომელშიც $|\vec{b}| = n \cdot a$, სადაც n ერთისგან განსხვავებული მთელი რიცხვია.

დისლოკაცია / მჯდომარე - ნაწილობრივი დისლოკაცია, რომლის ბიურგერის ვექტორი დისლოკაციის ხაზის პერპენდიკულარულია.

დისლოკაცია / ნაწილობრივი - დისლოკაცია, რომლის ბიურგერის ვექტორი იგივეობრივი ტრანსლაციის ვექტორს არ წარმოადგენს (ბიურგერის ვექტორი არ არის კრისტალური გისოსის პერიოდის ტოლი, $|\vec{b}| < a$). ასეთი დისლოკაცია წყობის დეფექტის საზღვარია.

დისლოკაცია / პრიზმული - კიდური დისლოკაცია, რომლის დისლოკაციის ხაზი არის ბრტყელი ჩაკეტილი მრუდი (მარყუჟი, მრავალკუთხედი და ა. შ., რომელიც მისსავე ბიურგერის ვექტორის სიბრტყეში არ მდებარეობს).

დისლოკაცია / სრული - დისლოკაცია, რომლის ბიურგერის ვექტორი იგივეობრივი ტრანსლაციის ვექტორის ტოლია (კრისტალური გისოსის პერიოდის ტოლია).

დისლოკაცია / შერეული - დისლოკაცია, რომლის უბნებს ერთდროულად აქვს კიდური და ხრახნული დისლოკაციების ორიენტაცია (ნებისმიერი შუალედური ორიენტაცია ზღვრულ - კიდურ და ხრახნულ დისლოკაციებს შორის. დისლოკაციის ხაზთან მისი ბიურგერის ვექტორი განთავსებულია $0 < \alpha < 90^\circ$ კუთხეებით).

დისლოკაცია / წყვილი - ანტიფაზური საზღვრის ზოლით შეერთებული წყვილი დისლოკაცია მოწესრიგებულ მყარ ხსნარში.

დისლოკაცია / ხრახნული - დისლოკაცია, რომლის ბიურგერის ვექტორი დისლოკაციის ღერძის (ხაზის) პარალელურია.

დიფუზია - ატომების გადაადგილება კრისტალური გისოსის პარამეტრზე მეტი მანძილით.

ექსტრასიბრტყე - კრისტალში გაწყვეტილი არასრული ატომური სიბრტყე (ნახევარსიბრტყე).

ვაკანსია - თავისუფალი ადგილი კრისტალური გისოსის კვანძში.

ვექტორი / ბიურგერის - ბიურგერის კონტურის საწყისი და საბოლოო წერტილების შემაერთებელი ვექტორი. იგი კრისტალში დისლოკაციის არსებობით განპირობებულ კრისტალური გისოსის დამახინჯების ზომას განსაზღვრავს.

ზედაპირი / დისლოკაციის სრიალის - ზედაპირი, რომელსაც ქმნის დისლოკაციის ღერძი და ბიურგერის ვექტორი.

ზესაფეხური / დისლოკაციის - საფეხური, ერთმანეთისგან გისოსის ერთ პერიოდზე მეტი მანძილით დაშორებული სრიალის სიბრტყეებით.

იზოტროპია - ფიზიკურ თვისებათა ერთგვაროვნობა სხეულში ყველა მიმართულებით (თვისებათა დამოუკიდებლობა მიმართულებისგან).

ინდექსი / მილერის - ნატურალური მთელი რიცხვი, რომელიც კრისტალურ გისოსში ახასიათებს სიბრტყეს ან მიმართულებას.

კავშირი / ჰომეოპოლარული (კოვალენტური) - ერთნაირი ატომების ან ელექტრონთან თავისი ნათესაური მნიშვნელობით მახლობელი ატომების შეერთებისას წარმოქმნილი ჰომეოპოლარული კავშირი, ანუ კოვალენტური კავშირი (უკანასკნელი გამოიყენება უფრო ხშირად).

კავშირი / ჰეტეროპოლარული (ელექტროვალენტური) - ქიმიური კავშირი, წარმოქმნილი ორ ატომს ან ატომების ორ ჯგუფს შორის არსებული ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედებით (ძლიერი ურთიერთმიზიდულობით).

კავშირი / იონური - ჰეტეროპოლარული ტიპის კავშირი, გამოწვეული ურთიერთსაწინააღმდეგოდ დამუხტული იონების ელექტროსტატიკური მიზიდულობით.

კანონი / კირპოფის (ბიურგერსის ვექტორებისათვის) - დისლოკაციების კვანძში გადამკვეთი ბიურგერსის ვექტორების ჯამი ნულის ტოლია.

