თინათინ მაღრაძე

სამშენებლო კონსტრუქციებში ბზარების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო

იანვარი 2012წ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემორე ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თინათინ მაღრაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: "სამშენებლო კონსტრუქციებში ბზარების თეორიული და ექსპერიმანტული კვლევა" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქარველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: სრ. პროფესორი მალხაზ წიქარიშვილი

რეცენზენტი: სრ. პროფ. ს. ბლიაძე

რეცენზენტი: ასოც. პროფ. მ. ტურძელაძე

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012

ავტორი:	თინათინ მაღრაძე
დასახელება:	“სამშენებლო კონსტრუქციებში ბზარების თეორიული და ექსპერიმანტული კვლევა’’
ფაკულტეტი :	სამშენებლო ფაკულტეტი
აკადემიური ხარისხი:	დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:	31.01.2012წ.

რეზიუმე

რღვევის მოვლენა რთული მრავალსაფეხურიანი პროცესია, რომელიც ელემენტში მიმდინარეობს უფრო ადრე, ვიდრე წარმოიქმნება ადამიანის თვალისათვის შესამჩნევი ბზარი რღვევის პრიცესის შესასწავლად და ასახსნელად აუცილებელია დამუშავდეს ბზარის მასშტაბური შკალა (ჩასახვის ბზარები, მიკრობზარები, მაკრობზარები, მაგისტრალური ბზარები), მასშტაბური მოდელი და მასალის შინაგანი განლაგება (წყობა). ამასთან მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული მაშტაბურ შკალაში ის სასაზღვრო პირობები, რომლებიც აღნიშნულ უბანს ესაზღვრება მარჯვნიდან და მარცხნიდან.

ერთ-ერთ ძირითადად პრობლემად რჩება ბზარის კრიტიკული სიგრძის დადგენა, ბზარის გავრცელების მიმართულების პროგნოზირება და დროში ზრდის ტემპის განსაზღვრა, აგრეთვე ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის ანგარიში. წარმოდეგნილი თემატიკა ეხება აღნიშნული პრობლემების გადაჭრას, რაც მიიღწევა თეორიული, რიცხვითი და ფიზიკური ექსპერიმენტების კომპლექსური კვლევით. ამგვარად, დასმული პრობლემა მეტად აქტუალურია. დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს ბზარის ჩასახვის, განვითარების და გავრცელების მიმართულების პროგნოზირება და ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის გაზრდის გზების ძიება.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში: ბზარიანი კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის და რღვევის მექანიზმის ანალიზი რღვევის პროცედურის დროს მიმდინარე ეფექტების, ბზარების ჩასახვის და გავრცელების კინეტიკის გათვალისიწნებით; თანამედროვე ექსპერტული მეთოდების დამუშავება პირველადი ბზარებისა და დაზიანებათა დაგროვების პროცედურის აღმოჩენისა და დაფიქსირებისათვის; ბზარის მახასიათებლების ვიზუალიზაცია მონიტორზე, ომელიც მიღებულია გადამწოდებიდან; ბზარის გავრცელების მიმართულების პროგნოზირების მეთოდის და ბაზრის კონსტრუქციების ხანგმაძლეობის ანგარიში მეთოდიკა, ხანგამძლეობის გაზრდის გზები.

დისერტაციაში ჩატარებული კომპლექსური კვლევებით მიღებულია შედეგები, რომლითაც განისაზღვრება ბზარის ჩასახვის და გავრცელების პროგნოზირება და ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის გაზრდის გზები.

სადისერტაციო ნაშრომის შედეგები გამოქვეყნებულია 8 სამეცნიერო სტატიაში მოხსენიებულია 2 საერთაშორისო სამეცნიერო კომფერენციაზე.

ნაშრომის სრული მოცულობაა 156 გვერდი, იგი მოიცავს შესავალს, ოთხ თავს, დასკნებსა და ციტირებულ ლიტერატურს, რომელიც 87 დასახელებისაგან შედგება.

RESUME

The fracture phenomenon represents a complex multi-stage process that is progressing in the element much earlier than that arise in the human eye for the obvious. To assess and explain the crack fracture processes is necessary to develop a crack bar (incipient cracks, micro-cracks, macro-cracks, and main cracks), a scale model and internal arrangement of the material (structure). Should be taken into account assumed in the bar that boundary conditions, which are adjacent to mentioned site from the right and left side.

As one of the main problem remains the determination of crack's critical length, forecasting the crack propagation direction and the time of growth determination, as well as durability calculation of structures with cracks. The presented issues are related to solving these problems that will be achieved by complex theoretical, numerical and physical experimental researches. Thus, the assigned task represents the rather urgent problem. The aim of the thesis represents in forecasting of a crack origination, development and direction of propagation and search of ways to increase the durability of structures with cracks.

The scientific novelty consists in the following: the analysis of mode of deformation of structures with cracks and fracture mechanism during fracture procedure with taking into account of current effects, cracks origination and kinetics of propagation; the development of modern expert methods of primary crack and damages processing for procedure of detection and recorded of cracks; the crack's data visualization on monitor that has been received from transmitters; method of crack propagation direction forecasting and durability calculation of market structures, ways to increase the durability.

Due the obtained results according of conducted in the dissertation complex studies by that is determined the forecasting of incipient crack and crack propagation and ways of s increasing the durability of structures with cracks.

The results of the dissertation works are published in 8 scientific articles and are reported in the 2international scientific conferences.

The total value of the work makes up to 156 pages; it includes an introduction, four chapters, conclusions and references that consist from 87 titles.

შინაარსი

აკუსტიკური ემისია;

ულტაბრგერთი კონტროლის მეთოდების კლასიფიკაცია;
ბზარის სიგანის გაზომვის მეთოდი და მოწყობილობა;

3.3.3 აკუსტიკური ემისიის და ულტრაბგერითი კონტროლის მეთოდებით აღმოჩენილი დაზიანებების ევოლუციის დადგენისათვის ფრაქტალური თეორიის გამოყენება ;

3.3.4.ბზარის გავრცელების კოორდინატების სიგრძის და მიმართულების განსაზღვრის მეთოდი და მოწყობილობა ;

თავი 4. თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის გამოყენების მაგალითები. ბზარიანი კონსტრუქციების ხანმედეგობის გაზრდის შესაძლებლობები ;

4.1 ლითონის კონსტრუქციების გამოკვლევა ულტაბგერითი დეფექტოსკოპის გამოყენებით;

4.1.1.ხანგამძლეობის ანგარიშის მაგალითი;

4.1.2. ლითონის ელემენტებში ბზარის გახსნის დინამიკა და გავრცელების პროგნოზირება;

4.2. ბეტონის კონსტრუქციების გამოკვლევა ულტარბგერითი და აკუსტიკური ემისიის მეთოდებით;

4.3. ბეტონში ბზარის შეჩერება ;

4.4. კონსტრუქციის ხანგამძლეობაზე მცირე დროითი დატვირთვის გავლენა ;

4.5.მასალის დაბერება ;

4.6ბეტონის სიმტკიცის გამყარების ზრდა და პირობები;

4.7კონსტრუქციული მასალების დარღილობითი რღვევა;

4.8. სხვადასხვა მასალების კონსტრუქციის ამტანობა. რკინაბეტონის მასალებში ამტანობა ;

ლიტერატურა .

შესავალი

სამშენებლო კონსტრუქციების ექსპლუატაციისას ადგილი აქვს ბზარის გაჩენას, რაც იწვევს კონსტრუქციების მუშაობის უნარის დაქვეითებას ან რღვევას კატასტროფული შედეგებით.

ბზარი შეიძლება იყოს თანდაყოლილი ანუ დამზადების დროს ჩამოყალიბებული შიგაბზარი ან კონსტრუქციამ მიიღოს ექსპლუატაციის პირობებში, გარე ძალების ზემოქმედებისაგან. ამ დროს იგი განიცდის ნაწილობრივ ან მთლიანად რღვევას. ნაწილობრივი რღვევის დროს შესაძლებელია კონსტრუქციაში გაჩნდეს გარკვეული სიდიდის ბზარი, რომელიც მას მწყობრიდან არ გამოიყვანს, ან შესაძლებელია კონსტრუქციის შემადგენელი რაიმე ელემენტი დაირღვეს, მაგრამ მთლიანად კონსტრუქციამ არ დაკარგოს მუშაობის უნარი. მთლიანი რღვევის დროს კი კონსტრუქცია ან ელემენტი განიცდის კატასტროფულ რღვევას და მისი შემდგომი ექსპლუატაცია შეუძლებელი ხდება.

განასხვავებენ ბზარების (დისლოკაციის) ოთხ სახეს: წერტილოვანი ბზარი იგი წარმოიშობა, როცა მესრის რამდენიმე კვანძში არ არის ატომები, ან მესრის რომელიმე კვანძი შეიცავს განსხვავებული თვისებების მატარებელ ატომს ან ატომები განლაგებულია მესრის კვანძის გარეთ; წრფივი ბზარი – ამ დროს ხდება განაპირა დისლოკაცია ან ხრახნული დისლოკაცია; ზედაპირული ბზარი და მოცულობითი ბზარი.

უნდა აღინიშნოს, რომ კრისტალში დისლოკაციები ჩნდება მათი ჩამოყალიბების პროცესში, ან რაიმე არასრულყოფილების დროს დაბალი ძაბვების მოქმედებისას.

რღვევის მოვლენა რთული მრავალსაფეხურიანი პროცესია, რომელიც ელემენტში მიმდინარეობს უფრო ადრე, ვიდრე წარმოიშობა ადამიანის თვალისათვის შესამჩნევი ბზარი. რღვევის პროცესის შესასწავლად და ასახსნელად აუცილებელია დამუშავდეს ბზარის მასშტაბური შკალა (ჩასახვის ბზარები,. მიკრობზარები, მაკრობზარები, მაგისტრალური ბზარები), მასშტაბური მოდელი და შესწავლილი იქნას მასალის შინაგანი წყობა. ამასთან მხედველობაში მიიღება მასშტაბურ შკალაში ის სასაზღვრო პირობები, რომლებიც აღნიშნულ უბანს ესაზღვრება მარჯვნიდან და მარცხნიდან.

ერთ-ერთ ძირითად პრობლემად რჩება ბზარის კრიტიკული სიგრძის დადგენა, ბზარის გავრცელების მიმართულების პროგნოზირება და დროში ზრდის ტემპის დადგენა, აგრეთვე ბზარიანი კონსტრუქციებიოს ხანგამძლეობის ანგარიში. წარმოდგენილი თემატიკა ეხება ამ პრობლემების გადაჭრას, რაც მიიღწევა თეორიული, რიცხვითი და ფიზიკური ექსპერიმენტების კომპლექსური კვლევით.

ამგავრად დასმული პრობლემა მეტად აქტუალურია.

დისერტაციის მიზანს წარმაოდგენს ბზარის ჩასახვის, განვითარების და გავრცელების მიმართულების პროგნოზირება და ხანგამძლეობის ანგარიშის მეთოდის დამუშავება.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- ბზარიანი კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის და რღვევის მექანიზმის ანალიზი რღვევის პროცესის დროს მიმდინარე ეფექტების, ბზარების ჩასახვის და გავრცელების კინეტიკის გათვალისწინებით;
- თანამედროვე ექსპერიმენტული მეთოდების დამუშავება პირველადი ბზარებისა და დაზიანებათა დაგროვების პროცესის აღმოჩენისა და დაფიქსირებისათვის;
- ბზარის მახასიათებლების ვიზუალიზაცია მინიტორზე, რომელიც მიღებულია გადამწოდებიდან;
- ბზარის გავრცელების მიმართულების პროგნზორების მეთოდის და ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის ანგარიშის მეთოდიკა, ხანგამძლეობის გაზრდის გზები.

ძირითადი დასკვნები:

1. გაანალიზებულია ბზარიანი კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და რღვევის მექანიზმი. როგორც ცნობილია, კონსტრუქციების ელემენტების რღვევის პროცესი ყოველთვის მიმდინარეობს გარკვეული დროის განმავლობაში. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ მასალების მახასიათებლები დამოკიდებულია მისი დეფორმაციის სიჩქარეზე, თვით რღვევა კი შეიძლება მიმდინარეობდეს სიმტკიცის ზღვარზე ნაკლები დაძაბულობისას, როცა დატვირთვის მოქმედება გაწელილია დროში. მითითებულ შემთხვევებში რღვევის ჩვეულებრივი კრიტერიუმები ერთჯერადი სტატიკური დატვირთვებისათვის უკვე არაკორექტულია და ამიტომ კონსტრუქციების მასალების რღვევის მოდელების ფორმულირებაში გათვალისწინებულია რღვევის პროცესის დროს მიმდინარე ეფექტები და ბზარების ჩასახვა და გავრცელების კინეტიკა;
2. დამუშავებულია პირველადი ბზარებისა და დაზიანებათა დაგროვების პროცესის აღმოჩენის თანამედროვე ექსპერიმენტული მეთოდები, როგორიცაა ელექტროტენზოგადამწოდები, ულტრაბგერითი მეთოდები, ფოტოდრეკადობის, ინტერფერომეტრიის, პოლიგრაფიული ინტერფერომეტრიის, ბოჭკოვან-ოპტიკური და სხვა მეთოდები;
3. შემუშავებულია მეთოდიკა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გადამწოდებიდან მიღებული ინფორმაცია ვიზუალურად წარმოვადგინოთ მონიტორზე, როგორიცაა ბზარის კოორდინატები, ზომები და მოსალოდნელი გავრცელების მიმართულების იმიტაცია;
4. დამუშავებული და აპრობირებულია ბზარის გავრცელების მიმართულების პროგნოზირების მეთოდი, მათემატიკური აპარატით და კომპიუტერულ-ვიზუალური რეალიზაციით.
5. დამუშავებულია ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის ანგარიშის მეთოდიკა;
6. განხილულია თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის გამოყენების მაგალითები;
7. დადგენილი იქნება ბზარიანი კონსტრუქციის ხანგამძლეობის გაზრდის გზები.

ნაშომის პრაქტიკული ღირებულება.

პუბლიკაციები. სადისერტაციო ნაშრომის მასალების მიხედვით გამოქვეყნებულია სამეცნიერო შრომა, აქედან სტატია, პატენტი გამოგონებაზე და თეზისი.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლის, ოთხი თავის, ძირითადი დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან.

შესავალში წარმოდგენილია თემის აქტუალობა, მეცნიერული სიახლე და ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება.

პირველ თავში გაანალიზებულია თანამედროვე წარმოდგენები რღვევის მექნიკის მიმართ ბზარიანი კონსტრუქციების ანალიზის ჩასატარებლად.

მეორე თავში მოცემულია ბზარიანი კონსტრუქციების კონსტრუქციების თეორიული კვლევა სინგულარული ინტეგრალური განტოლებების რიცხვითი ამონახსენი ბზარის განვითარების შესწავლისათვის.

მესამე თავში ბზარიანი კონსტრუქციების ექსპერიმენტალური კვლევა. ვიზუალური და ინსტრუმენტალური ძიების მეთოდიკა კონსტრუქციებში აქტიური რღვევის ზონის დასადგენად.

მეოთხე თავში განხილულია თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის გამოყენების მაგალითები. ბზარიანი კონსტრუქციების ხანგამძლეობის გაზრდის შესაძლებლობები.

თავი 1. თანამედროვე წარმოდგენების მიმოხილვა რღვევის მექანიკის მიმართ ბზარიანი კონსტრუქციების ანალიზის ჩასატარებლად

1.2. კონსტრუქციის, როგორც მყარი სხეულის ნაწილაკების კავშირის სახეები

კონსტრუქციების, როგორც მყარი სხეულის სიმტკიცე უზრუნველყოფილია ნაწილაკებს შორის მიზიდულობის ძალებით. იმისათვის რომ, მდგრადი სტრუქტურის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება წარმოიქმნას საჭიროა მათ შორის არსებობდეს არამარტო მიზიდულობის ძალა, არამედ განზიდვისაც, რომელიც ხელს შეუშლის ნაწილაკების შერწყმას. ნაწილაკების წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე მიზიდულობისას წარმოქმნილი სრული ენერგია ბევრად აღემატება განზიდვისას წარმოქმნილ ენერგიას, რომელიც პროპორციულად მკვეთრად ეცემა ექსპონენციალური კანონით. ამიტომ შიგა ძაბვების არარსებობისას სრული ენერგია მიახლოებით ტოლია მიზიდულობის ენერგიისაა და ეწოდება კავშირის ენერგია.

მყარ სხეულებში ნაწილაკებს შორის შეიძლება გამოვყოთ შემდეგი სახის ენერგიების კავშირები: პირველადი კავშირები (იონური, კოვალენტური, ლითონური), მეორადი კავშირები (ვან-დერ-ვაალსის კავშირი) [29,46]. ყველაზე უნივერსალურია ვან-დერ-ვაალსის კავშირი. იგი წარმოიქმნება ყველა შემთხვევაში და არის სუსტი კავშირი. იონური კავშირი წარმოადგენს ტიპიურ ქიმიურ კავშირს, რომელიც გავრცელებულია შეუზღუდავ შეერთებებს შორის. იონური კავშირის ენერგია შეადგენს $\sim 10^6$ჯ/მოლ, რომელიც დამახასიათებელია დნობის დაბალი წერტილისათვის. ლითონური კავშირი წარმოიქმნება ვალენტური ელექტრონების განზოგადებისას, რომელიც ახასიათებს ტიპიურ ლითონებს.

რეალურ მყარ სხეულებში, როგორც წესი ადგილი აქვს ორ ან რამოდენიმე კავშირის შეხამებას, რომელთაგან ერთ-ერთი წარმოადგენს მყარი სხეულის სტრუქტურის განმსაზღვრელს.

ატომები კრისტალურ სხეულში ასრულებენ რხევით მოძრაობას წონასწორობის მდგომარებასთან სიახლოვეში. ამ რხევების ამპლიტუდა დამოკიდებულია სხეულის ტემპერატურაზე და მისი გაზდრით ამპლიტუდაც იზრდება. ატომების ასეთი მოქმედება განსაზღვრავს პროცესების ტემპერატურულ და დროით დამოკიდებულებას მყარი სხეულის დეფორმაციასა და რღვევაზე.

განვიხილოთ ატომების თბური მოძრაობა, გამოვიყენოთ სტატიკური მექანიკის ფორმულები და ძირითდი დებულებები.

მდგრად მდგომარეობაში ნაწილაკებს არ გააჩნიათ მუდმივი ენერგია, ადგილი აქვს ამ ენერგიების ფლუკტაციას. ალბათობა იმისა, რომ ნაწილაკს გააჩნია U_i ენერგია, რომელიც მეტია ან ტოლი U-სი, გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$p\left(U_i \geq U\right) = e^{-U/kT} \qquad (1.1)$$

სადაც $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ჯ/კ – ბოლცმანის მუდმივაა, T – ტემპერატურა.

თუ ატომს განვიხილავთ, როგორც ჰარმონიულ ოსცილატორს, მისი საშუალო ენერგია ე.ი. პოტენციური და კინეტიკური ენერგიების ჯამი ტოლია kT. კრისტალურ სხეულში ატომები ღებულობს რხევებს სიხშირით ν T ტემპერატურაზე, რომელიც გამოისახება შემდეგნაირად:

$$kT \geq h\nu \qquad (1.2)$$

სადაც $h=6{,}62\cdot10^{-27}$ენრგ·წმ – პლანკის მუდმივაა. კრისტალური მესრის რხევების სიხშირე მიახლოებით ტოლია ერთი ატომის რხევის სიხშირისა, ამიტომ შეიძლება დავწეროთ

$$\nu \approx \sqrt{\frac{Ea_0}{M/N_A}} \qquad (1.3)$$

სადაც E – დრეკადობის მოდულია, a_0 – ატომებს შორის მანძილი, M – მოლური მასა, $N_A=6{,}022\cdot10^{23}$მოლი$^{-1}$ – ავოგადროს მუდმივაა.

კრისტალური მესრის კვანძებში ატომების თბური მოძრაობა განაპირობებს მდგომარეობის თანდათან ცვლილებას. ამის მაგალითს წარმოადგენს, ვაკუუმში მყარი სეულის ზედაპირიდან ატომების აორთქლება. ასეთი ატომის კინეტიკური ენერგია ტოლი უნდა იყოს U_0 კავშირის ენერგიისა, რათა გადაილახოს მეზობელ ატომებს

შორის ურთიერთქმედება. ეს კინეტიკური ენერგია შეიძლება გამოისახოს (1.1) სახით. (1.1) გათვალისწინებით ზედაპირიდან აორთქლებული ატომების სიჩქარე N ატომებისათვის გამოითვლება:

$$\frac{dN}{dt} = N\nu e^{-U_0/kT} \tag{1.4}$$

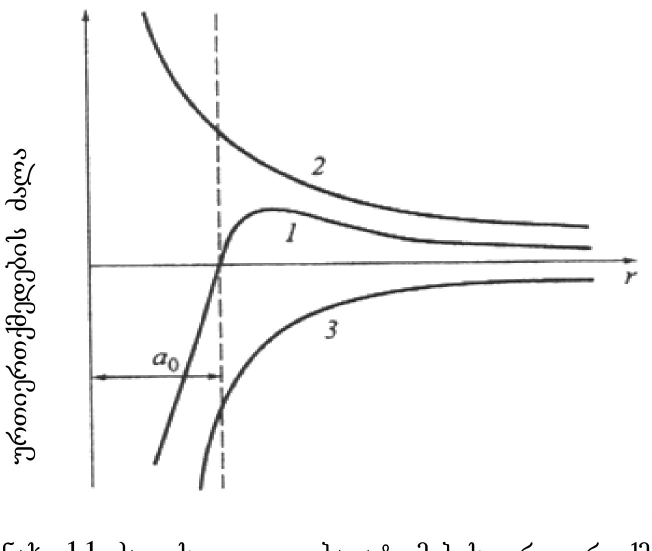
ატომების თბური მოძრაობის წარმოდგენილი მოდელი შეიძლება გამოყენებული იქნას იმ შემთხვევისათვის, როცა თერმული აქტივაცია ასრულებს მთავარ როლს. (1.4) ანალოგიით აქტიური პროცესის სიჩქარე R ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$R = N_a \nu_a e^{-U_0/kT} \tag{1.5}$$

სადაც N_a – აქტივიზაციის ცენტრის რიცხვია, ν_a და U_0 – შესაბამისად აქტივიზაციის სიხშირე და ენერგია.

1.3. კონსტრუქციების ანალიზი

ნაწილაკების მიახლოების დროს ძალის სახეობის მიუხედავად, მათი საერთო ხასიათი ერთნაირია (ნახ.1.1).

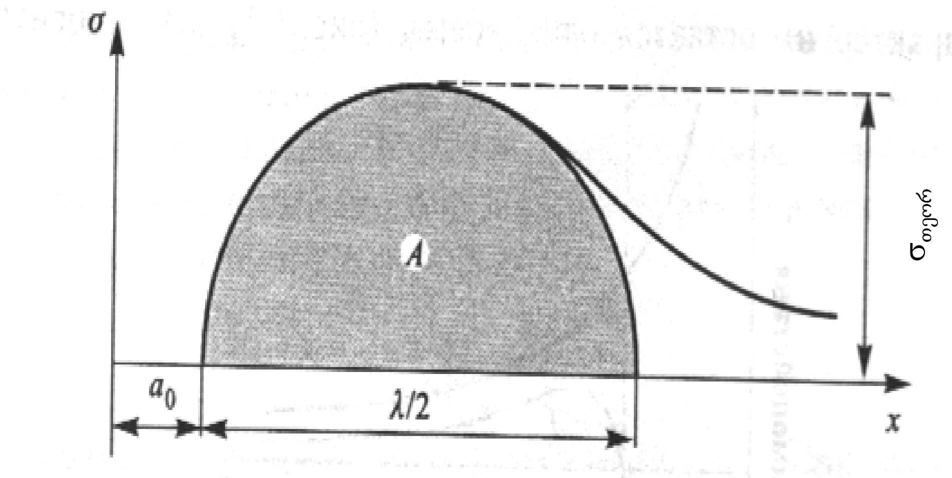


ნახ. 1.1 ძალის ცვლილება ატომების ურთიერთქმედებისას

დიდ მანძილზე დაშორების შემთხვევაში წარმოიქმნება მიზიდულობის ძალა, რომელიც სწრაფად იზრდება რადაგან მცირდება ნაწილაკებს შორის r მანძილი (მრუდი 2), მცირე მანიძლზე წარმოიქმნება განზიდვის ძალა, რომლიც r-ის

შემცირებით იზრდება უფრო ჩქარა, ვიდრე მიზდვის ძალები (მრუდი 3). ამიტომ ნაწილაკების ურთიერთქმედების ძალა (მრუდი 1) ტოლია მიზდვის და განზიდვის ძალების ჯამისა. $r=a_0$ მანძილზე განზიდვის ძალა აწონასწორებს მიზიდვის ძალას და შედეგად ურთიერთქმედების ძალა ტოლია ნულის, ხოლო ენერგია აღწევს მინიმალურ მნიშვნელობას U_0. იმისათვის რომ ატომები დაშორდნენ ერთმანეთს, უნდა გადაილახოს მათი შეჭიდულობის ძალა, რომელიც ხასაითდება თეორიული სიმტკიცით $\sigma_{თეორ.}$, ატომების შეერთების ძალა, მათი გახლეჩვისას როდესაც, მათ შორის მანძილი x-ია, იცვლება მრუდით, რომელიც აპროქსიმირდება უბრალო სინუსოიდური კანონით, ხასითდება $\lambda/2$ მნიშვნელობით (ნახ. 1.2):

$$\sigma = \sigma_{თეორ} sin\left(\frac{\pi x}{(\lambda/2)}\right) \tag{1.6}$$



ნახ. 1.2 ატომებს შორის კავშირის ძალების აპროქსიმაცია

თუ გავადიფერენციალებთ (1.6) განტოლებას მივიღებთ მრუდის დახრილობის გამოსახულებას:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi\sigma_{თეორ}}{\lambda} cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{1.7}$$

იმ შემთხვევაში, როცა $(2\pi x/\lambda)\approx 1$, მაშინ მრუდის დახრა $(x\rightarrow 0)$ არეში თანაბარია

$$\frac{d\sigma}{dx}=\frac{2\pi\sigma_{თეორ}}{\lambda} \tag{1.8}$$

ეს სივრცე კარაგად აღიწერება ჰუკის კანონით, მრუდის დახრა ასევე შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$E=\frac{\sigma}{x/a_0} \tag{1.9}$$

სადაც a_0 – ატომებს შორის მანძილია, x/a – ფარდობითი დეფორმაციაა. (1.9) განტოლების x-ით გადიფერენციალებით მივიღებთ:

$$\frac{d\sigma}{dx}=\frac{E}{a_0} \tag{1.10}$$

(1.8) და (1.9) განტოლებების ამოხსნით ვღებულობთ

$$\frac{E}{a_0}=\frac{2\pi\sigma_{თეორ}}{\lambda} \tag{1.11}$$

თუ განვიხილავთ რღვევის პროცესის ელექტროტევადობას, მაშინ ატომების გახლეჩაზე დახარჯული ენერგია, ტოლია ნახ.1.2 დაშტრიხული ფართობისა

$$A=\int_0^{\lambda/2}\sigma_{თეორ}\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)dx=\sigma_{თეორ}\frac{\lambda}{\pi} \tag{1.12}$$

კრისტალის მყიფე რღვევისას წარმოიქმნება ახალი ზედაპირები, მათი ენერგია შეიძლება განისაღვროს იმ ენერგიით, რომელიც წარმოიქმნება ატომების გახლეჩვის დროს ზრდაპირის არეში. ატომებს შორის წარმოიქმნება ძალები ზედაპირის ნორმალის მიმართულებით. ატომებს შორის კავშირის ენერგია მოცემულ შემთხვევაში შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ზედაპირის ენერგია. ამრიგად, ფართობის ერთეულზე რღვევის მუშაობა (1.12), ზედაპირის ენერგია 2γ და (1.11) განტოლების გათვალისწინება მოგვცემს კრისტალის თეორიული სიმტკიცის გამოსახულებას:

$$\sigma_{თეორ}=\sqrt{\frac{E\gamma}{a_0}} \tag{1.13}$$

უფრო ზუსტად λ მნიშვნელობის გამოთვლისათვის მყარი სხეულის თეორიული სიმტკიცე ტოლია [28]:

$$\sigma_{თეორ} \approx \frac{E}{10} \qquad (1.14)$$

ცხრილ 1.1-ში მოცემულია მყარი სხეულის თეორიული სიმტკიცის მნიშვნელობები და მისი რეალური სიმტკიცე.

ცხრილი 1.1

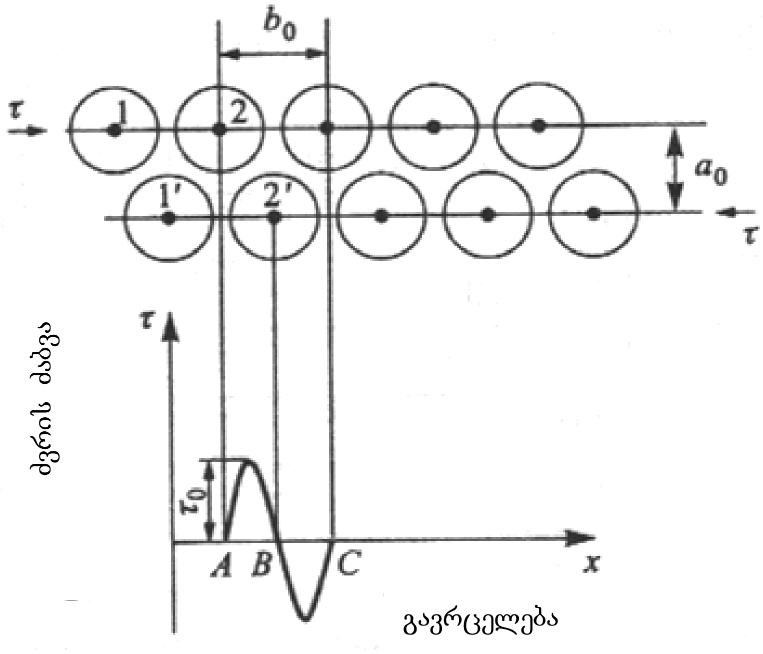
ნივთიერება	რეალური სიმტკიცე, მპა	$\sigma_{თეორ}/\sigma_{რეალ}$
Al_2O_3	$1{,}54\times10^4$	3,3
რკინა	$1{,}3\times10^4$	2,3
მაღალნახშირბადოვანი მავთული	$2{,}5\times10^3$	5,6
ბორის ბოჭკო	$2{,}4\times10^3$	14,5
მინა	$1{,}1\times10^2$	66
NaCl	$1{,}0\times10^2$	40

რღვევა ხდება ბზარების წარმოშობის შედეგად იმ ზონებში სადაც დეფექტებია და ისინი ვრცელდება ზედაპირის გასწვრივ. მყარი სხეულების რღვევისას ხდება დეფექტების გავლენის თეორიული და ექსპერიმენტალური დასაბუთება.

1.4. ძვრისას კრისტალის პლასტიკური დეფორმაცია და სიმტკიცე

კრისტალის მესერში დეფექტების არსებობას ადასტურებს ძვრისას კრისტალის სხვადასხვა თეორიული და რეალური სიმტკიცე.

კრისტალის პლასტიკური დინების ძირითად მექანიზმს წარმოადგენს ძვრის წარმოქმნა [28, 63, 85]. კრიტალირი სხეულის ზედპირზე სინქრონული ძვრის წარმოქნისათვის, საჭიროა ამ სახეულზე მოვდოთ ძვრის ძაბვა, რომელიც ტოლია თეორიულის $\tau_{\text{თეორ.}}$ დავუშვათ ატომებს შორის მანძილი სრიალის მიმართულებით არის b_0, ხოლო სრაიალის პერპენდიკულარული მიმართულებით – a_0, (ნახ.1.3).



ნახ. 1.3 ძვრის დაძაბულობა, როგორც ატომების გადაადგილების ფუნქცია

როცა ძვრის გამო 2 ატომი გადაადგილდება x=A მდებარეობიდან x=B მდებარეობის გავლით x=C მდგომარეობაში, დანარჩენი ატომები სინქრონულად გადაადგილდებიან ერთნაირი მანძილებით. დავუშვათ რომ დაბალი რიგის ატომები 1′, 2′,... დაკავშირებული არიან ერთმანეთზე და უძრავ მდგომარეობაში იმყოფებიან. 2 ატომის მდგომარეობისათვის x=A და x=B ძაბვა τ, რომელიც საჭიროა ძვრისთვის ტოლია ნულის. x=A მდგომარეობიდან ატომის გადასასვლელად x=B მდგომარეობაში საჭიროა მოვდოთ ძვრის ძაბვა, ეს შეიძლება ჩაიწეროს სინუსოიდური ფუნქციის სახით:

$$\tau = \tau_{\text{თეორ.}} \sin\left(\frac{2\pi x}{b_0}\right) \qquad (1.15)$$

სადაც $\tau_{\text{თეორ.}}$ – ძვრის ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობაა. ძვრის x მანძილი (1.15) შემცირებისას τ მიუახლოვდება შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$\tau = \tau_{\text{თეორ.}}\left(\frac{2\pi x}{b_0}\right) \qquad (1.16)$$

მცირე გადადგილების შემთხვევაში ძვრის ძაბვა შეიძლება ჰუკის კანონიდან გამომდინარე გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$\tau = \frac{Gx}{a_0} \qquad (1.17)$$

სადაც G – ძვრის მოდულია. (1.16) და (1.17) ტოლობიდან, როცა $a_0 \approx b_0$ მივიღებთ ძვრის თეორიულ ძაბვას:

$$\tau_{\text{თეორ}} = \frac{Gx}{2\pi} \qquad (1.18)$$

ცხრილი 1.2

ძვრისას მყარ სხეულებში თეორიული და რეალური სიმტკიცის შედარებები

ნივთიერება	რეალური სიმტკიცე, მპა	$\sigma_{\text{თეორ}}/\sigma_{\text{რეალ}}$
თაფლი	$6{,}4\times10^3$	$6{,}4\times10^3$
ვერცხლი	$4{,}5\times10^3$	$7{,}5\times10^3$
ნიკელი	$11{,}0\times10^3$	$1{,}9\times10^3$
მაგნიუმი	$3{,}0\times10^3$	$3{,}6\times10^3$
ცინკი	$4{,}8\times10^3$	$5{,}1\times10^3$

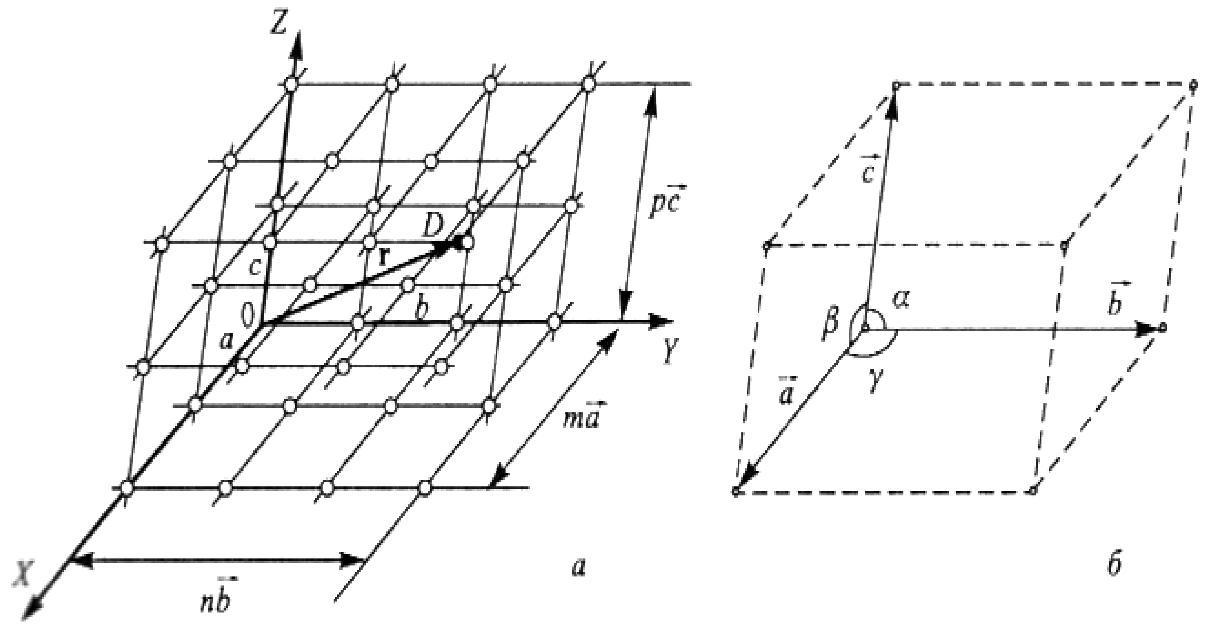
ცხრილში წარმოდგენილი დამოკიდებულება გვიჩვენებს, რომ კრისტალის რეალური სიმტკიცე 3-4-ით ნაკლებია თეორიულ სიმტკიცეზე.

1.5. დეფექტების სახეები

დეფექტების სახეების განხილვამდე გავაანალიზოთ კრიტალური მესრის სტრუქტურა. კრისტალის შიდა სტრუქტურის აღწერისათვის გამოიყენება კრისტალური მესრის მცნება, სადაც განსაზღვრული კონფიგურაცია პერიოდულად სივრცეში მეორდება.

განასხვავებენ ტრანსლიაციურ და ბაზურ მესერს. ნახ. 1.4-ზე გამოსახულია მესერი, მიღებული სამი ღერძის მიმართულებით ნაწილაკების ტრანსლიაციით. ასეთ მესერში ნებისმიერი ნაწილაკების მდებარეობა განისაზღვრება ვექტორით:

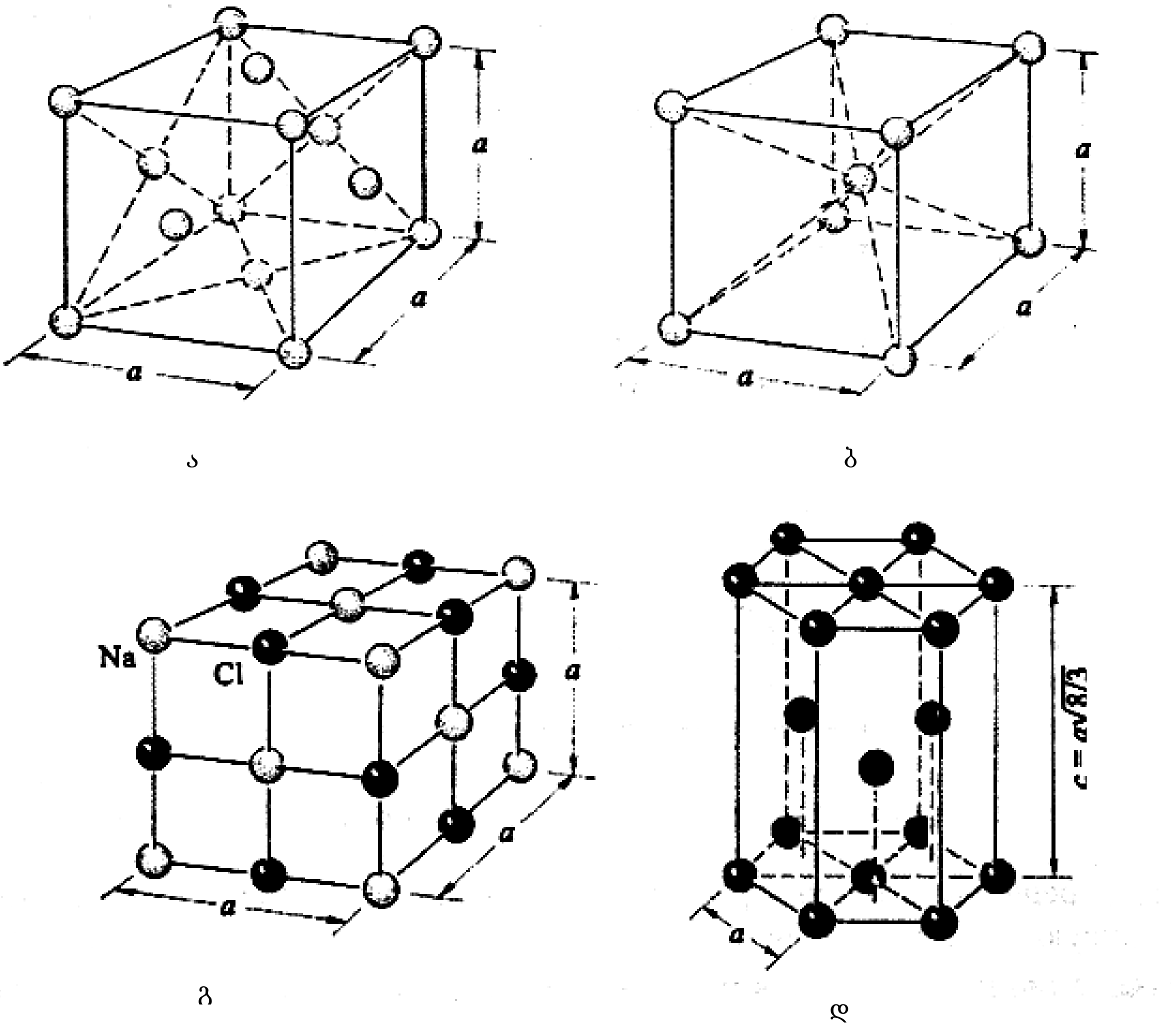
$$\vec{r} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c} \tag{1.19}$$



ნახ. 1.4 მესრის ტრანსლიაცია (ა) და კრისტალის ელემენტალური უჯრედი (ბ)

სადაც: $\vec{a}$ $\vec{b}$ $\vec{c}$ – ეწოდება ტრანსლიაციის ვექტორები, ხოლო მათ რიცხვით მნიშვნელობებს – ტრანსლიაციის პერიოდები. მესრის რომელიმე კვანძის პარარელური გადაადგილებით აგებულ მესერს ეწოდება სტრანსლირებული მესერი ანუ ბრავეს მესერი. სამ ვექტორზე აგებულ პარარელეპიპედს ეწოდება კრისტალის ელემენტალური უჯრედი (ნახ. 1.4.ბ). ყველა ელემენტალურ უჯრედს აქვს ერთნაირი ფორმები და მოცულობები. უჯრედის ყველა წვეროზე განლაგდებიან ერთნაირი ატომები ან ატომთა ჯგუფები. ამიტომ უჯრედის წვეროები ექვივალუნტურია. მათ უჯრედის კვანძებს უწოდებენ.