კოგეზია - მყარი სხეულის ან სითხის ნაწილაკების შეჭიდულობა მათი კონტაქტისას.

კოეფიციენტი / კომპაქტურობის - ელემენტარულ გისოსზე მოსული ყველა ელემენტარული ნაწილაკის მოცულობის ფარდობა ელემენტარული გისოსის მთლიან მოცულობასთან.

კონტური / ბიურგერსის - ნებისმიერი ფორმის შეკრული კონტური აგებული რეალური კრისტალის სრულყოფილ არეში ატომიდან ატომამდე დეფექტის თანმიმდევრობითი შემოვლით (სრულყოფილი არიდან გამოუსვლელად). იდეალურ კრისტალში ბიურგერსის კონტური ყოველთვის შეკრულია.

კრისტალიზაცია / ჰეტეროგენული (არათვითნებური) - ჰეტეროგენული კრისტალიზაცია ეწოდება, ჩვეულებრივ, რეალურ პირობებში მიმდინარე არათვითნებურ კრისტალიზაციას.

მდგენელი / გომეოპოლარული - კოვალენტურკავშირიანი მდგენელი.

მდგენელი / ჰეტეროპოლარული - იონურკავშირიანი მდგენელი

პერიოდი /კრისტალური გისოსის - მანძილი კრისტალურ გისოსში ორ უახლოეს პარალელურ სიბრტყეს შორის.

რიცხვი / საკოორდინაციო - უმცირესი მანძილით დაშორებული ერთი ტიპის ატომების რაოდენობა, რომლებიც კრისტალურ გისოსში მოცემულ ატომს გარს ეკვრის.

საფეხური / დისლოკაციის - სრიალის ერთი სიბრტყიდან ერთი ატომთშორისი მანძილით მაღლა განლაგებული სრიალის მეორე სიბრტყეში გარდამავალი კიდური დისლოკაცია.

საფეხური / დისლოკაციის ერთეული - გისოსის ერთი პერიოდის ტოლი მანძილი სრიალის სიბრტყეებს შორის.

სიბრტყე / დისლოკაციის სრიალის - ატომური სიბრტყე კრისტალში, რომელზეც დისლოკაციის ხაზი და მისი ბიურგერსის ვექტორია განლაგებული და რომელზეც დისლოკაცია სრიალით გადაადგილდება (დისლოკაციის სრიალის ზედაპირის კერძო შემთხვევა).

სიბრტყე / ძვრის - დისლოკაციის სრიალის სიბრტყე.

სიბრტყეები / ადვილი ძვრის - ყველაზე უფრო მჭიდროდ წყობილი და სიბრტყეთა შორის უდიდესი მანძილის მქონე სიბრტყეების ერთობლიობა (ამ სიბრტყეებზე დისლოკაციების გადაადგილებას მინიმალური ძაბვები სჭირდება).

სიმკვრივე / დისლოკაციების - ყველა დისლოკაციის ჯამური სიგრძე ლითონის ერთეულ მოცულობაში.

სიმტკიცე / კოგეზიური - მიზიდულობის მაქსიმალური ძალა ორ ატომს შორის, ანუ თეორიული სიმტკიცე ორი ატომის ურთიერთ-მოწყვეტაზე (ატომთშორისი მიზიდულობის ძალების გადალახვა).

სისტემა / კრისტალური - კრისტალების დაყოფა მათი ელემენტარული უჯრედების სიმეტრიულობის მიხედვით, ღერძული ერთეულებისა და კუთხეების თანაფარდობიდან გამომდინარე.

სისტემა / პირველადი სრიალის სიბრტყეების - სისტემა, რომელშიც ძვრის ძაბვები ადრე მიაღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას და კრისტალური გისოსის წინააღმდეგობა („ხახუნი“) მინიმალური ექნება.

სისტემა / სრიალის - ატომების მაქსიმალური ენერგიის მქონე სიბრტყეებისა და მიმართულებების ერთობლიობა კრისტალურ გისოსში. ამ სიბრტყეებსა და მიმართულებებზე სრიალი ხდება მინიმალური ძაბვებით.

სიფართო / დისლოკაციის - სიფართო არისა კიდური დისლოკაციის სრიალის სიბრტყეზე, სადაც ატომთშორისი გადანაცვლება, დისლოკაციის ცენტრში, ატომების მაქსიმალური გადანაცვლების არანაკლებ 1/8-ს შეადგენს. იგი დაახლოებით 1/4 a-ს ტოლია (დისლოკაციის სიფართო განსაზღვრავს მის ენერგიას, ძვრადობას, ძაბვის დონეს,

რომლის დროსაც დისლოკაცია შეძლებს სრიალის სიბრტყის გასწვრივ იმოძრაოს).

სრიალი - განსაზღვრულ კრიტალოგრაფიულ სიბრტყეებზე მონო-კრისტალის ან მარცვლის ერთი ნაწილის მეორის მიმართ გადაადგილება (მოცულობის მუდმივობისას).

სრიალი / განივი - ხრახნული დისლოკაციის გადასრიალება სრიალის სიბრტყესთან რაიმე კუთხით მდებარე სიბრტყეში და მისი ამ სიბრტყეში შემდეგი სრიალი.

სრიალი / დისლოკაციის - 1. მხები ძაბვების მოქმედებით დისლოკაციის ხაზის სრიალის სიბრტყეში გადაადგილება (ატომების მეზობელი რიგისთვის ექსტრასიბრტყის ფუნქციის გადაცემის პროცესი).

სრიალი / მრავლობითი - სრიალი ორი ან მეტი სრიალის სიბრტყეების ტყეების სისტემაში და სრიალის მიმართულებებში.

სუბსტრუქტურა - კრისტალების დეფექტების აღნაგობა.

სხეულები / ამორფული - სხეულები, რომელთა მოცულობაში ქაოსურადაა განლაგებული მათი მდგენელი მარტივი ელემენტები.

სხეულები / კრისტალური - სხეულები, რომლებშიც მათი მდგენელი მარტივი ელემენტები მკაცრად ფიქსირებული და პერიოდულად განლაგებულია მოცულობაში.

ტემპერატურა / ეკვივოგენიური - ტემპერატურა, რომლის დროსაც ლითონის მარცვლებისა და მათი საზღვრების სიმტკიცე ხდება ერთნაირი (მარცვლებისა და საზღვრების ტოლი შეჭიდულობის ტემპერატურა).

უჯრედი /კრისტალური გისოსის ელემენტარული - კრისტალური გისოსის მინიმალური გეომეტრიული მოცულობა, რომლის სივრცის სამი მთავარი ღერძის გასწვრივ წინსვლითი გადატანა (ტრანსლაცია) მთელი კრისტალური გისოსის აგების საშუალებას იძლევა.

ძალა / პაიერლს-ნაბაროს - გარე ძალის აუცილებელი სიდიდე, ენერგეტიკულ ორმოში დისლოკაციის ორი მდგომარეობის გამყოფი, პოტენციალური ბარიერის გადასალახად (დისლოკაციის პოტენციალური ენერგია არის პერიოდული ფუნქცია. ბარიერის გადასალახად და მინიმალური ენერგიის მქონე მეზობელ მდგომარეობაში გადასადგილებლად დისლოკაციას ესაჭიროება პოტენციალური ენერგიის ამაღლება გარე ძალებით).

გამოყენებული ძირითადი ლიტერატურა*

1. Физическое металловедение: В 3-х т. 3-е изд., перераб. и доп. /Под ред. Канна Р.У., Хаазена П. - Т.1: Атомное строение металлов и сплавов: Пер. с англ. -М.: Металлургия, 1987. 640с.
2. Физическое металловедение: В 3-х т. 3-е изд., перераб. и доп. /Под ред. Канна Р.У., Хаазена П. - Т. 2: Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1987. 624с.
3. Физическое металловедение: В 3-х т. 3-е изд., перераб. и доп. /Под ред. Канна Р.У., Хаазена П. - Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов: Пер. с англ.-М.: Металлургия, 1987. 663с.
4. Физическое металловедение: В 3-х т. вып. I. - Т. 1/ Под ред. Канна Р.: Атомное строение металлов и сплавов: Пер. с англ. -М.: Металлургия, 1967. 334с.
5. Физическое металловедение: В 3-х т. вып. II. - Т. 2/ Под ред. Канна Р.: Фазовые превращения. Металлография: Пер. с англ. -М.: Металлургия, 1968. 490с.
6. Физическое металловедение: В 3-х т. вып. III. - Т. 3/ Под ред. Канна Р.: Дефекты кристаллического строения. Механические свойства металлов и сплавов: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1968. 484с.
7. Дислокации. Фридель Ж. Пер. с англ. под редакцией А.Л.Ройтбурда. М., Мир, 1967. 660с.
8. ნანოტექნოლოგიების საწყისები: ალექსი გერასიმოვი, თბილისი, 2009, 185 გვ.
9. ნანოქიმია: შოთა სიღამონიძე, თბილისი, 2011, 327 გვ.
10. Дефекты кристаллического строения металлов: Новиков И. И. Изд-во «Металлургия», 1975, 208 с.
11. Методы прямого наблюдения дислокаций: С. Амелинкс. Пер. с англ. под редакцией В.М.Кардонского. Изд-во «Мир», 1968. 440 с.
12. Почему мы не проваливаемся сквозь пол. Дж. Гордон. Пер. с англ. С.Т. Милейко. М. Изд-во «Мир», 1971.
13. Повышение прочности или упрочнение материалов ...<https://refdb.ru › look › 2352268-pall>