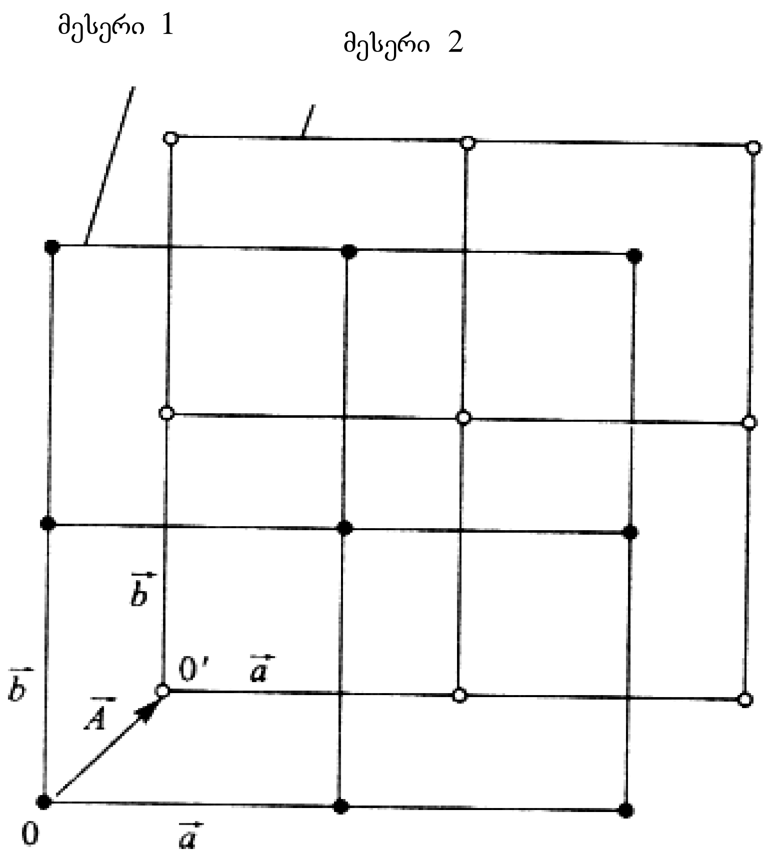
ელემენტარული უჯრედები, რომლებსაც ნაწილაკები აქვს მხოლოდ წვეროებში, იწოდებიან მარტივებად ან პრიმიტიულებად. ზოგიერთ შემთხვევაში ელემენტარული უჯრედები ნაწილაკებს შეიცავენ არა მარტო წვეროებში, არამედ სხვა წერტილებშიც, ასეთ უჯრებს რთულს უწოდებენ, უფრო მეტად გავრცელებულია: ბაზურცენტრირებული, მოცულობაცენტრირებული და წახნაგცენტრირებული (ნახ. 1.5).



ნახ. 1.5 კრისტალური სხეულის ზოგიერთი ელემენტალური უჯრედი: ა – წახნაგცენტრირებული კუბური მესერი, ბ – მოცულობაცენტრირებული კუბური მესერი, გ – NaCl მესერი, დ – ჰექსაგონური მკვრივადშეკრული მესერი

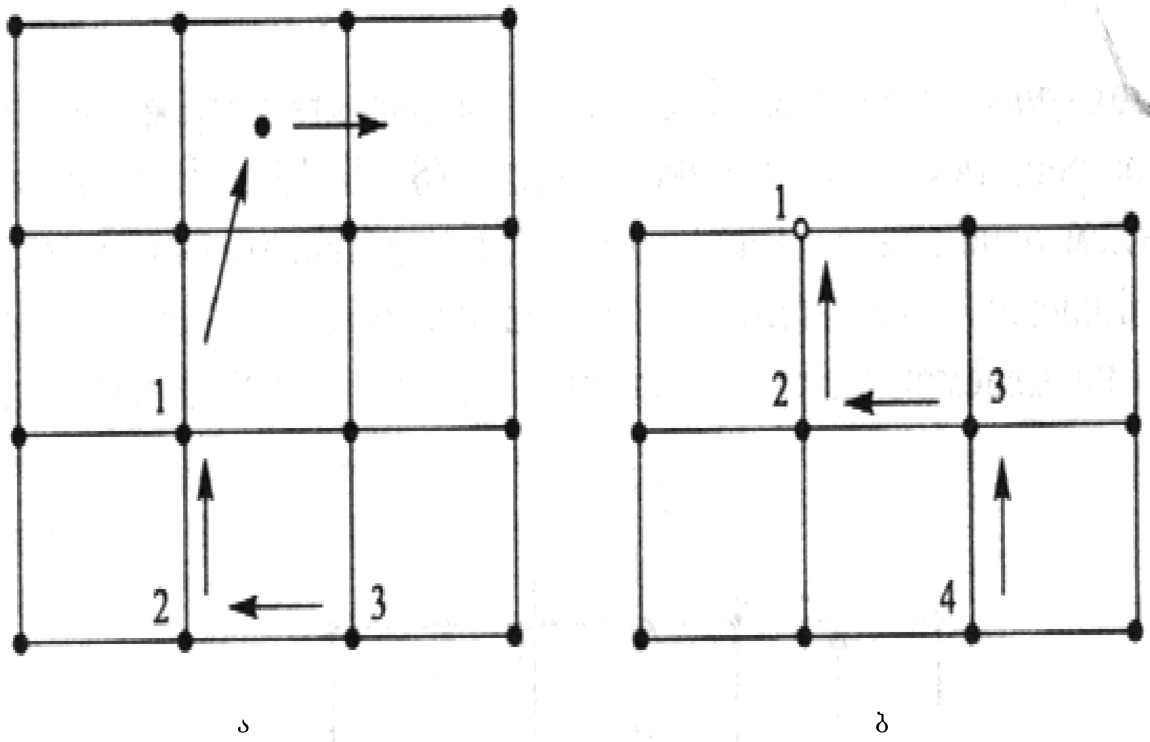
მხოლოდ ერთი კვანძის ტრანსლიაციით არ მიიღება მესერი. არსებობენ საერთო ტიპის ბაზური მესერები. განვიხილოთ მაგალითად ნახ. 1.6-ზე გამოსახული ორგანზომილებიანი მესერი ბაზისით.

ასეთი მესერი შეიძლება განვიხილოთ, ორი ერთმანეთის უკან მდგომი მესერი 1,2 ბრავეს მესერი. თითოეული მათგანი განისაზღვრება ტრანსლიაციის ვექტორებით $\vec{a}$ და $\vec{b}$. მესრების ფარდობითი შერევა აღიწერება დამატებითი ვექტორით $\vec{A}$, რომელსაც ბაზისური ეწოდება. ბაზისური მესერი შეიძლება ავაგოთ ტრანსლიაციით, მაგრამ ამ დროს უნდა ტრანსლირდეს არა ერთი კვანძი, არამედ რამოდენიმე.



ნახ. 1.6 ორგანზომილებიანი მესერი ბაზისით

წერტილოვანი დეფექტები. მყარი სხეულის ატომებში ენერგიის განაწილება ხდება არათანაბრად. ნებისმიერი ტემპერატურის პირობებში კრისტალში არსებობენ ატომები, რომელთა ენერგია ბევრად მეტი ან ნაკლებია მის საშუალო მნიშვნელობაზე. ატომებს, რომლებსაც გააჩნიათ დიდი ენერგია, შეუძლიათ გადალახონ პოტენციალური ბარიერი, შედგენილი საშუალო ატომებისაგან და გადადიან ახალ უჯრედში. ასეთი ატომები იძენენ თვისებას „აორთქლდნენ" მესრის კვანძებში და „კონდენცირდნენ" კვანძებს შორის (ნახ. 1.7,ა). ეს მიგვიყვანს ვაკანტური კვანძის წარმოქმნამდე (ვაკანსია) და დისლოცირებულ ატომამდე. ატომების ასეთ დეფექტებს უწოდებენ ფრენკლინის დეფექტებს. როგორც კვანძებს შორის ატომები, ასევე ვაკანსიები არ რჩებიან ლოკალიზებულნი ერთ ადგილზე, ისინი დიფუზირდებიან მთელ მესერში.

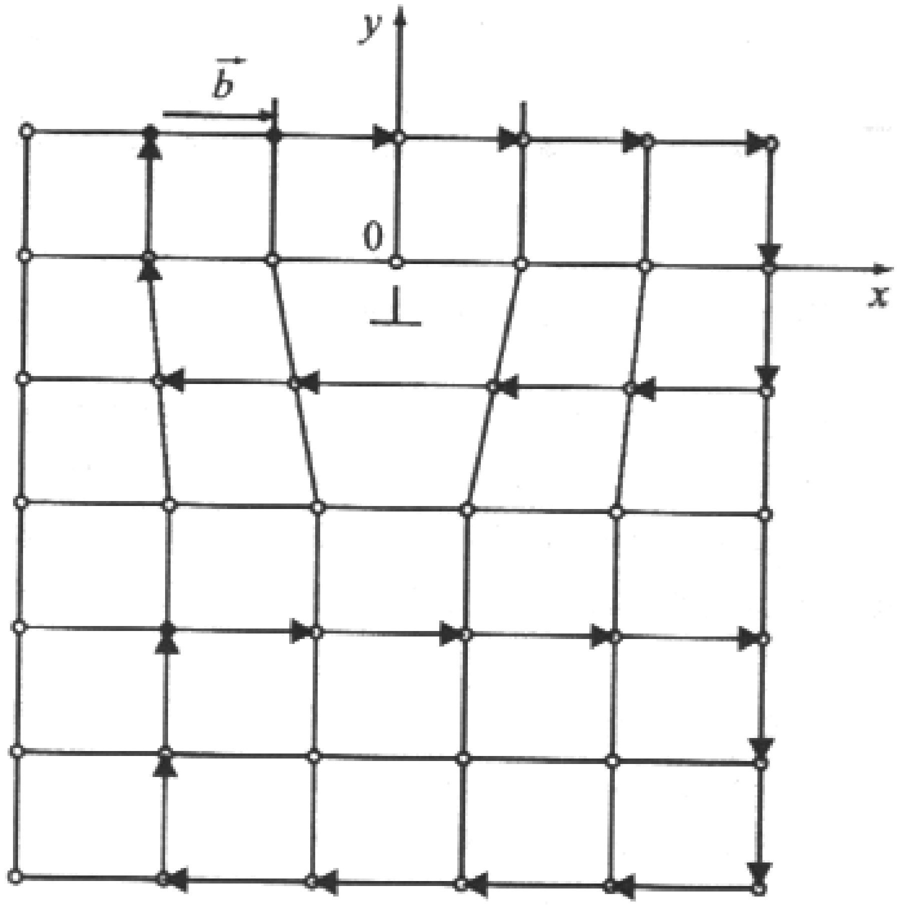


ნახ. 1.7. ფრენკელის დეფექტი – ა; შოტკის დეფექტი – ბ

გარდა შიგა აორთქლებისა, ასევე შესაძლებელია ატომების მთლიანი აორთქლება კრისტალის ზედაპირიდან (ნახ. 1.7,ბ). ვაკანსიების შიგა ატომებთან შერევისას ის კრისტალის შიგნით აღწევს და დიფუნდირდება მის მოცულობაში. ასეთ ვაკანსიებს უწოდებენ შოტკის დეფექტებს.

ფრენკლის და შოტკის დეფექტების წარმოქნის პროცესს აქვს თერმოფლუკტუაციური თვისება. ფრენკელის დეფექტების დროს წარმოქმნილი ენერგია მიახლოებით ტოლია ვაკანსიის წარმოქნის და შეღწევის ენერგიისა.

ერთგანზომილებიანი დეფექტები. ერთგანზომილებიან დეფექტებს კრისტალური მესრის აგებისას წარმოადგენს დისლოკაციები [28, 46, 130]. ერთგანზომილებიანი დეფექტზე ტიპიურ წარმოდგენას გვიქმნის კიდური დისლოკაცია. ზღვრული დისლოკაცია წარმოიქმნება ატომის ნახევრადსიბრტყის მხარეს, მას ექსპოსიბრტყე (⊥) ეწოდება (ნახ. 1.8).



ნახ. 1.8. კიდური დისლოკაცია

კიდური დისლოკაციის სიგრძე გამოსახული ნახ. 1.8-ზე სიბრტყის პერპენდიკულარულია, მას დისლოკაციის ღერძს უწოდებენ, იგი ხასიათდება $\vec{b}$ ბიურგერსის ვექტორით.

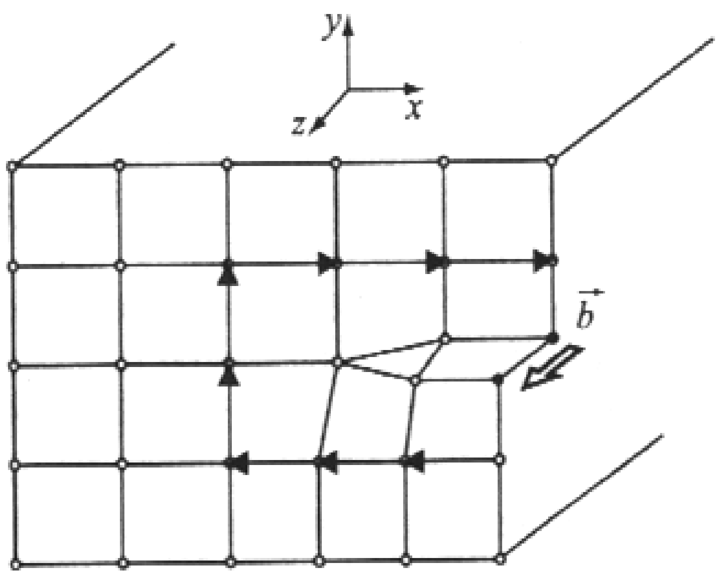
ამ ვექტორის განსაზღვრა შესაძლებელია ბიურგერსის კონტურით. სიბრტყის დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორი პარარელურია სრიალის მიმართულების და შეესაბამება სრიალის ვექტორს. ნახაზზე $\perp$ სიმბოლო გვიჩვენებს, რომ ექსტრასიბრტყე მდებარეობს მაღლა.

დისლოკაციის ხაზის გასწვრივ წარმოიქმნება გისოსის დრეკადად დამახინჯებული არე. ექსპრასიბრტყის დისლოკაცია მოვახდინოთ y ღერძის პარარელურად, წარმოვიდგინოთ რომ სიბრტყე xz ემთხვევა ძვრის სიბრტყეს, ხოლო

ბიურგერის ვექტორი – x ღერძს (ნახ. 1.8). მაშინ (x,y) წერტილში ძაბვის კომპონეტები შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\sigma_{xx} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\frac{y(3x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2};$$
$$\sigma_{yy} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\frac{y(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2};$$
$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}); \qquad (1.4.2)$$
$$\sigma_{xy} = -\frac{Gb}{2\pi(1-\nu)}\frac{x(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2};$$
$$\tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$

დისლოკაციის სხვაგვარ სახეს წარმოადგენს ხრახნული დისლოკაცია (ნახ. 1.9). იგი წარმოიქმნება ძვრისას კრისტალის ნაწილების ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად, ჭრილის ორივე მხარეს. ზღვრული დისლოკაციისაგან განსხვავებით ხრახნულს არ გააჩნია ექსტრასიბრტყე, ხოლო ბირგერსის ვექტორი დისლოკაციის ხაზის კოლენიალურია. გამოვიკვლიოთ ხრახნული დისლოკაციის ძაბვის არე. ვთქვათ ძვრის მიმართულება და დილოკაცია ემთხვევა z ღერძს, სრიალის xz სიბრტყე x,y ღერძის მიმართულებით u=ν=0, ხოლო z-ის გასწვრივ გადაადგილება – ω.



ნახ. 1.9 ხრახნული დისლოკაცია

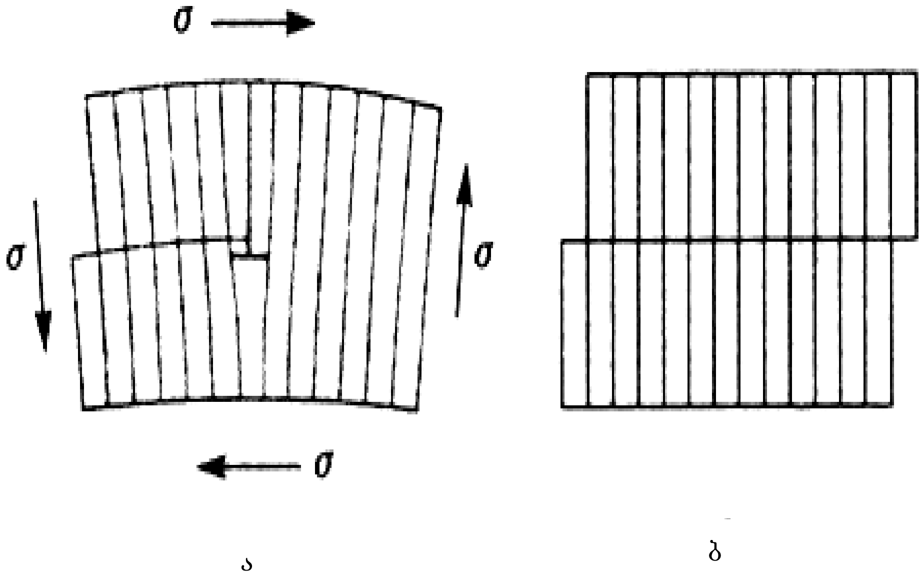
თუ გადაადგილებას ω ჩავწერთ პოლარულ კოორდინატებში ბიურგერსის ვექტორის და დრეკადობის თეორიის განტოლებების გამოყენებით, შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ ძაბვის კომპონენტები გარდა $\tau_{\theta z}$-ისა ნულის ტოლია. შესაბამისად ხრახნული დისლოკაციის ძაბვის ველს არ გააჩნია მიზიდულობის და განზიდულობის კომპონენტები, მაგრამ მას გააჩნია შემხები კომპონენტი:

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r} \tag{1.21}$$

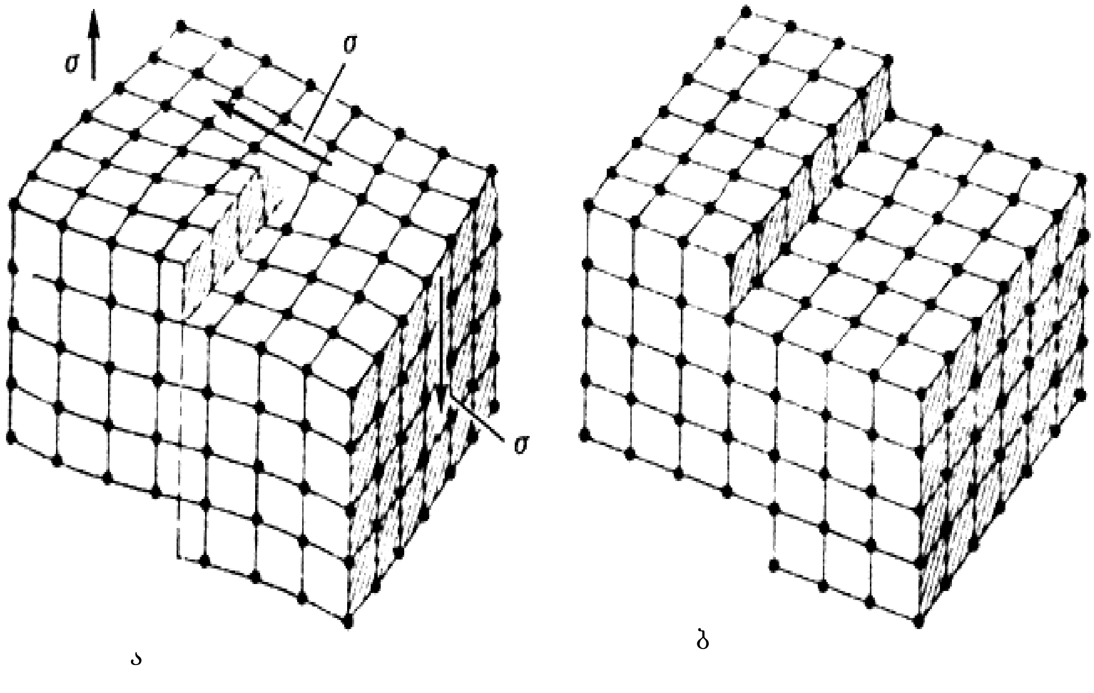
სადაც $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ დრეკადობის თეორიის ამოცანისათვის დეკარტულ სისტემაში კოორდინატებს აქვს სახე:

$$\begin{aligned} \tau_{zx} &= -\frac{Gb}{2\pi}\frac{y}{x^2 + y^2}, \\ \tau_{yx} &= \frac{Gb}{2\pi}\frac{x}{x^2 + y^2} \end{aligned} \tag{1.22}$$

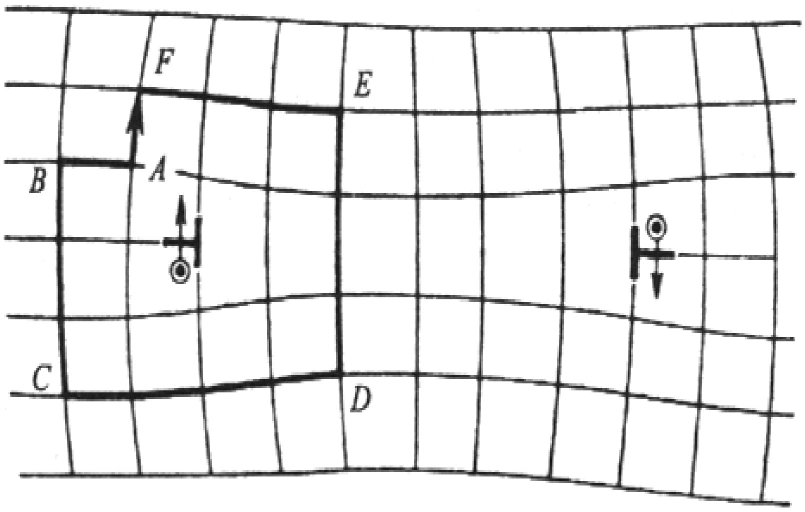
ავღნოშნოთ, რომ Gb მნიშვნელობა გამოიყენება ყველა დისლოკაციის ფორმულებში. კრისტალებში დისლოკაცია იშვიათად არის სუფთად ზღვრული ან გრეხვითი. განასხვავებენ სრიალის და მჯდარ დისლოკაციებს. დისლოკაცია არის სრიალის თუ, ბირგერსის ვექტორი სრიალის ზედაპირის გასწვრივაა (ნახ. 1.10, 1.11). სრიალის დისლოკაცია ხდება ძვრის გამო. შედეგად ექსტრასიბრტყე კარგავს თავის მდებარეობას კრისტალში და წარმოიქმნება ერთატომიანი სიმაღლის კიბე, რომელიც კარგად ჩანს ნახ. 1.10,ბ და 1.11,ბ-ზე. თუ ბირგერსის ვექტორი სიბრტყის პერპენდიკულარულია, სადაც არსებობს დისლოკაცია, ამ შემთხვევაში სრიალის დისლოკაცია შეუძლებელია და ასეთ დისლოკაციას ჯდომითს უწოდებენ. ამის მაგალითს წარმოადგენს მარყუჟული დისლოკაცია, რომელიც წარმოაიქმნება სრიალის ზედაპირზე ვაკანსიების შერევისას (ნახ. 1.12).



ნახ. 1.10 კრისტალში ზღვრული დისლოკაცია

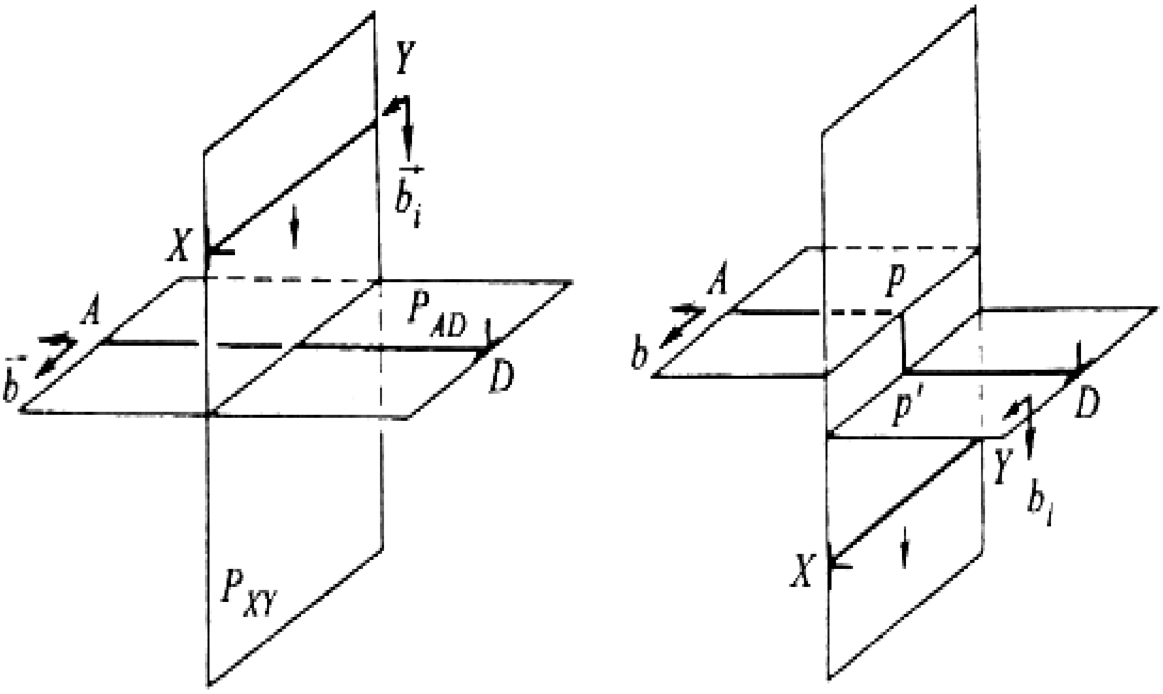


ნახ. 1.11. კრისტალში ხრახნული დისლოკაცია



ნახ. 1.12. მარყუჟული დისლოკაცია

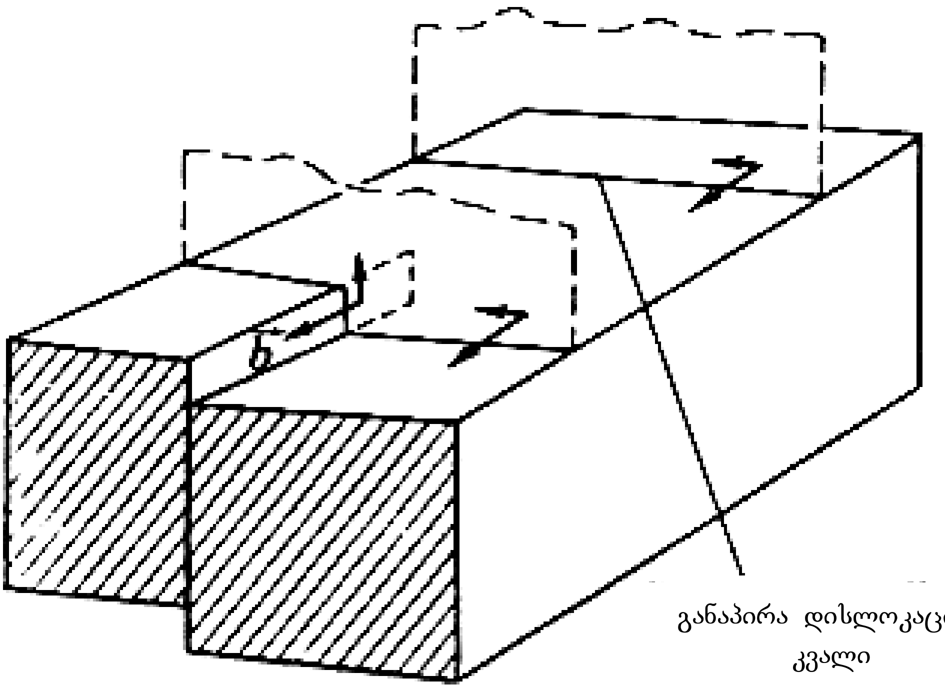
განვიხილოთ ორი ზღვრული დისლოკაციის გადაკვეთა (ნახ. 1.13).



ა ბ

ნახ. 1.13. ზღვრული დისლოკაციების კვეთა ა – ერთ დონეზე, ბ – სხვადასხვა დონეზე

დავუშვათ დისლოკაცია xy ბურგერსის b_i ვექტორით მოძრაობს ზედაპირზე P_{xy} და უახლოვდება დისლოკაციას AD ბიურგერსის b ვექტორით, რომელიც მდებარეობს P_{AD} ზედაპირზე. ამის შემდეგ xy დისლოკაცია გადაკვეთს AD-ს, წარმოიქმნება PP′ საფეხური, რომლის სიგრძე ტოლია b_i-ის. თუ ხდება ზღვრული დისლოკაციის კვეთა ხრახნულთან წარმოიქმნება საფეხური განაპირა დისლოკაციაზე (1.14).

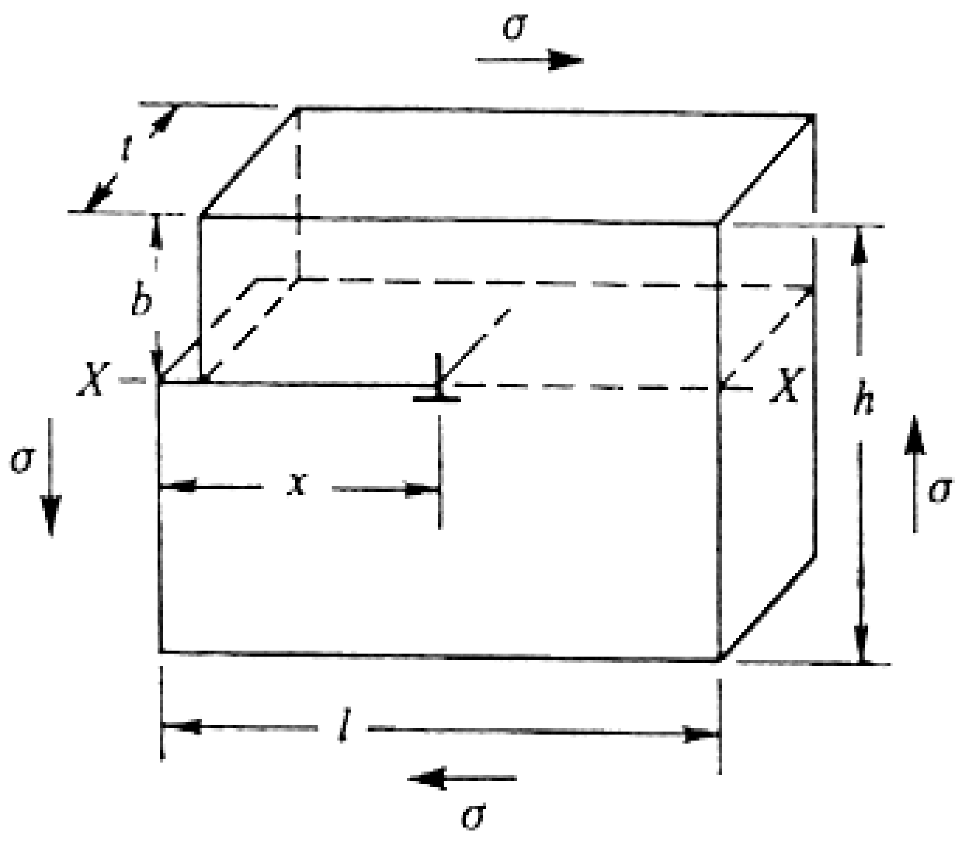


ნახ. 1.14. ზღვრული და ხრახნული დილოკაციის გადკვეთის შედეგად მიღებული საფეხურები

შევაფასოთ პირველ მიახლოებითი ძაბვა, რომელიც აუცილებელია მოვდოთ მარტივ კუბურ კრისტალს, რათა დისლოკაცია გავრცელდეს ატომებს შორის მანძილზე, გამოვიყენოთ პაიერლს-ნაბაროს ფორმულა:

$$\tau = \frac{2G}{1-\nu} \cdot e^{-2\pi\omega/b} \tag{1.23}$$

სადაც ω კრისტალის სივრცის ზომაა, რომელიც ხასიათდება ატომის პოტენციური ენერგიით.



ნახ. 1.15. ძვრის დეფორმაციის პლასტიკური განსაზღვრა

დისლოკაციის გადაადგილება იწვევს პლასტიკურ დეფორმაციას. პლასტიკური დეფორმაციის ძვრა γ, რომელიც წარმოიქმნება სრიალის დისლოკაციის x მანძილზე (ნახ. 1.15) განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\gamma = \frac{xt}{tl} \cdot \frac{b}{h} \tag{1.24}$$

სადაც l,h,t – კრისტალის სიგრძეს, სიმაღლე და სისქეა. მთლიანი დეფორმაციისათვის დავწეროთ გამოსახულება:

$$\gamma = \frac{\Lambda b}{lh} \cdot n \qquad (1.25)$$

თუ $\rho = n/lh$, მივიღებთ $\gamma = \rho \Lambda b$ (1.26)

ვაჩვენოთ გენერირებული დისლოკაცია კრისტალში ფრანკ-რიდის მექანიზმის მაგალითზე [15, 46, 85]. განვიხილოთ კიბური დისლოკაცია ADD′B, გამოსახული 1.16,ა ნახაზზე. კრისტალზე მოდებული მხები ძაბვა τ იწვევს DD′ უბნის ძვრას (ნახ. 1.16,ბ), ამ დროს AD და D′B რჩება უცვლელი. კრისტალური ძაბვა რომელიც საჭიროა DD′ უბნის ნახევარწრეწირად, გარდასაქმნელად იოლად გამოითვლება ძალების წონასწორიბის პირობიდან:

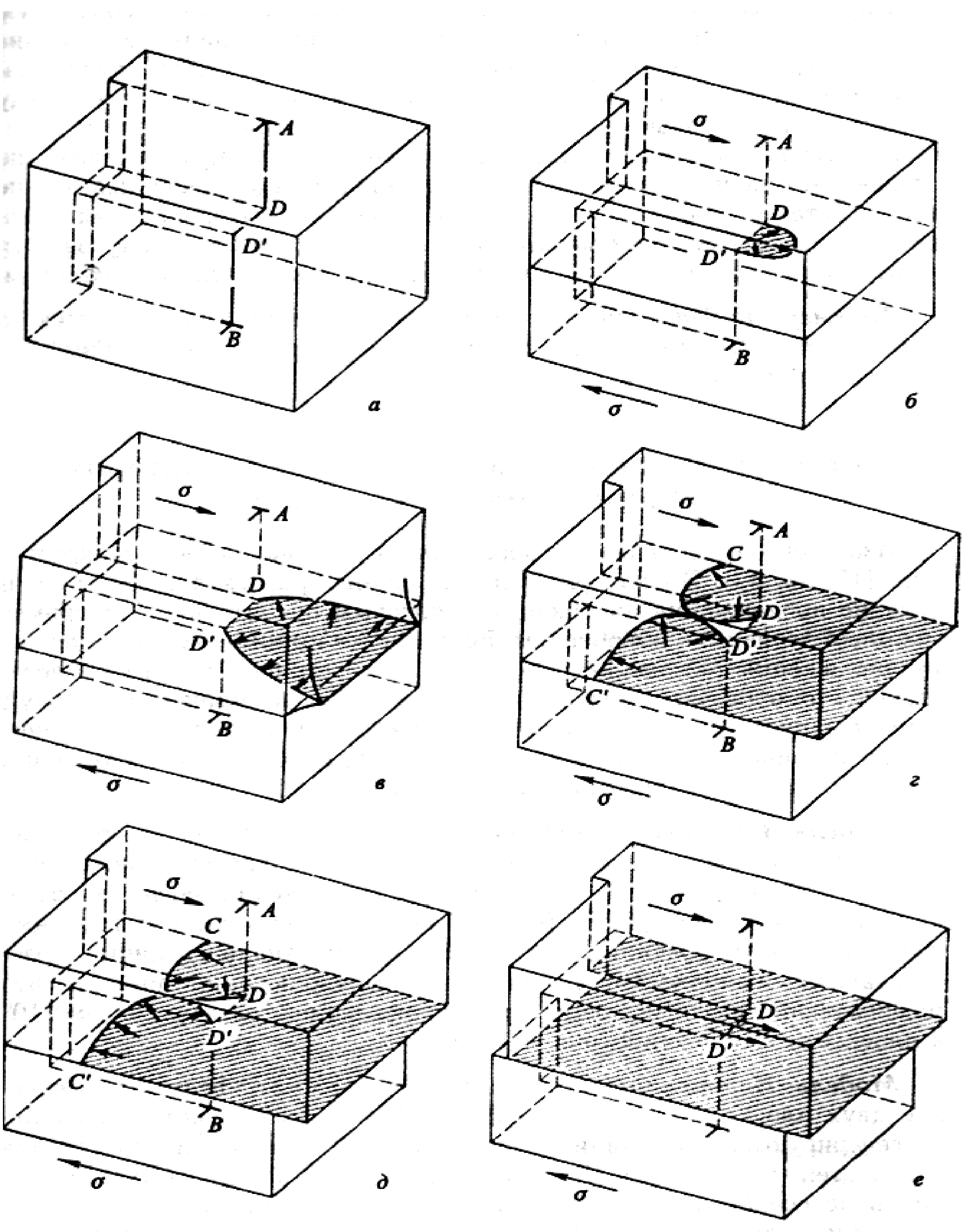
$$\tau = \frac{Gb}{L} \qquad (1.27)$$

სადაც τ – შინაგანი ძაბვაა, L – ნახევარწრეწირის დიამეტრი.

დისლოკაციის ნახევარწრეწირის ფორმა შეესაბამება არაგათანაბრებულ წონასწორობას, იმისათვის რომ შემდეგ გაფართოვდეს მარყუჟის დისლოკაცია და საფეხურის სტრქუტურის წარმოქმით გამოვიდეს კრისტალის ზედაპირზე (ნახ. 1.16, გ) არის საჭირო მაღალი ძაბვა. წარმოქმნილი DC და D′C′ სეგმენტები გადადგილდებიან სრიალის ზედაპირზე და გადაიკვეთებიან (ნახ. 1.16,დ), რომლის დროსაც ენერგიის წყაროს ისინი ანულირებენ, წარმოიქმნება სეგმენტი CC′ და DD′ (ნახ. 1.16,ე). ამასთან CC′ სეგმენტი განიცდის გარდაქმნას კრისტალის მარჯვენა ნაწილში გამოდის ზედაპირზე და წარმოიქმნება ერთატომიანი საფეხური (ნახ. 1.16ვ), ხოლო DD′ სეგმენტი იღებს პირვანდელ ფორმას.

პროცესი უბნის დისლოკაციის გადადგილებისა სრიალის ზედაპირზე შეიძლება განხილული იქნას, როგორც მილიდან პატარა ბუშტუკების გამოშვება.

არსებობს აგრეთვე ორგანზომილებიანი და სამგანზომილებიანი დეფქტები.

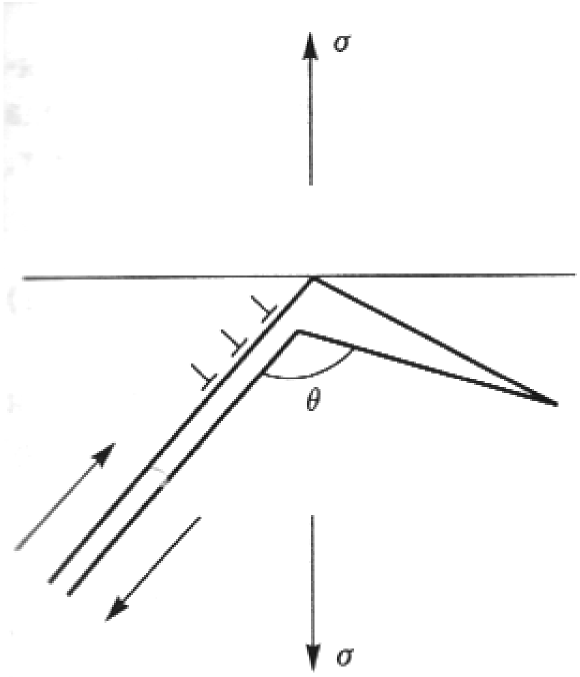


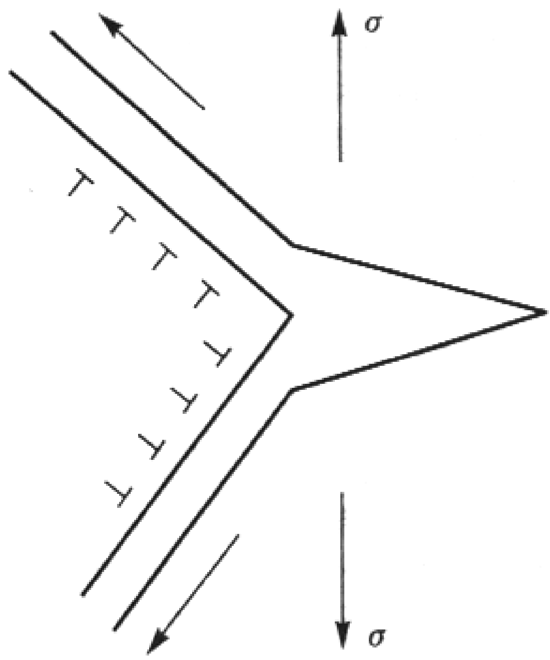
ნახ. 1.16 დისლოკაცის გამრავლება კრისტალში ფრანკ-რიდის მექანიზმით

1.6. მიკრობზარების წარმოქმნის კრიტერიუმები და დისლოკაციის მექანიზმები

მექანიზმი დისლოკაციური მიკრობზარების წარმოქმნის არსებობს რამოდენიმე [15, 28, 63]. განვიხილოთ რამოდენიმე მათგანი:

ზინერ-სტრო-პეტჩის მოდელი. ასეთი მექანიზმით ბზარის წარმოქმნა ხდება განაპირა დისლოკაციის წახნაგების ჩაკეტვით წინაღობასთან და მაღალი კონცენტრაცია განზიდულობის ძაბვების წარმოქნისას სრიალის ზოლის მთავარ ჩაკეტილ უბნებზე. ამ ძაბვის ანალიზმა გვიჩვენა, რომ განზიდვის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა 110°-იანი კუთხითაა მიმართული სრიალის სიბრტყის მიმართ (ნახ. 1.17ა).



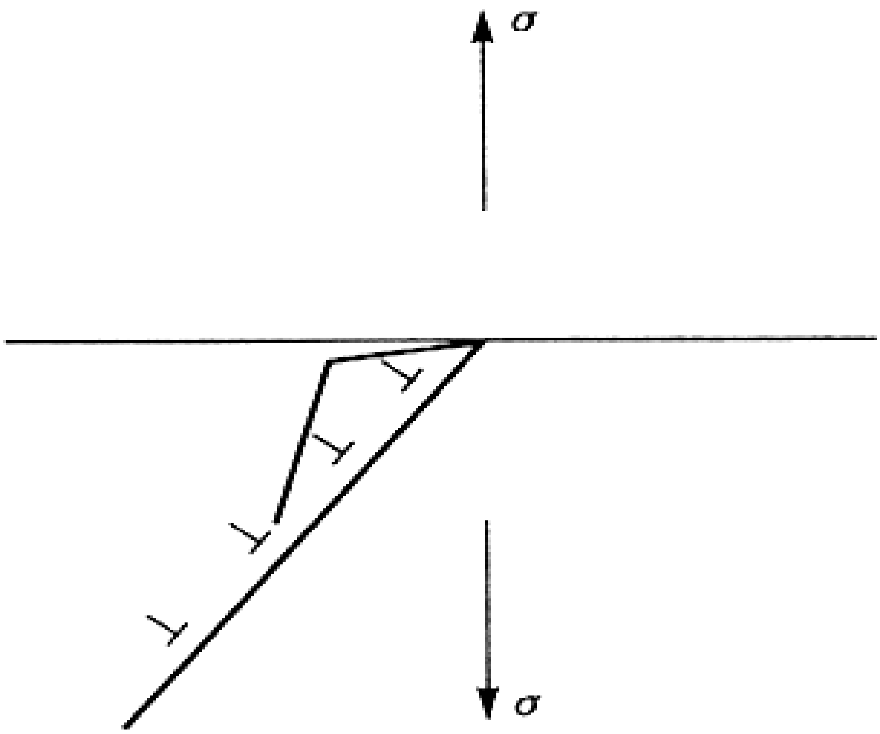


.ნახ. 1.17 ა. ზინერ-სტრო-პეტჩის დისლოკაციის მოდელი; ბ კოტრელის დისლოკაციის მოდელი

კოტლერის მოდელი. ამ მოდელში განიხილება ორი სრიალა სიბრტყის ზედაპირის გადაკვეთა ლითონებში, სადაც აქტიურად გენერირებენ დისლოკაციები

მათი გადაკვეთის სიბრტყეში (ნახ.1.17,ბ). ხდება მთავარი დისლოკაციის სიმრავლის შერწყმა, რომელიც წარმოქმნის ახალ დისლოკაციას ბურგერსის ვექტორით. ეს დისლოკაცია წარმოქმნის ბარიერს სხვა დისლოკაციებისათვის სიმრავლეებში.