14. Механизмы твердорастворного упрочнения железа: А.Ю.Борисенко-
2014 dspace.nbuv.gov.ua › bitstream › handle › 22-Borisenko
15. твердорастворное упрочнение и затрудненное поперечное скольжение.
<https://www.ngpedia.ru> › ...
16. Твердорастворное упрочнение <https://studbooks.net> ›
tverdorastvornoe_uprochnenie
17. Твердорастворное упрочнение. portal.tpu.ru › MSV › lectures ›
mechanical_properties_3
18. Твердорастворное упрочнение. metallovedeniye.ru › uprochnenie-
metallicheskix-splavov
19. tekhnosfera.com/svyaz-... Связь скорости ультразвука в сплавах на
основе Fe и Al с режимами их термообработки: Муравьев В. В.,
Новосибирск . 1984
20. Торможение дислокаций атмосферами Коттрелла, Сузуки и Снука
http://studopedia.ru/3_2398_tormozhenie-dislokatsiy-atmosferami-kottrella-suzuki-i-snuka.html
21. Локальное поперечное скольжение
http://studopedia.ru/3_2397_lokalnoe-poperechnoe-skolzhenie.html
22. Выгибание дислокаций между дисперсными частицами
http://studopedia.ru/3_2396_vigibanie-dislokatsiy-mezhdu-dispersnimi-chastitsami.html
23. Торможение дислокаций дисперсными частицами
http://studopedia.ru/3_2395_tormozhenie-dislokatsiy-dispersnimi-chastitsami.html
24. Торможение дислокаций при их упругом взаимодействии и
пересечении с другими дислокациями http://studopedia.ru/3_2393_tormozhenie-dislokatsiy-pri-ih-uprugom-vzaimodeystvii-i-peresechenii-s-drugimi-dislokatsiyami.html
25. Сила Пайерлса http://studopedia.ru/3_2392_sila-payerlsa.html
26. Малоугловые границы http://studopedia.ru/3_2390_malouglovie-granitsi.html Search Results
27. Границы зерен, выросших из разных центров при ...
28. Межзёренные границы - Физическая энциклопедия femto.com.ua ›
articles › part_1

29. Механизм влияния величины зерна на сопротивление ... [https://cyberleninka.ru/article › mechanizm-vliyaniya-v..](https://cyberleninka.ru/article/view/mechanizm-vliyaniya-v..)
30. Границы зерен и субзерен http://studopedia.ru/3_2389_granitsi-zeren-i-subzeren.html
31. Низкотемпературная пластическая деформация металлов скольжением и деформационное упрочнение... [https://studopedia.ru › 3_2404_nizkotemperaturnaya-pl...](https://studopedia.ru/3_2404_nizkotemperaturnaya-pl...)
32. Пластическая деформация металлов двойникованием [https://studopedia.ru › 3_2406_plasticheskaya-deformat...](https://studopedia.ru/3_2406_plasticheskaya-deformat...)
33. Влияние различных факторов на пластическую деформацию металлов и их деформационное упрочнение. [https://studopedia.ru › 3_2407_vliyanie-razlichnih-fakto...](https://studopedia.ru/3_2407_vliyanie-razlichnih-fakto...)
34. Влияние примесей и легирования на пластическую деформацию и упрочнение ... [https://studopedia.ru › 3_2408_vliyanie-primesei-i-legir...](https://studopedia.ru/3_2408_vliyanie-primesei-i-legir...)
35. «Нанотехнология», «нанонаука» и «нанообъекты» [https://elementy.ru › nauchno-populyarnaya_biblioteka](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka)

*მკითხველის მახვილ თვალს მხედველობიდან არ გამორჩება ის ფაქტი, რომ ძირითადი ლიტერატურული წყაროები გარკვეული ხან-დაზმულობით ხასიათდება. მათ საყურადღებოდ აღვნიშნავ, რომ სწორედ ამ წლებში და ამ ავტორებმა ჩამოაყალიბეს განსახილველი საკითხების თეორიული საყრდენები და, ძირითადად, ამ შრომებშია ისინი სიღრმისეულად და საფუძვლიანად წარმოდგენილი.

დაიბეჭდა შპს „საჩინოში“
e-mail: sachino64@mail.ru
მისამართი: ც. დადიანის 100
ტელ.: 593-99-34-88