ბალაფა-გილმანის მოდელი. ეს მოდელი აღწერს ბზარების წარმოქმნისას არაბარიერულ მექანიზმს. მიკრობზარები წარმოიქმნება ზედაპირის შიგნით (ნახ. 1.18) დისლოკაციების დაგროვებით.



ნახ. 1.18 ბალაფა-გილმანის რღვევის მოდელი

ბზარების დისლოკაციის გაჩენის და ზრდის კრიტერიუმები. ლოკალური დისლოკაციის σ_{ld} განზიდვის ძაბვა, რომელიც გამოწვეულია ძვრის ძაბვით τ, შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით [28]

$$\sigma_{ld} = \sqrt{\frac{d}{2x}}\left(\tau - \tau_i\right) \qquad (1.28)$$

სადაც 2d – მანძილია სრიალის ზოლებს შორის, x – დისლოკაციის სრიალის მთავარი ზოლებს დაშორებაა, τ_i – მოძრაობის საწინააღმდეგო დისლოკაციის ძაბვაა. მიკრობზარების ზრდის კრიტერიუმს აქვს შემდეგი სახე:

$$\sqrt{\frac{d}{2x}}\left(\tau - \tau_i\right) \geq \sqrt{\frac{\gamma E}{a_0}} \qquad (1.29)$$

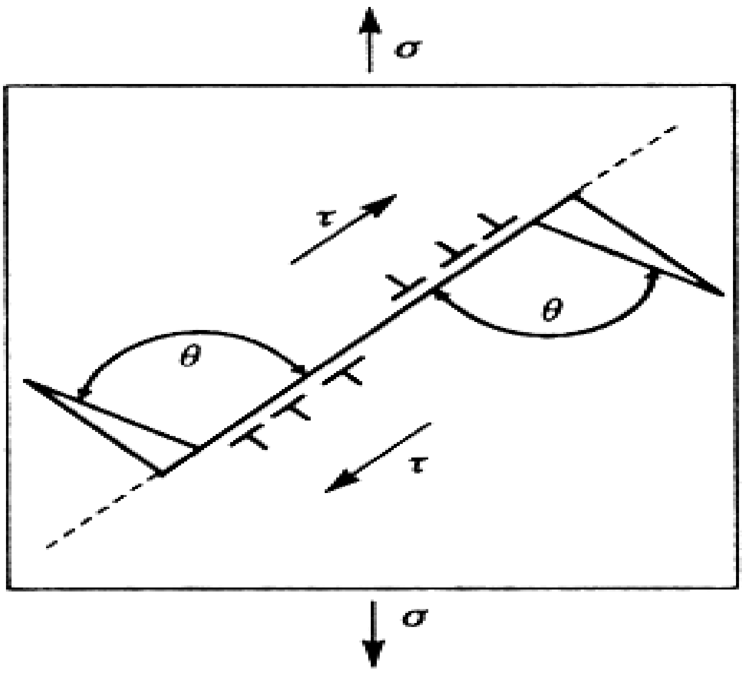
დადებითი ან აურყოფითი დისლოკაციები სრიალის ზედაპირის ბარიერებზე შეიძლება გამოისახოს შემდეგი სახით, როცა E≈2G:

$$n \approx \frac{d\left(\tau - \tau_i\right)}{bE} \qquad (1.30)$$

მივიღოთ დამატებითი პირობა $x \approx \alpha_0$ (1.29) და (1.30)-დან გამომდინარე მივიღებთ მიკრობზარების დისლოკაციური მექანიზმით მიღების პირობას

$$\left(\tau - \tau_i\right)nb = 2\gamma \qquad (1.31)$$

(ნახ. 1.17) გამოსახული სოლური ბზარები შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ერთი დიდი დისლოკაცია ბირგერსის ვექტორით nb. სოლური ბზარის წარმოქმნა გამოსახულია ნახ. 1.19-ზე.



ნახ. 1.19 სოლური ბზარის სქემა

R რადიუსის კრისტალის ბზარის ენერგია განისაზღვრება შემდეგი სახით:

$$W = \frac{n^2 b^2 G}{4\pi\left(1-\nu\right)}\ln\left(\frac{2R}{l}\right) + 4\gamma l - \frac{\pi\left(1-\nu\right)\left(\sigma_n^2 + \tau_s^2\right)l^2}{2G} - nb\sigma_n l\sin\theta \qquad (1.32)$$

სადაც n – დისლოკაციის რიცხვია, რომელიც საჭიროა მის წარმოსაქმნელად; σ_n და τ_s– ნორმალური და მხები ძაბვების კომპონენტებია; θ – კუთხე ზედაპირსა და ბზარებს შორის.

წონასწორი ბზარების პირობის ანალიზი

$$\frac{dw}{dl} = 0 \quad (1.33)$$

შეიძლება მივიღოთ შემდეგი კრიტერიუმები ბზარების ზრდისათვის:

$$nb\left[\left(\sigma_n^2 + \tau_s^2\right)^{1/2} + \sigma_n \sin\theta\right] = 4\gamma \quad (1.34)$$

(1.34) განტოლებიდან, სტროს და კოტლერის მოდელების მიხედვით შეგვიძლია დავწეროთ:

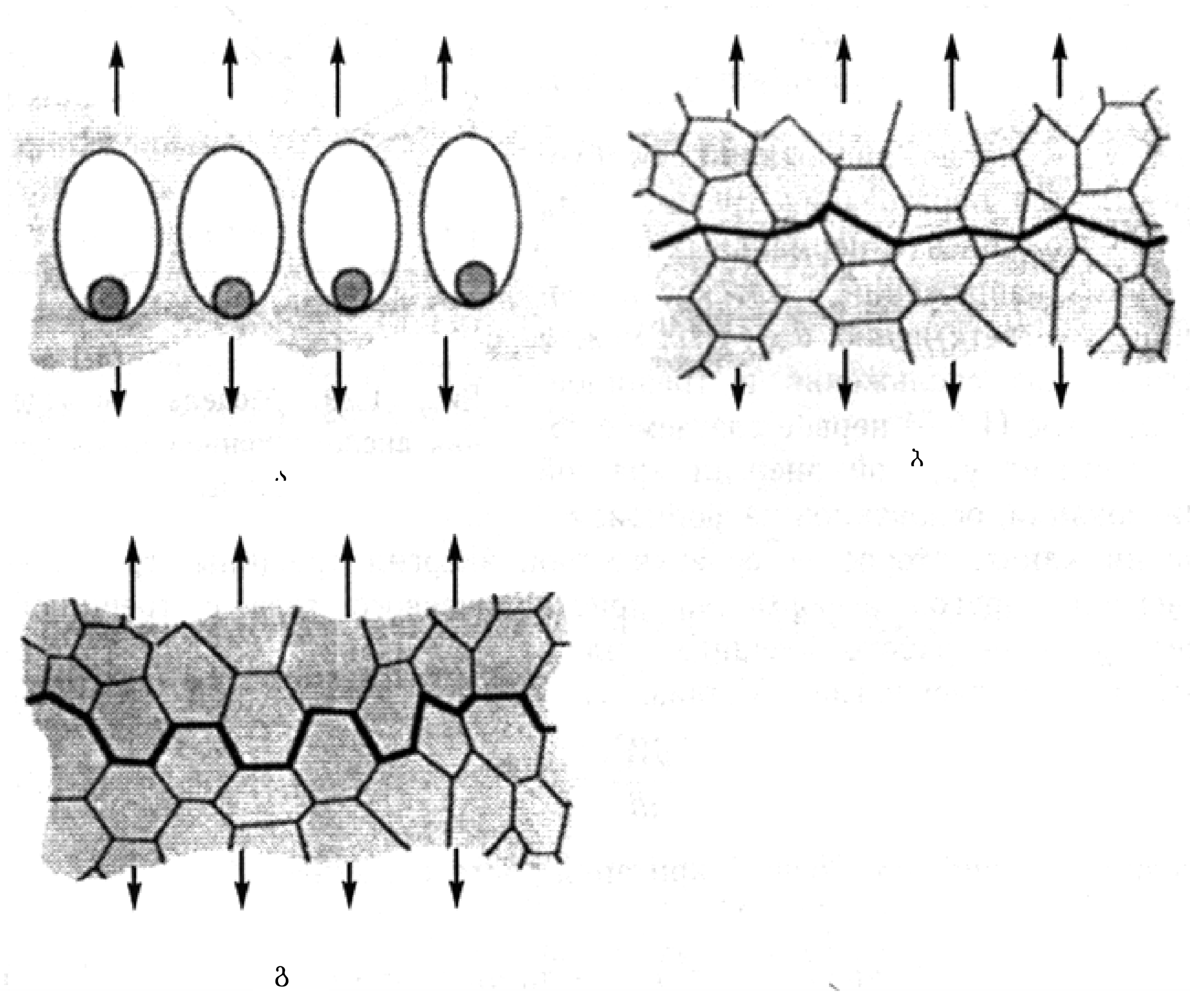
$$\sigma nb \approx 2\gamma \quad (1.35)$$

თუ გამოვიყენებთ (1.30) ფორმულას და გავითვალისწინებთ $\sigma=2\tau$, მივიღებთ:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{d}} \quad (1.36)$$

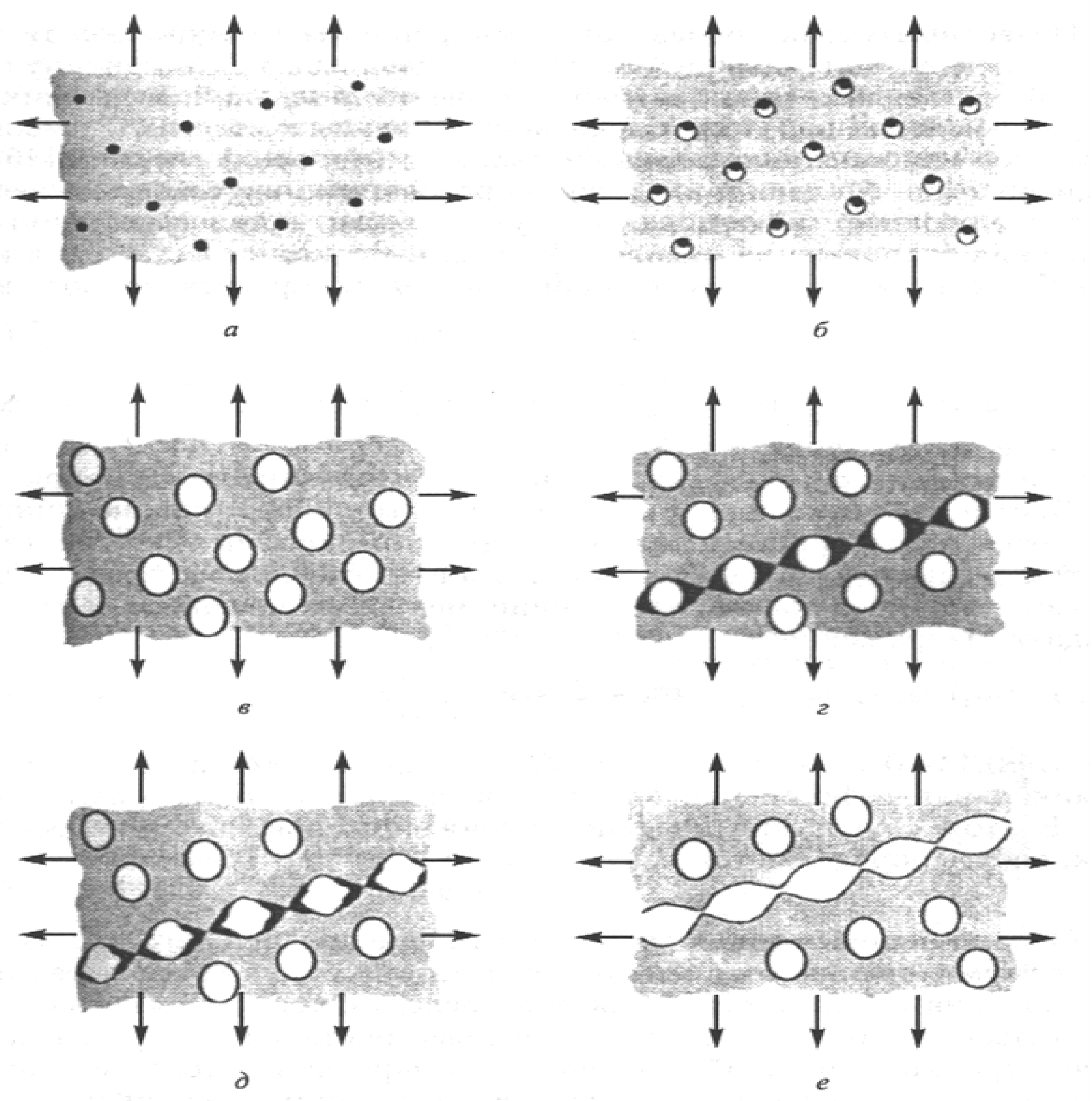
1.7. კონსტრუქციების რღვევის მიკრომექანიზმები

მყარ სხეულებში ადრეულ ეტაპზე გაჩენილ დეფექტებს მივყავართ რღვევის პროცესის განვითარებასთან. განასხვავებენ ლითონის რღვევის სამი ტიპის მიკრომექანიზმებს: ბლანტი რღვევა, ტრანსკრისტალური და მარცვალთშორისი გადაადგილება (ნახ.1.20). არსებობენ აგრეთვე რღვევის სპეციფიკური მიკრომექანიზმები, გამოწვეული დაღლილობით, ცოცვადობით, დინამიკური დატვირთვით, რომლებსაც განვიხილავთ ქვემოთ.



ნახ. 1.2 ლითონისრღვევის მიკრომექანიზმები

ბლანტი რღვევა. მოცემული ლითონის რღვევის მექანიზმი დაფუძნებულია მიკროფორების წარმოქნასთან მეორე ფაზის ნაწიკალებში და ფორებს შორის მიკროპლასტიკური დეფორმაციების ლოკალიზაციით ფორებს შორის საზღვრებში.



ნახ. 1.21. ბლანტი რღვევის მიკრომექანიზმის სქემა ა – ლითონის ბლანტი მატრიცის ჩართვა; ბ – მიკროფორების წარმოქმნა ჩართვებში; გ – მიკროფორების ზრდა; დ – მიკროპლასტიკური დეფორმაციის ლოკალიზაცია; ე – ზღუდარზე ყელის წარმოქმნა; ვ – მიკროწყვილების შერწყმა და რღვევა

რღვევის ზედაპირზე წარმოებს ორმოების წარმოქმნა, რომელიც წარმოადგენს მიკროპლასტიკური დეფორმაციის შედეგს. [81].

მიკროწყვილების წარმოქმნის ცნობილი მოდელები, რომლებიც წარმოიქმნებიან ჩართვებში და ლითონის ბლანტ მატრიცებში დაფუძნებულია მყარ სხეულებში კონტინუალურ მექანიკაზე და დისლოკაციის თეორიაზე [151]. კონტინუალურ

მოდელებს შორის უფრო მეტად ცნობილია ა. არგონის მოდელი და მისი მოდიფიკაციები. მიკრობზარების წარმოქმნის მოდელი და კრიტერიუმი ემყარება შემდეგს: მიკროფორები წარმოიქმნება მაშინ, როცა კოჰეზიური ძაბვა მიუახლევდება კრიტიკულ ძაბვას σ_c წარმოდგენილი სახით:

$$\sigma_c = \sigma_{eq} + \sigma_m \qquad (1.37)$$

სადაც $\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_2)^2\right]^{1/2}$ ექვივალენტური ძაბვაა;

$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 / 3$ საშუალო ძაბვაა; σ_1, σ_2, σ_3 – ძაბვის მთავარი ნორმალებია.

მიკროფორების დისლოკაციის მოდელების წარმოქმნა ჩართვებში ეფექტურია სუბმიკრონული ნაწილაკების არსებობისას. შესაბამისად ასეთ მოდელებში ჩართვასა და მატრიცის ზღვარს შორის ძაბვა ტოლია:

$$\sigma_d = 5{,}4\alpha G\sqrt{\frac{\varepsilon_1 b}{R_0}} \qquad (1.38)$$

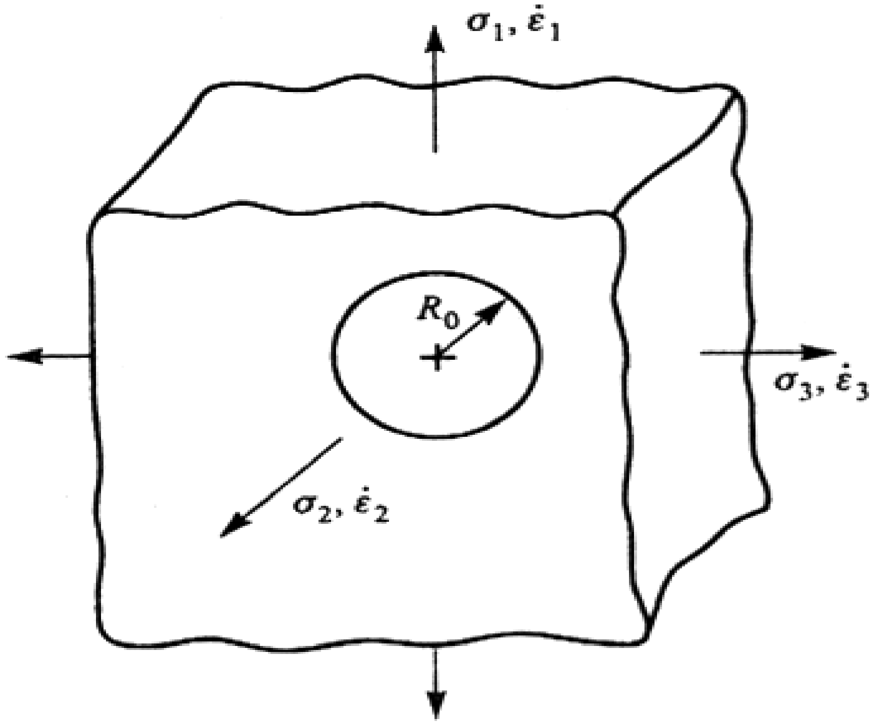
სადაც α=0,14÷0,3 – კონსტანტაა, G – ძვრის მოდულია, ε_1 – დეფორმაციის მთავარი ნორმალია, b – ბურგერსის ვექტორია, R_0 – ნაწილაკების რადიუსი. ამ შემთხვევაში კრიტიკული ძაბვა, რომლის დროსაც წარმოიქმნება მიკროფორები განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\sigma_c = \sigma_d + \sigma_1 \qquad (1.39)$$

მათემატიკური მოდელების უმარვლესობის ზრდა დაფუძნებულია ერთეული სპეციფიკური მიკროფორების განხილვაზე, შეუზღუდავი ზომის სხეულში, რომელიც დატვირთულია ნორმალური ძაბვებით σ_1, σ_2, σ_3, რომლთა სიჩქარეა $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ (ნახ. 1.22). დეფორმაციის პროცესში სპეციფიკური მიკროფორები R_0 ტრანსფორმირდება ელიფსოიდად, ზომებით R_1, R_2, R_3 და მიკროფორების ზრდა შეიძლება გამოისახოს შემდეგი ნახევრადემპირიული გამოსახულებით [250]:

$$\ln\left(\frac{\overline{R}}{R_0}\right) = 0{,}238\int_0^{\varepsilon_{eq}} \exp\left(\frac{1{,}5\sigma_m}{\sigma_T}\right) d\varepsilon_{eq} \qquad (1.40)$$

სადაც $\overline{R} = (R_1 + R_2 + R_3)/3$, σ_T – დინების ზღვარია, ε_{eq} –ეკვივალენტური პლასტიკური დეფორმაცია.



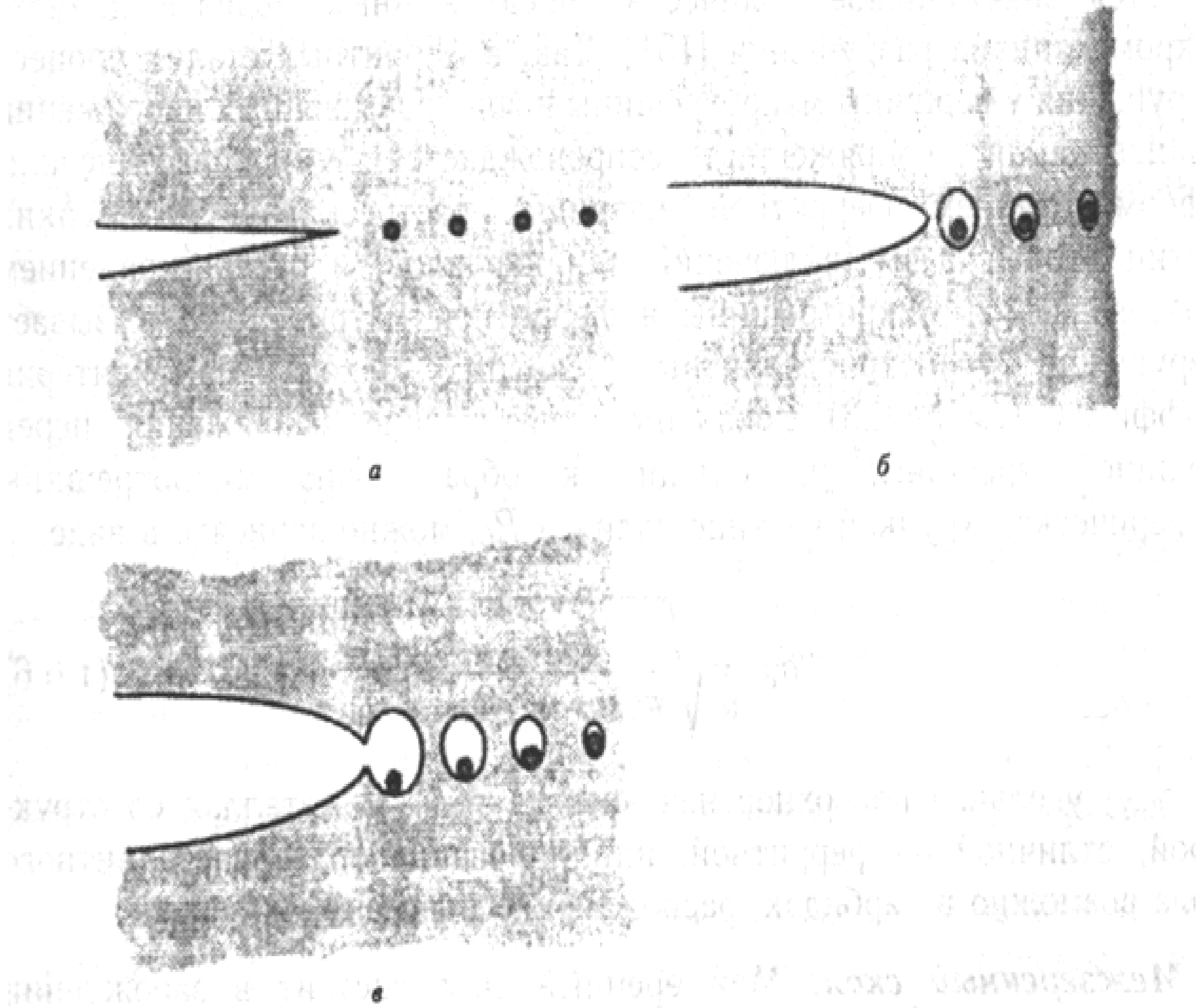
ნახ. 1.22 უსასრულო ზომის სხეულის დატვირთვის სქემა

ორგანზომილებიანი ელიპსური მიკროფორისათვის (ε_3=0):

$$\sigma_c \frac{d}{d + a_0} = \sigma_1 \tag{1.41}$$

სადაც a_0 – ელიფსური მიკროფორების პატარა პოლუსებია.

განხიილული მოდელის წარმოქმნა, შერწყმა და ზრდა მიკროფორებისათვის წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნას მყარი სხეულის ანალიზისათვის ბლანტი რღვევის მიკრომექანიზებში (ნახ. 1.23).



ნახ. 1.23 ბლანტი რღვევის მექანიზმის ზრდის სქემა ა – რღვევის წვეროზე ჩართვა; ბ – რღვევის წვეროზე მიკროფორების ზრდა; გ – რღვევის წვეროზე მიკროფორების შერწყმა.

ტრანსკრისტალური მოხლეჩა. მყარი სხეულის რღვევისას ადგილი აქვს ტრანსკრისტალური ხლეჩას. ტრანსკრისტალურ ხლეჩვას გააჩნია მყიფე თვისება, თუმცა გამორიცხული არა არის პლასტიკური დეფორმაცია. გრიფიტსის კრიტერიუმიდან გამომდინარე კრიტიკული ძაბვა, რომელიც იწვევს მიკრობზარების წარმოქმნას R_0 რადიუსის მქონე სფერულ მყიფე ნაწილკაში, შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi\left(1-\nu^2\right)R_0}} \qquad (1.42)$$

სადაც: γ – სხეულის ზედაპირის კუთრი ენერგიაა.

მარცვალთშორისი მოხლეჩა. იგი წარმოიქმნება მარცვლების საზღვრებს შორის მიკრობზარების გავრცელებისას.

1.8. მცირე სიდიდის დაღლილობის ბზარის გავრცელება

ეს პროცესი მიმდინარებს ციკლური ძაბვის პირობებში. ხობსონ-ბრაუნის მეთოდით ლითონის მარცვლებში მცირე ბზარების გავრცელების სიჩქარე შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი ფორმულით:

$$\frac{da}{dN} = A\Delta\varepsilon^{\alpha}\left(d - l\right) \qquad (1.43)$$

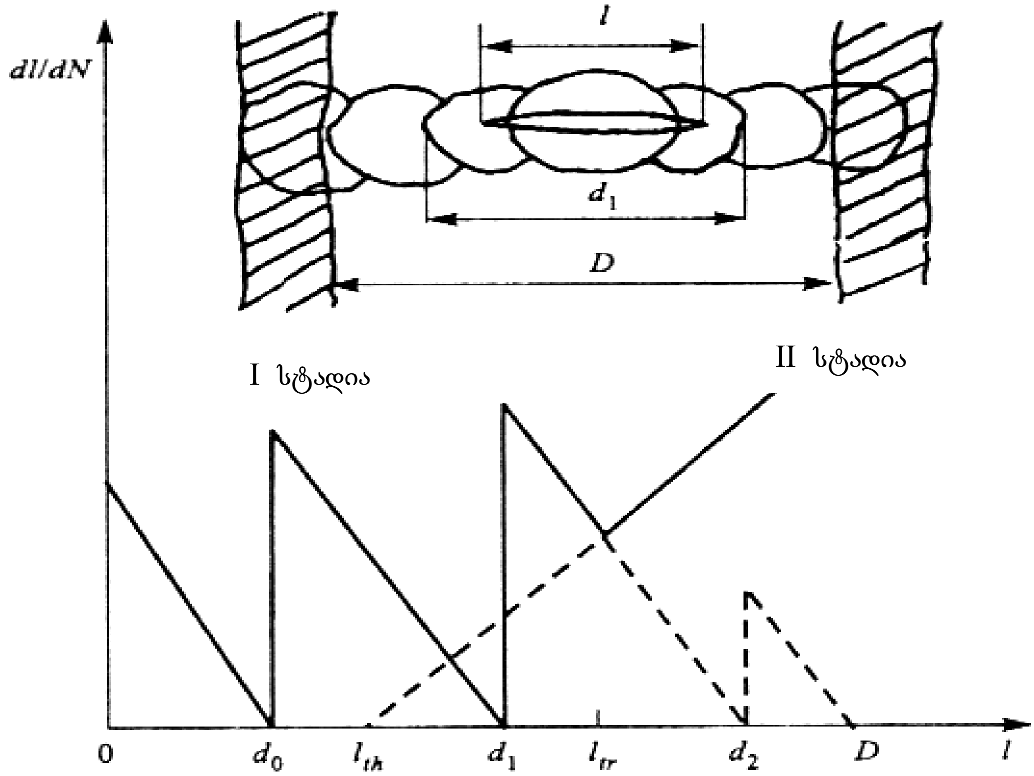
სადაც: l – ბზარის სიგრძეა; A და α – ლითონის მუდმივებია; Δε – მოცემული დეფორმაცია. მიკროსტრუქტურული პარამეტრი d ახასიათებს მიკროსტრუქტურულ ბარიერებს შორის მანძილს. მიკროსტრუქურული დაღლილობის ზღვარი, მოკლე ბზარების შემთხვევაში (სტადია I) დამოკიდებულია მხოლოდ ლითონის მიკროსტრუქტურაზე.

რადგან კონსტრუქციის ელემენტის ზედაპირი შეიცავს სხვადასხვა ბასრ მიკროკონცენტრატორებს, გამომდინარე აქედან მოცემული დეფორმაციის სიგანის მიუხედავად წარმოიქმნება და ვრცელდება მიკროსტრუქტურული მოკლე ბზარები.

მიკროსტრუტურული მოკლე ბზარის წარმოქმნის შემდეგ სტადიას წარმოადგენს, ფიზიკურად მოკლე ბზარების წარმოქმნა (სტადია II), რომლის სიჩქარეც გამოითვლება შემდეგი ფომულით:

$$\frac{da}{dN} = B\Delta\varepsilon^{\beta} l - D_{th} \qquad (1.44)$$

სადაც: B და β – ლითონის მუდმივებია; D_{th} – მოკლე ბზარის ფიზიკური დაღლილობის ზღვარია. არსებობს ორი დაღლილობის ზღვარი ფიზიკური მოკლე ბზარებისათვის. პირველი დამოკიდებულია მხოლოდ ლითონის მიკროსტრუქტურაზე, ხოლო მეორე ბზარების სიგრძესა და დეფორმაციის სიგანეზე. ამ ბზარების ზომების გადიდებას მივყავართ წრფივი რღვევის მოდელებამდე. მოკლე ბზარების გავრცელების სტადია თანდათან გადადის საბოლოო სტადიაში – გრძელი ბზარების სტადიაში.



ნახ. 1.24 მცირე ბზარების მიკროსტრუქტურული (I სტადია) და ფიზიკური (II სტადია) გავრცელების მოდელი

მიკროსტრუქტურული პარამეტრი d წარმოადგენს დისკრეტულ პარამეტრს, რომელიც განსაზღვრავს მანძილს სუსტ და ძლიერ მიკროსტრუქტურულ ბზარებს შორის. m-ური ნახტომისათვის, როცა d_m=d მიკროსტრუქტურული პარამეტრი წარმოდგება შემდეგი სახით:

$$d_m = d_1 + 2(m-1)d_a, \quad d_m < D$$
$$d_m = D \qquad (1.45)$$

სადაც: D – დაშორებაა მთავარ მიკროსტრუქტურულ ბარიერებს შორის.

ბზარების m-ური ნახტომი სუსტი მიკროსტრუქტურის ბარიერის დროს ხდება მაშინ, როცა ბზარის ზომა მიაღწევს 0,95d_m-ს.

პირველი სტადიიდან მეორეში გადასვლის სტადიის ზომა განისაზღვრება ბზარის ზრდის სიჩქარის ზომით (1.43) და (1.44)-დან

$$A\Delta\varepsilon^{\alpha}\left(d_m - l_{tr}\right) = B\Delta\varepsilon^{\beta} l_{tr} - D_{th} \qquad (1.46)$$

1.7.2. დატვირთვის გავლენა მოკლე ბზარების კინეტიკაზე.

(1.43) და (1.44) გამოსახულებები შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით, ძვრის და ღერძული დეფორმაციების სიდიდის კომპონენტებისათვის:

$$\frac{dl}{dN} = A_{eq}\Delta\gamma^{\alpha}\left(d - l\right), \qquad (1.47)$$

$$\frac{dl}{dN} = B_{eq}\Delta\gamma^{\beta} l - D_{th} \qquad (1.48)$$

D_{th} – ნივთიერების მუდმივაა; A_{eq} და B_{eq} – დამოკიდებულნი არიან (1.43) და (1.44) გამოსახულებების პარამეტრებზე.

კრიტერიუმის საზღვრებში, ტკაცანის მაქსიმალური მხები ძაბვა ტოლია:

$$A_{eq} = A\left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{(1+\nu)^2}\right)^{\alpha/2}, \qquad (1.49)$$

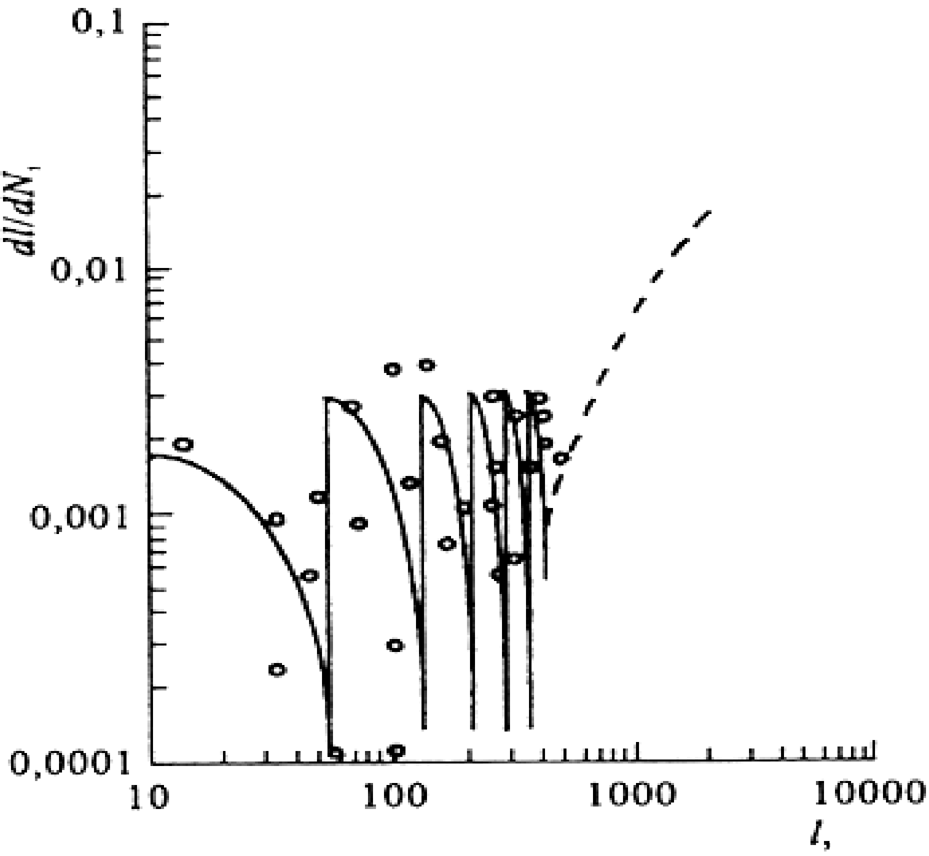
$$B_{eq} = B\left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{(1+\nu)^2}\right)^{\beta/2} \qquad (1.50)$$

რენკის კრიტერიუმის საზღვრებში

$$B_{eq} = B\left[\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{(1+\nu)^2}\right)^{1/2} + \frac{1}{2\lambda}\right]^{\beta} \qquad (1.51)$$

სადაც: ν – პუასონის კოეფიციენტია.

მიკროსტრუქტურული მოკლე ბზარების სიჩქარის ზრდის პროგნოზირების შედეგები მიიღება (1.48) განტოლებიდან, ხოლო ექსპერიმენტალური მნიშვნელობები წარმოდგენილია ნახაზ 1.25-ზე.



ნახ. 1.25 მიკროსტრუქტურული და ფიზიკურად მცირე ბზარების ზრდის მრუდი ციკლური გრეხვისას საშუალო ნახშირბადოვან ფოლადის მგალაითზე.

მიკროსტრუქტურის გავლენა l_R ზრდაზე ბზარის დაღლილობის გაუვრცელებლობისას მოცემულია ცხრილ 1.3-ში.

ცხრილი 1.3.

საშუალონახშირბადოვან ფოლადში გაუვრცელებელი ფიზიკური მცირე ბზარები

დატვირთვის ტიპი	l_R მკმ	$\Delta\gamma_R$	$\Delta\varepsilon_R$
გაჭიმვა-კუმშვა ($\lambda=\Delta\gamma/\Delta\varepsilon=0$)	213	0	0,0041
გაჭიმვა-გრეხა (λ=1,5)	247	0,0046	0,0031
გრეხა ($\lambda=\alpha$)	526	0,0069	0

ხანგამძლეობის გაანგარიშება. წარმოდგენილი მოდელი და პირველი და მეორე სტადიის მოკლე ბზარების დაღლილობის განტოლებების მნიშვნელობების ზრდა,

საშუალებას გვაძლევს დაზიანების ადრეულ სტადიაში გავაკეთოთ პროგნოზირება მყარი სხეულების ხანგამძლეობაზე. მაგალითად, 1 მკმ ხანგამძლეობას N_I პირველ სტადიაში მივიღებთ თუ გავაინტეგრალებთ (1.47) გამოსახულებას l_0=1 მკმ-დან l_{tr}-მდე საზღვრებში. (1.45) ფორმულის გამოთვლით აღიწერება ბზარების ნახტომების რიცხვი, განპირობებული მიკროსტრუქტურული ბარიერის გადალახვისას. (1.48) ინტეგრირება l_{tr}-დან l_c-მდე საზღვრებში, საშუალებას მოგვცემს შევაფასოთ ხანგამძლეობა N_{II} მეორე სტადიაში მიკრობზარების ზრდისას. მთლიანი ხანგამძლეობა გამოითვლება $N_c=N_I+N_{II}$. საშუალონახშირბადოვან ფოლადის წარმოდგენილი მოდელისათვის. მოვიყვანოთ რამოდენიმე გამოთვლის შედეგი: როცა $\Delta\gamma$=0,62%, $N_c=N_I+N_{II}$=860, ხოლო ექსპერიმანტული დაკვირვებებით ხანგამძლეობა N_c=690 ციკლის ტოლია. გარდა ამისა, კომბინირებული დატვირთვებისას გამოთვლილი მნიშნელობების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა, დეფორმაციის სიდიდის გადიდებით მცირდება ხანგამძლეობა.

ამრიგად, მცირე ბზარების ფუნდამენტური გამოკვლევა საშუალებას იძლევა დავადგინოთ მყარი სხეულების ხანგამძლეობა დაზიანების ადრეულ სტადიაში, რაც ხელს შეუწყობს შეიქმნას მაღალი სიცოცხლისუნარიანი ლითონის კონსტრუქციები.

თავი 2. ბზარიანი კონსტრუქციების თეორიული კვლევა სინგულარული ინტეგრალური განტოლებების რიცხვითი ამონახსენი ბზარის განვითარების შესწავლისათვის

რღვევის პროცესი შეიძლება დავყოთ რამოდენიმე სტადიად. მიკრორღვევა, რომელიც წარმოიშობა დეფორმირებულ სხეულზე პირველ სტადიაში, მაკრორღვევა რომელიც ბზარების განვითარებას ახასაითებს. რა თქმა უნდა ამ განსხვავებული პროცესების შესასწავლად აუცილებელია განვიხილოთ ფიზიკის და მექანიკის სხვადასხვა მეთოდები და მოდელები დეფორმირებული მყარი სხეულებისათვის.

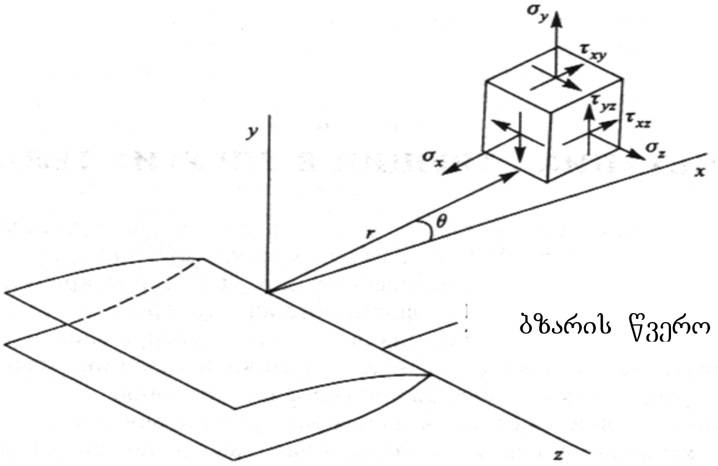
2.2 ბზარის წვეროებზე ძაბვის განსაზღვრა

ბზარიანი დრეკად წრფივი სხეულის დაძაბული მდგომარეობის ანალიზი.

ბზარიანი დრეკადწრფივი სხეულის ძაბვა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

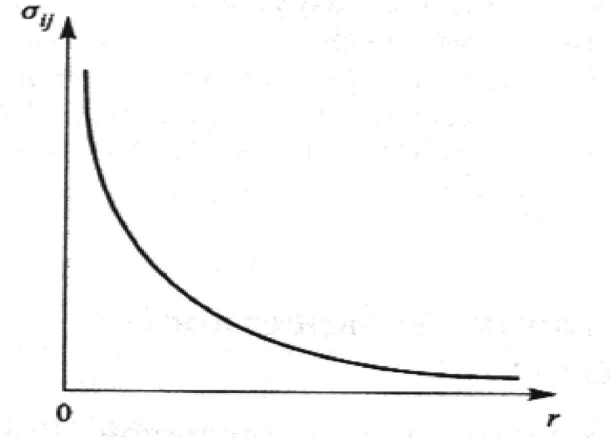
$$\sigma_{ij} = \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}}\right) f_{ij}(\theta) + \text{რეგულარული წევრები} \qquad (2.1)$$

სადაც σ_{ij} – ძაბვის ტენზორია; K– ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი; r და θ – კოორდინატები პოლარულ სისტემაში (ნახ.2.1), f_{ij} – კუთხის განმსაზღვრელი ფუნქციაა (ij=x,y).



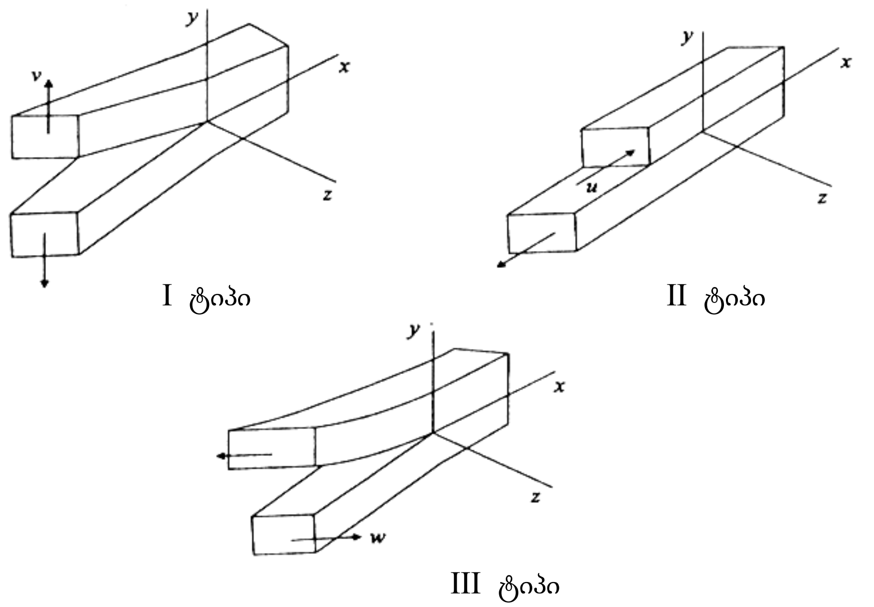
ნახ. 2.1 ბზარის წვეროებში ძაბვის კომპონენტები

(2.1) ფორმულიდან გამომდინარე როცა r→0 (ნახ.2.2) პირველი შესაკრები მიისწრაფის უსასრულობისაკენ. რეგულარული წევრები ძაბვას ახასიათებს ბზარის წვეროებში. ამ ძაბვას აქვს სასრული მნიშვნელობები და ისინი დამოკიდებულნი არიან სხეულების შიგა σ ძაბვაზე.



ნახ. 2.2 დრეკადი ძაბვის განაწილება ბზარის წვეროების წინ როცა f_{ij}=const

არსებობს დატვირთვის სამი ტიპი (ნახ.2.3). პირველი ტიპს მიეკუთვნება ბზარების წარმოქმნა ნორმალური ახლეჩვით, ბზარი განივი ძვრის გამო წარმოადგენს მეორე ტიპს, ხოლო მესამე ტიპია ბზარი გრძივი ძვრით. ამრიგად, სხეულის ბზარი შეიძლება იყოს ამ სამი ტიპიდან ერთ-ერთის ზემოქმედებით, ან მათი კომბინაციით.



ნახ. 2.3 ბზარის ზედაპირზე წერტილების შერევის ტიპები

ბზარის სამივე ტიპს გააჩნია საერთო ძაბვის თავისებურება $1/\sqrt{r}$ წვეროებში. ამ დროს ინტენსივობის კოეფიციენტი k და ფუნქცია f_{ij} დამოკიდებულია ბზარის ტიპზე. ასეთი დამოკიდებულების სიდიდეები აღინიშნებიან I, II და III ინდექსებით. ამრიგად ბზარის წვეროს მიდამოებში ძაბვის კომპონენტები შეიძლება ჩაიწეროს ასიმპტოტური ფორმულების სახით:

$$\lim_{r\to 0}\sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \qquad (2.2)$$

$$\lim_{r\to 0}\sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \qquad (2.3)$$

$$\lim_{r\to 0}\sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \qquad (2.4)$$

შესაბამისად I,II და III ტიპებისათვის.

განვიხილოთ ამოცანა, რომელიც შემდგომში მდგომარეობს:

შევაფასოთ ძაბვის სინგულარების ზონის ფარდობითი ზომა გამჭოლი ბზარის წვეროზე, შემოუსაზღვრული ფირფიტისთვის მინიმალური σ ძაბვის პირობებში.

ჩავთვალოთ, რომ ნორმალური ძაბვა ბზარის წვეროს წინ მისი გავრცელების გასწვრივ (θ=0 და $f_{yy}^{(I)}=1$) შეიძლება იყოს აპროქსიმირებული დამოკიდებულებით:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \sigma$$

განსახილველი სხეულის ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის ფორმულის გათვალისწინებით $K_I = \sigma\sqrt{2\pi l}$, ძაბვის σ_{yy} გამოსახულება მიიღებს სახეს:

$$\sigma_{yy} = \sigma\left(\frac{l}{\sqrt{2r}} + 1\right)$$

იმისათვის, რომ სინგულარულმა მდგენელმა გადააჭარბოს რეგულარულს, საჭიროა შესრულდეს პირობა $r \ll l$. შევაფასოთ სინგულარის ზონის ზომა N_s როგორც არე, რომელშიც

$$\sqrt{\frac{l}{2r_s}} = 5$$

აქედან მივიღებთ, რომ სინგულარული r_s ზომა ტოლია ℓ/50. მაგალითად თუ ბზარის ზომა ℓ=10მმ, მაშინ r_s შეადგენს მხოლოდ 0,2მმ.

2.1.2 წრფივი სუპერპოზიციის პრინციპი.

კომბინირებული ტიპის ბზარების შემთხვევაში ძაბვის კომპონენტების განსასაზღვრად გამოიყენებენ წრფივი სუპერპოზიციის პრინციპს

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \qquad (2.5)$$

ამ დროს უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ნორმალური ძაბვები იკრიბება ნორმალურ ძაბვებთან, ხოლო მხები-მხებთან. სუპერპოზიციის პრინციპი შეიძლება განვიხილოთ ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტების ანალიზის საფუძველზე. ანალოგიურად, ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი შეიძლება დაიწეროს ჯამის სახით:

$$K_I = K_I^{(A)} + K_I^{(B)} + K_I^{(C)} + \dots$$

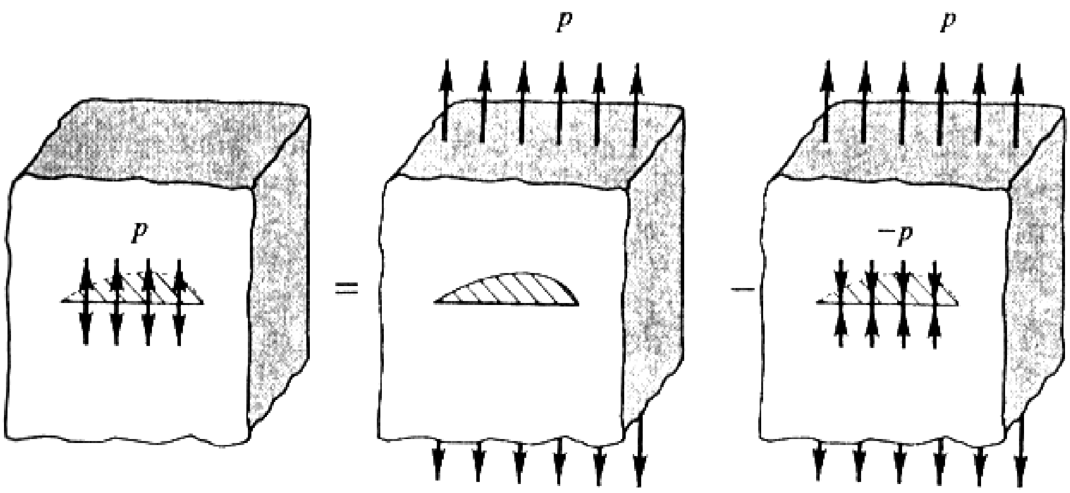
მაგრამ $$K_I \neq K_I + K_{II} + K_{III}\,.$$

განვიხილოთ მაგალითი სხეულზე წამოქმნილი განაპირა ბზარის შემთხვევაში, როცა სხეული დატვირთულია ღერძული ძალით და მღუნავი მომენტით. ორივე დატვირთვა საშუალებას იძლევა სხეულის ზედაპირზე მოხდეს ბზარების შერევა, რომელიც შეესაბამება I ტიპს. შესაბამისად ინტენსივობის კოეფიციენტი შეიძლება მოცემული იქნას შემდეგი სახით:

$$K_I = K_I^{(\text{გამჭ})} + K_I^{(\text{მღუნ})}$$

გავაშუქოთ სუპერპოზიციის პრინციპის გამოყენება, განუსაზღვრელი ზომის სხეულის ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის მაგალითზე, ბზარის სიღმე ℓ მოქმედი წნევა P, (ნახ. 2,4.ა). ამოცანის ამოხსნის ფორმულირება წარმოვადგინოთ სუპერპოზიციის ორი ცნობილი შემთხვევით:

- განუსაზღვრელი ზომის სხეულის ზედაპირზე ბზარზე მოქმედი ძაბვა p, მოდებულია ბზარიდან შორს (ნახ. 2.4.ბ)
- განუსაზღვრელი ზომის სხეულის ზედაპირზე ბზარზე მოქმედი ძაბვა p, მოდებულია ბზარის ზედაპირზე.



ა ბ გ

ნახ. 2.4 ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის განსაზღვრა წრფივი სუპერპოზიციის დახმარებით

ამ შემთხვევაში საძიებელი კოეფიციენტი შეიძლება წარმოავადგინოთ შემდეგი სახით:

$$K_I^{(ა)}=K_I^{(ბ)} - K_I^{(გ)}$$

დატვირთვის სისტემა სხეულზე (გ) ფაქტიურად იძლევა სხეულს ბზარის გარეშე, შესაბამისად $K_I^{(ბ)}=0$. ხოლო (ბ)-თვის გვექნება $K_I^{(ბ)}=1{,}12\frac{2}{\pi}p\sqrt{\pi l}$. ამრიგად ვღებულობთ:

$$K_I^{(ა)}=1{,}12\frac{2}{\pi}p\sqrt{\pi l}-0=1{,}12\frac{2}{\pi}p\sqrt{\pi l}\ .$$

<u>ასიმპტოტური ფორმულები</u>

ჩავწეროთ ასიმპტოტური ფორმულები დეკარტის კოორდინატებში, ბზარების წვეროებზე ძაბვის I ტიპის კომპონენტებისათვის:

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_y\\ \sigma_x\end{array}\right\} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 \pm \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3}{2}\theta\right);$$
$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3}{2}\theta \qquad (2.6)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} 0 \text{ (ძაბვის ზედაპირული მდგომარეობა)} \\ \nu\left(\sigma_x + \sigma_y\right) \text{ (ზედაპირული დეფორმაცია)} \end{cases}$$
$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

ჰუკის კანონის გამოყენებით:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right],$$
$$\varepsilon_x = \frac{\partial ux}{\partial y} = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] \qquad (2.7)$$

(2.7) ფორმულის გაინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ გადაადგილების კომპონენტებს. ბრტყელი დეფორმაციის დროს ε_z=0, $\sigma_z = \nu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)$ და გადაადგილების კოეფიციენტები ბზარის წვეროებზე მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$u_x = \frac{K_I}{2G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[k - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right],$$
$$u_y = \frac{K_I}{2G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[k + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \qquad (2.8)$$

სადაც: G – ძვრის მოდულია, $k = 3 - 4\nu$ ბრტყელი დეფორმაციისათვის და $k = \left(3-\nu\right)/\left(1+\nu\right)$ ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობისათვის. გავამახვილოთ ყურადღება ბზარის ხაზის გასწვრივ გავრცელებისას (y=θ=0) მხები ძაბვა ტოლია ნულის, ხოლო ნორმალური ძაბვა

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \qquad (2.9)$$

წარმოადგენს ძირითადს.

სხვა სახის ბზარებისათვის ასიმპტოტურ ფორმულებს ბზარის წვერთან ახლოს აქვთ განსხვავებული სახე II ტიპისათვის:

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\left(2+\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3}{2}\theta\right),$$
$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3}{2}\theta \qquad (2.10)$$
$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3}{2}\theta\right),$$

ხოლო III ტიპისათვის:

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2},$$
$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2} \qquad (2.11)$$

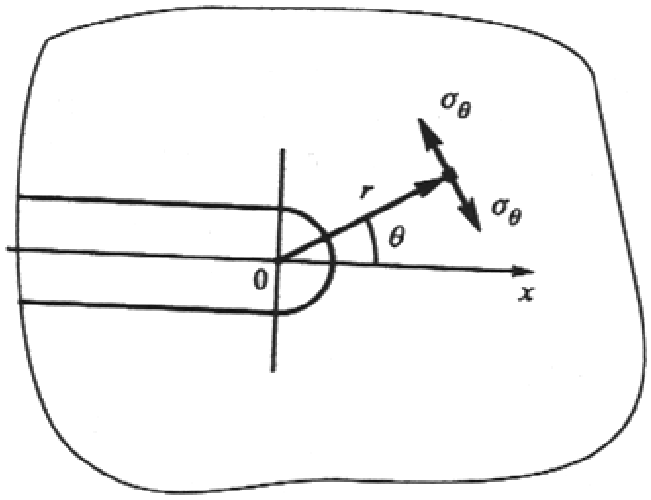
ასიმპტოტური ფორმულებიდან გამომდინარე, ძაბვის მდგომარეობა ბზარის გარშემო სრულად განისაზღვრება ერთი პარამეტრით – ძაბვის ინტენსოვობის კოეფიციენტით. ძაბვის კომპონენტები იზრდება k კოეფიცინეტის პროპორციულად. თუ ინტენსოვობის კოეფიციენტი ცნობილია, შეიძლება გამოვთვალოთ ძაბვის ყველა კომპონენტი. ამრიგად ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი წარმოადგენს რღვევის მექანიკის ერთ-ერთ ძირითად პარამეტრს.

ბზარის წვეროების გარშემო დაძაბულობის ველი განსაზღვრავს ბზარის ტრაექტორიას, როცა ის აღწევს კრიტიკულ მდგომარეობას. განვიხილოთ ეს მოვლენა, გავითვალისწინოთ შემდეგი ჰიპოთეზები:

- ბზარი ვრცელდება რადიუსის მიმართულებით;
- ბზარის მიმართულების ზრდა უდიდესი გამჭიმავი ძაბვის მიმართულების პერპენდიკულარულია.

წარმოდგენილი ჰიპოთეზებიდან გამომდინარე განსახილველი ძაბვის ხარისხად შეიძლება მივიღოთ ძაბვა σ_θ. კუთხეს θ ბზარის საწყისი გავრცელებისას აქვს სახე:

$$\left.\frac{d\sigma_\theta}{d\sigma_0}\right|_{\theta=\theta_0} = 0$$



ნახ. 2.5

განვიხილოთ სხეულის სიმეტრიული დატვირთვა (ნახ. 2.5) ამ შემთხვევაში $K_I \neq 0$, $K_{II} \neq 0$. ასიმეტრიული ფორმულები გაჭიმვის ძაბვის შემთხვევაში იღებენ სახეს:

$$\sigma_\theta = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos^3 \frac{\theta}{2} \qquad (2.12)$$

ამრიგად ვიღებთ შემდეგ პირობას:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{3}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(-\sin \frac{\theta_0}{2} \right) = 0 \qquad (2.13)$$

საიდანაც გამოდის 2 შედეგი: $\theta_0 = \pm\pi$ და $\theta_0 = 0$.

2.2 ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტის გამოთვლის მიახლოებითი მეთოდები

იმისათვის, რომ რღვევის მექანიკის ამოცანებში გამოვიყენოთ ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი, ეს პარამეტრი უნდა გამოვთვალოთ. განუსაზღვრელი სიბრტყისათვის ზუსტი გადაწყვეტა, როცა გამჭოლი ბზარის სიგრძე ტოლია $2l$ მნიშვნელობის k_1 კოეფიციენტისათვის გვაქვს ფორმულა:

$$k_I = \sigma \sqrt{\pi l} \qquad (2.14)$$

ძაბვის ინტენსიობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია არა მარტო სხეულის ძაბვაზე σ და ბზარის სიგრძეზე, არამედ დატვირთვის სქემაზე და სხეულის გეომეტრიულ ფუნქციაზე.

$$k_I = \sigma\sqrt{\pi l}\,Y\left(\frac{l}{B}\right) \qquad (2.15)$$

სადაც: $Y\left(\frac{l}{B}\right)$– დატვირთვის სქემაზე შესწორებაა, B – სხეულის განივი ნაკადის მახასიათებელი ზომაა. სხეულის დატვირთვის სქემის გავლენა ინტენსოვობის კოეფიციენტზე წარმოვიდგინოთ შემდეგნაიარად, ავიღოთ ცილინდრი D დიამეტრით, სადაც ბზარის სიღმე l-ის ტოლია:

- გაჭიმვა σ ძაბვებით

$$k_I = \sigma\sqrt{\pi l}\left(\frac{D}{d}+\frac{1}{2}+\frac{3d}{8D}-\frac{0,3}{D^2}+\frac{0,7d^3}{D^3}\right)\frac{\sqrt{D/d}}{2} \qquad (2.16)$$

- გრეხის მომენტი M

$$k_{III} = 16\sigma\sqrt{\pi l}\left(\frac{D^2}{d^2}+\frac{d}{2D}+\frac{3}{8}+\frac{5d}{16D}+\frac{35d^2}{128D^2}+\frac{21d^3}{D^3}\right)\frac{3}{8\pi D^3}\sqrt{\frac{D}{d}} \qquad (2.17)$$

სადაც: $d=D-2l$. სხეულის გეომეტრიულ ცვლას მივყავართ ინტენსიურობის კოეფიციენტის ფორმულის შეცვლამდე, მაგალითად თუ გამჭიმავ ფიფრიტებს შორის სიგანე 2B, ხოლო ორი კიდურა ბზარის სიგრძე l:

$$k_I = \sigma\sqrt{\pi l}\,\frac{1,12-0,61\lambda+0,13\lambda^3}{\sqrt{1-\lambda}} \qquad (2.18)$$

სადაც: $\lambda=l/B$.

ინტენსოვობის კოეფიციენტის განსაზღვრა იმ სხეულებისათვის, რომლებსაც გააჩნიათ რთული გეომეტრიული სტრუქტურა დაფუძნებულია, როგორც დრეკადობის თეორიის ანალიზურ მეთოდებზე, ასევე რიცხვით და ექსპერიმენტალურ მეთოდებზე, რომლებიც გვაწვდიან ბზარის წვეროს გარშემო გადაადგილებაზე, დეფორმაციასა და ძაბვაზე ინფორმაციას. ყოვლივე ზემოთ თქმული საშუალებას მოგვცემს განვსაზღვროთ k კოეფიცინენტი. აგრეთვე ძაბვის ინტენსოვობის კოეფიციენტის გამოსათვლელად შეიძლება გამოყენებული იქნას ანალიზური მიახლოების მეთოდი. განვიხილოთ რამოდენიმე მაგალითი:

კონცენტრაციის კოეფიციენტის საშუალებით ძაბვის გამოთვლა.

I ტიპის შემთხვევაში, როცა ბზარის რადიუსი ρ მცირეა ძაბვას აქვს სახე:

$$\left.\begin{matrix}\sigma_y\\ \sigma_x\end{matrix}\right\} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\left[\cos\frac{\theta}{2}\left(1\pm\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3}{2}\theta\right)\pm\frac{\rho}{2r}\cos\frac{3}{2}\theta\right],$$
$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\left[\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3}{2}\theta-\frac{\rho}{2r}\sin\frac{3}{2}\theta\right] \qquad (2.19)$$

აქ პოლარული კოორდინატები განლაგებულია ისე რომ, $r \geq \rho/2$ როცა θ=0 და $r = \rho/2$ ადგილი აქვს ერთღერძა გაჭიმვას:

$$\sigma_y = \frac{2K_1}{\sqrt{\pi\rho}}, \quad \sigma_x = \tau_{xy} = 0 \qquad (2.20)$$

სხვა მხრივ ძაბვის კონცენტრაციის თეორიის ფარგლებში $\sigma_y = K_t\sigma$ როცა ρ მიისწრაფის ნულისკენ (2.20)-დან მივიღებთ:

$$K_1 = \lim_{\rho\to 0}\frac{1}{2}\sigma_y\sqrt{\pi\rho} = \lim_{\rho\to 0}\frac{1}{2}K_t\sigma\sqrt{\pi\rho} \qquad (2.21)$$

როცა ძაბვის კონცენტრაციის K_t კოეფიციენტი ტოლია $\left(1+2\sqrt{\ell/\rho}\right)$ სადაც ℓ ელიფსის დიდი ნახევარღერძია მაშინ (2.21) ფორმულიდან მივიღებთ:

$$K_1 = \lim_{\rho\to 0}\frac{1}{2}\sigma_y\sqrt{\pi\rho} = \lim_{\rho\to 0}\frac{1}{2}\left(1+2\sqrt{\frac{l}{\rho}}\right)\sigma\sqrt{\pi\rho} = \sigma\sqrt{\pi l} \qquad (2.22)$$

2.3. რღვევის ძალური და ენერგეტიკული კრიტერიუმები

დრეკადობის და პლასტიკურობის თეორია გვაძლევს საშუალებას გადავწყვიტოთ პარამეტრული ამოცანები დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაში მყოფი გამჭოლი ბზარისათვის. მიღებულ მნიშვნელობებში ბზარების ზომები შედის პარამეტრის სახით. ამასთან იგნორირებულია ფუნქციონალური კავშირი გარეთა

ძაბვებისა ბზარის ზომასთან. ასეთი ამოცანის ამოხსნისათვის აუცილებელია დამატებით წამოავაყენოთ პირობები: რღვევის კრიტერიუმები. რღვევის კრიტერიუმები გვაძლევს საშუალებას დავადგინოთ გარეთა ძაბვა, რომლის დროსაც ჭრილი გადადის ბზარში. ამ დროს სხეულის მდგომარეობა იწოდება კრიტიკულად. ამრიგად რღვევის კრიტერიუმი განსაზღვრავს პირობას, სხეულის კრიტიკული მდგომარეობის შესახებ.

გრიფიტსის რღვევის ენერგეტიკული კრიტერიუმი

გრიფიტსის პრინციპული მიდგომა წარმოადგენს რღვევის ძირითადი პროცესების იგნორირებას, ბზარის წვეროების მცირე გარემოში და ყურადღებას ამახვილებს სხეულის ენერგიის ცვლილებაზე ბზარის გავრცელებისას.

განვიხილოთ ერთნაირი სისქის განუსაზღვრელი ზედაპირი ბზარის სიგრძით 2ℓ-ი, ძაბვა ტოლია σ. ძაბვა მოქმედებს ბზარის პერპენდიკულარული მიმართულებით, რღვევის კრიტერიუმი ფორმულირდება შემდეგი სახით: ბზარი იწყებს გავრცელებას მაშინ, როდესაც მატულობს სხეულის ზედაპირის ენერგია, იმატებს ბზარის სიგრძე, კომპენსირდება შესაბამისად დრეკადი დეფორმაციის პოტენციალური ენერგია, ზღვრული წოსასწორობისას დრეკადი სხეულის ენერგეტიკული ბალანსი იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d\Pi}{dl} + \frac{d\Gamma}{dl} = 0 \qquad (2.23)$$

სადაც: Π – დრეკად-დეფორმირებული სხეულის ბზარის პოტენციალური ენერგიაა. Γ – სხეულის ზედაპირული ენერგიაა. აქ იგულისხმება, რომ სხვა სახის ენერგიები უგულებელყოფილია.

გრიფიტსის რღვევის კრიტერიუმი დაფუძნებულია ამოცანის ენერგეტიკულ ფორმულირებაზე:

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi\sigma^2 l^2}{E} \qquad (2.24)$$

სადაც: Π_0 – ბზარის გარეშე დეფორმირებული სხეულის პოტენციური ენერგიაა. ზედაპირული ენერგია, რომელიც დაფუძნებულია ზედაპირზე ორი ბაზრის წაროქმნასთან ტოლია:

$$\Gamma = 4\gamma_s l \qquad (2.25)$$

სადაც: γ_s - ზედაპირის კუთრი ენერგიაა.

ენერგეტიკულ ბალანსი (2.23)-ში გავითვალისიწნოთ (2.24) და (2.25) გამოსახულებები Π და Γ გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ ფუნქციონალური დამოკიდებულება კრიტიკულ ძაბვასა და ბზარის სიგრძეს შორის:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi l}} \qquad (2.26)$$

(2.26)-ს ეწოდება გრიფიტსის ფორმულა. დრეკადი დეფორმაციისას გრიფიტსის ფორმულა თუ E–ს შევცვლით $E/(1\text{-}\gamma^2)$–ით მიიღებს სახეს:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi\left(1-\nu^2\right)l}} \qquad (2.27)$$

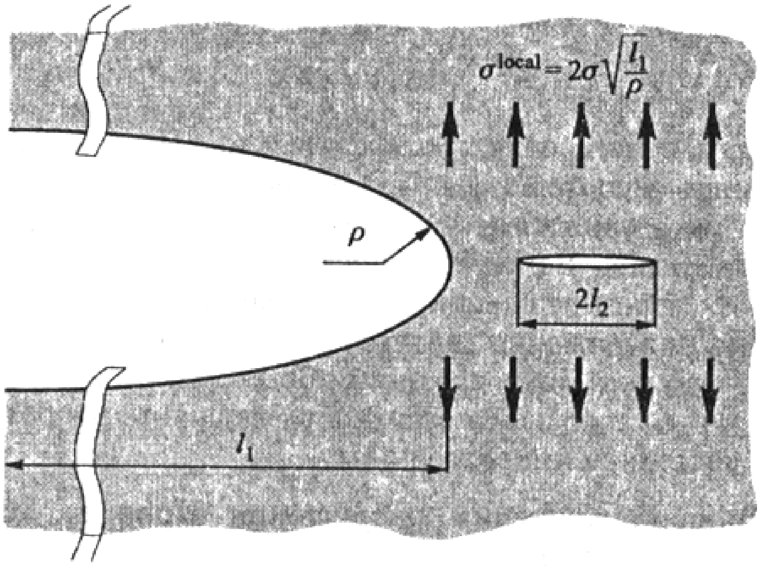
(2.26) და (2.27) ფორმულები მკაცრად განსაზღვრულია მკაფიოდ მყიფე სხეულებისათვის.

ირვინ-ოროვანის კვაზიმყიფე კონცეფციამ საშუალება მოგვცა გაგვეზარდა გრიფიტსის თეორიის გამოყენების საზღვრები. ამრიგად, წარმოიშვა ზედაპირის ეფექტური ენერგია $\gamma = \gamma_s + \gamma_p$ ამასთან კრიტიკული ძაბვა ზედაპირულ დეფორმაციაზე განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\left(\gamma_s + \gamma_p\right)}{\pi\left(1-\nu^2\right)l}} \qquad (2.28)$$

სადაც: γ_p - ენერგიაა, რომელიც იხარჯება პლასტიკური დეფორმაციის წარმოქმნაზე ბზარის ზედაპირზე. ლითონის კონსტრუქციების მნიშვნელობა γ_p ბევრად აღემატება ენერგიის γ_s მნიშვნელობას.

განვიხლოთ უსასრულო ზომის ფირფიტა, გამჭოლი მიკრობზარით $2\ell_1$ სიგრძით და მისი წვეროს ρ სიმრუდით. მიკრობზარების წინ წარმოიქმნება მიკრობზარი დისკისებრი სახით, რომლის დიამეტრია $2\ell_2$ (ნახ. 2.6)



ნახ. 2.6 ბზარის ფირფიტის მოდელი

მიკრობზარების კრიტიკული ზომის შეფასება, რომლის დროსაც ხდება ფირფიტების რღვევა შეესაბამება გრიფიტსის კრიტერიუმს. კრტიკული ნორმალური ძაბვა σ_c გამჭოლი ბზარისათვის განისაზღვრება შემდეგი ფორმულიდან (2.26):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\mu_s}{\pi l_1}} \qquad (2.29)$$

მაშინ ლოკალური ძაბვა $\sigma^{ლოკ}$ მოქმედი მიკრობზარების წვეროზე სიმრუდის რადიუსით ρ, ძაბვათა კონცენტრაციის მიხედვით შეიძლება შეფასდეს შემდეგი სახით:

$$\sigma^{ლოკ} = \sigma_c\left(1 + 2\sqrt{\frac{l_1}{\rho}}\right) \qquad (2.30)$$

კრიტიკული ძაბვა წრიული ბზარებით (ნახ. 2.6) გრიფიტსის კრიტერიუმების მიხედვით მიიღებს სახეს:

$$\sigma^{ლოკ} = \sqrt{\frac{\pi E\mu_s}{2(1-\nu^2)l_2}} \qquad (2.31)$$

ამრიგად, განსახილველი სხეულის კრიტიკული მდგომარეობა მიიღწევა შემდეგი პირობიდან:

$$\sqrt{\frac{2E\mu_s}{\pi l_1}}\left(1 + 2\sqrt{\frac{l_1}{\rho}}\right) = \sqrt{\frac{\pi E\mu_s}{2(1-\nu^2)l_2}} \qquad (2.32)$$

საიდანაც, როცა $\rho \ll \ell_1$ მივიღებთ მიკრობზარების კრიტიკულ ზომას:

$$l_2 = \frac{\pi^2 \rho}{16\left(1-\nu^2\right)} \qquad (2.33)$$

მაგალითად, პუასონის კოეფიციენტი მასალისათვის μ=0,3 ბზარის კრიტიკული ზომა არის ℓ_2=0,68ρ.

ავღნიშნავთ, რომ ჩვენს მსჯელობაში მივიღეთ რამოდენიმე დაშვება. პირველი, დავუშვით, რომ ლოკალური ძაბვა $\sigma^{ლოკ}$ მაკრობზარის წვეროზე ერთნაირია, მეორე წინასწარ განსაზღვრული იყო, რომ მაკრობზარების ზედაპირი გავლენას არ ახდენს მიკრობზარების კრიტიკულ მდგომარეობაზე.

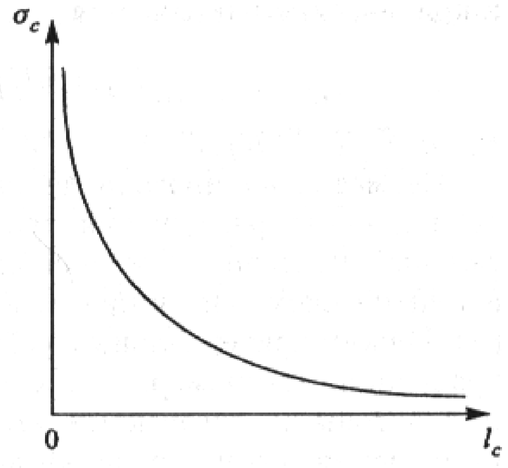
2.3.2 ირვინის რღვევის ძალური კრიტერიუმი.

ძაბვის ინტენსიურობის კოეფიციენტი k მთლიანად აკონტროლებს დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობას ბზარის წვეროების მცირე მანძილებზე. რამდენადაც ბაზრის გავრცელებისას რღვევის პროცესი გაწონასწორებულია წვეროს შემოგარენში, კოეფიციენტმა k ასიმეტრიულ ფორმულებში (მაგ. (2.1.6) I ტიპის ბზარებისათვის) უნდა აკონტროლოს ბზარის წარმოქმნის პროცესი. ასიმპტოტური ფორმულებიდან გამომდინარებს, რომ ძაბვის ინტენსივობის ზრდას მივყავართ ბზარების წვეროებამდე. k კოეფიციენტი რაღაც კრიტიკულ მნიშვნელობისათვის ბზარის წვეროებზე აღწევს კრიტიკულ მიშვნელობას და ბზარი იწყებს გავრცელებას. ამრიგად, ბზარი გავრცელებას იწყებს მაშინ, როცა ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას:

$$K = K_c \qquad (2.34)$$

k_c წარმოადგენს მყარი სხეულის მექანიკურ მახასიათებელს, მას ხშირად უწოდებენ ბზარმედეგობას.

(2.32) რღვევის კრიტერიუმი საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ სხეულის ზღვრული მდგომარეობა, თუ დავადგენთ, ფუნქციონალურ კავშირს კრიტიკულ ძაბვას σ_c და ბზარის სიგრძეს ℓ შორის. მაგალითად: (2.32) შემოუსაზღვრელი გაჭიმული ზედაპირის კრიტერიუმისათვის $\sigma_c\sqrt{\pi l} = K_c$ და შედეგად $\sigma_c = K_c / \sqrt{\pi l}$ (ნახ. 2.7).



ნახ. 2.7 კრიტიკული ძაბვის დამოკიდებულების სქემა ბზარის სიგრძეზე

<u>რღვევის კრიტერიუმები შერეული დატვირთვისას</u>

შერეული დატვირთვისას სხეულის ბზარის წვეროებზე წარმოიქმნება რთული დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა, რომელიც განისაზღვრება ძაბვის ინტენსიურობის კოეფიციენტებით K_I, K_{II}, K_{III}, და მყარი სხეულის მუდმივა C_i:

$$F(K_I, K_{II}, K_{III}, C_i) = 0 \qquad (i = 1,2,3...) \qquad (2.35)$$

(2.35) განტოლება K_I, K_{II}, K_{III} კოეფიციენტები გვაძლევს რამოდენიმე ზღვრულ მნიშვნელობებს. ამ მნიშვნელობებს აღწევს ბზარი, როდესაც იწყება რღვევა. (ნახ. 2.5) ნაჩვენებია რომ ბზარი ვრცელდება რადიუს-ვექტორის r-ის მიმართულებით, რომლის კუთხის კრიტიკული მნიშვნელობა $\theta = \theta_c$,რომლისთვისაც გარემომცველი ძაბვა σ_θ იძლევა კოეფიციენტის მაქსიმალურ მნიშვნელობას $K_{I\theta}$ ამიტომ კრიტიკული მნიშვნელობა σ_c განისაზღვრება შემდეგი პირობიდან:

$$K_I(\sigma_c, l, \theta_c) = K_{Ic} \qquad (2.36)$$

ანალოგიურად ფორმულირდება დეფორმაციული და ენერგეტიკული კრიტერიუმები ნორმალური ახლეჩვისას. მაგალითად გ.პ. ჩერეპანოვის ენერგეტიკული კრიტერიუმების შესაბამისად ბზარი ვრცელდება ენერგიის ნაკადის მოძრაობის

ვექტორის მიმართულებით, წვეროსაკენ. ამ დროს კრიტიკული კუთხე გამოისახება ფორმულით:

$$tg\theta_c = -\frac{2n}{n^2+1} \qquad (2.37)$$

ძაბვის კრიტერიუმი არის:

$$K_1^4 + 6K_I^2K_{II}^2 + K_{II}^4 = K_{Ic}^4 \qquad (2.38)$$

სადაც $n = |K_{II}|/K_I$.

მიუხედავათ სხეულის რღვევის თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევებისა, რღვევის უნივერსალური კრიტერიუმი ჯერ კიდევ არ არის ფორმირებული. ამიტომ ანალოგიური აღწერისას ექსპერიმანეტალური მნიშვნელობების გამოსათვლელად ხშირად გამოიყენება ემპირიული განტოლებები. მაგალითად: გამჭიმავი და ძვრის ერთდროული დატვირთვისას (K_I=0, K_{II}≠0, K_{III}=0) რღვევის კრიტერიუმი შეიძლება წარმოვიდგონით შემდეგი სახით:

.

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^a + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^b = 1 \qquad (2.39)$$

სადაც: a და b მუდმივებია. თუ განვიხილავთ ბზარების (I და II ტიპებს) (2.39) დამოკიდებულება იძლევა რღვევის შესაბამის კრიტერიუმებს: როცა K_I=0, K_{II}≠0 მივიღებთ: K_{II}= K_{IIc}.

2.4. ირვინის რღვევის ძალური კრიტერიუმის ექვივალენტურობა გრიფიტსის ენერგეტიკულ კრიტერიუმთან

დრეკადი ენერგიის ინტენსიურობა, გამოთავისუფლებული ზედაპირზე რომლის სიდიდეა ds შემოიტანა ირვინმა შემდეგი ფორმით:

$$G = -\frac{d\Pi}{dS} \tag{2.40}$$

ადრე გამოთქმული მოსაზრებებით გრიფიტსის კონცენტრაციიდან გამომდინარე ზედაპირული ბზარის გავრცელების გაზრდიდან გამოთავისუფლებული ენერგიის ინტენსივობა გადადის ხელახლა წარმოქნილი ბზარების ზედაპრზე

$$G_c = 2\gamma \tag{2.41}$$

ირვინის ძალური კრიტერიუმი, ისე როგორც გრიფიტსის ენერგეტიკული კრიტერიუმი, გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ კრიტიკული ძაბვა, რომელიც იწვევს სხეულის რღვევას და ბზარებს. ორივე კრიტერიუმისათვის ეს ძაბვა უკუპროპორციულია $\sqrt{l}$. ამრიგად, შეიძლება განისაზღვროს ამ კრიტერიუმის ექვივალენტობა.

გამოვთვალოთ ენერგიის ნაკადი ბზარის წვეროზე შემდეგნაირად. ზედაპირზე მოქმედებს ძლიერ ცვლადი ძაბვა, წარმოქმნილი მყარ სხეულში ბზარის წვეროს გარშემო. ბზარის გაფართოება თანდათან ცილდება ერთმანეთს. ამ დროს სრულდება მუშაობა ძალა $\sigma_y dx$ გადადგილებაზე U_y რომელიც ტოლია ენერგიის ნაკადის G:

$$G = -\frac{1}{2}\int_0^1 \sigma_y 2u_y dx \tag{2.42}$$

გამოვიყენოთ ასიმპტოტური ფორმულები I ტიპის ბზარებისათვის θ=0-სთვის σ_y; ხოლო θ=π-სთვის u_y

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}}, \quad u_y = \frac{4(1-\nu^2)K}{E}\sqrt{\frac{1-x}{2\pi}} \tag{2.43}$$

თუ (2.43) ჩავსვავთ (2.42) მათემატიკური გარდაქმნებით მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებებს:

$$G = \frac{(1-\nu^2)K^2}{E}$$
$$G = \frac{K^2}{E} \tag{2.44}$$

ამრიგად, განხილული მიდგომა (2.44) საშუალებას იძლევა დავადგინოთ ძალური კრიტერიუმის ექვივალენტობა ირვინის რღვევის ენერგეტიკულ კრიტერიუმთან:

$$G_{Ic} = \frac{\left(1-\nu^2\right)K_{Ic}^2}{E}$$
$$G_c = \frac{K_c^2}{E} \qquad (2.45)$$

K_{Ic} სიდიდეს ეწოდება რღვევის სიბლანტე, იგი განსაზღვრავს მყარი სხეულის უნარს წინააალმდეგობა გაუწიოს ბზარის გავრცელებას მექანიკური და სხვა ქმედებებისაგან.

საერთოდ დრეკადი ენერგიის ნაკადი ბზარის წვეროებში ბრტყელი დეფორმაციის პირობებში გამოისახება ფორმულით:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E}K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E}K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E}K_{III}^2 = G_I + G_{II} + G_{III} \qquad (2.46)$$

<u>ირვინის დამყოლობის ფორმულა</u>

განვიხილოთ დრეკადი სხეული ბზარით, შიგა ძალა P=const. დაუშვათ ბზარის სიგრძე ℓ, ამ ძალის ზემოქმედებით მცირე მატება dℓ. ამიტომ P ასრულებს მუშაობას dA=PdΔ.

მოცემულ შემთხვევაში დრეკადი ენერგიის ნაკადი ბზარის წვეროებში გამოითვლება ფორმულით:

$$Gdl = dA - dW \qquad (2.47)$$

სადაც: W – დრეკადი სხეულის ენერგიაა, წარმოქმნილი განსახილველი მდგომარეობის ფუნქციის შესაბამისად ℓ სიგრძის ბზარისათვის. (2.47)-დან გამომდინარე როცა ℓ= const მივიღებთ:

$$W = \frac{1}{2}P\Delta$$

მივიღოთ მხედველობაში წრფივი დამოკიდებულება

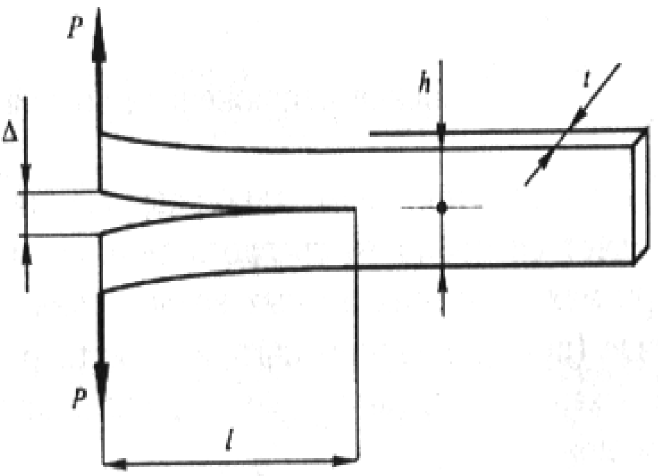
$$\Delta = \lambda(l))P \qquad (2.48)$$

სადაც: $\lambda(\ell)$ – დამყოლი სხეულის ბზარის სიგრძეა ℓ, (2.48)-დან გამომდინარე dA დამოკიდებულება (2.47) გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$G = P\frac{d}{dl}\left(P\lambda\right) - \frac{1}{2}\frac{d}{dl}\left(P^2\lambda\right) = P^2\frac{d\lambda}{dl} - \frac{1}{2}P^2\frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{2}P^2\frac{d\lambda}{dl} \qquad (2.49)$$

(2.49) ფორმულას ეწოდება დამყოლობის ირვინის განტოლება.

განვსაზღვროთ დრეკადი სხეულის ენერგიის ნაკადი ბზარის წვეროში, რომელიც წარმოადგენს ორკონსოლიან კოჭს (ნახ. 2.8)



ნახ. 2.8 ორკონსოლიანი ბზარიანი კოჭის ბზარის წვეროში ენერგიის განსაზღვრის სქემა

კოჭის ღუნვის თეორიიდან როცა $\ell>>h$ ბერტყელი დაძაბული დრეკადი ძაბვის მდგომარეობა შემდეგნაირია:

$$\Delta = \frac{2Pl^3}{3EI}, \quad \mathrm{I} = \frac{\mathrm{th}^3}{12}$$

დავწეროთ დრეკად დამყოლობის ირვინის ფორმულა (2.51)-დან $\lambda = \dfrac{3l^3}{3EI}$, t სისქის ნიმუშისათვის მივიღებთ:

$$G=\frac{P^2}{2t}\frac{d\lambda}{dl}=\frac{P^2}{t}-\frac{l^2}{EI}P=\frac{12P^2l^2}{Et^2h^3}$$

(2.44) ინტენსივობის კოეფიციენტი ნიმუშიშათვის მიღებს სახეს:

$$K=2\sqrt{3}\frac{P}{t}\frac{l}{h^{3/2}}$$

2.5. სინგულარული ინტეგრალური განტოლებების რიცხვითი ამოხსნები

ამ პარაგრაფში განიხილება პირველი გვარის სინგულარული ინტეგრალური განტოლების

$$\frac{1}{\pi i}\int_L\frac{\varphi_0(t)dt}{t-t_0}+\frac{1}{\pi i}\int_L K(t_0,t)\varphi_0(t)dt=f(t_0),(t_0\in L) \qquad (2.50)$$

რიცხვითი ამოხსნის საკითხები გახნილი კონტურების შემთხვევაში, გარკვეულ დაშვებებში საძებნი ამონახსნის ფუნქციატა კლასის მიმართ. ასეთ განტოლებებზე მიიყვანება ისეთი ამოცანა სიბრტყეზე ჭრილების შემთხვევაში (შესაბამისად, კონფორმულად გადამსახავი ფუნქციის აგების ღეროსა და გრეის ამოცანები), სიბრტყის ტემპერატურული სტაციონალური ამოცანა, ნებისმიერად განლაგებული ბზარების შემთხვევაში, ასევე დრეკადობის თეორიის ძირითადი სასაზღვრო ამოცანები.

მრავალი ავტორის მიერ განხილულია სხვადასხვა სქემები ასეთი განტოლებების რიცხვითი ამოხსებისათვის, მათ შორის უფრო რთულ შემთხვევებში, როცა განტოლების ინდექსი უარყოფითი რიცხვი, ამ მხრივ განსაკუთრებით აღსანიშნავია, ა. ჯიშკარიანის [22-24], ი. ლიფანოვის [56-58], ბ. მუსაევის [45-47] შედეგები. მ. ლავრენტიევის, ა. კალანდიას, ი. ეფრემოვის, შედეგების მიმიხოლვა განხილულია [21] შრომაში. [62], [63], [57-58], შრომებში მოცემულია 2.52 სახის განტოლებებისათვის ე.წ. დისკრიტულ განსაკუთრობულობათა მეთოდის დაფუძნება.

მიუხედავად ამისა, აღნიშნულ შრომებში, როგორც წესი, განიხილება პირველი გვარის სინგულარული განტოლებების გულისა და ინტეგრალების წირის მიმართ

გარკვეული შეზღუდვები. ინტეგრების წირად აღებულია ნამდვილი ღერძის მონაკვეთი. ნებისმიერი კონტურის შემთხვევაში განტოლების გარდაქმნა მონაკვეთის შემცველ განტოლებაზე პრინციპულად შესაძლებელია, მაგრამ ხშირად ძალიან არასასურველია, განსაკუთრებით ისეთ განტოლებებში, რომლებიც უკავშირდებიან პრაქტიკულ ამოცანებს. ხშირად ასეთი გარდაქმნები რთულია, რადგანაც გამოყენებებში (მაგალითად, ბზარების თეორიის ამოცანებში) უფრო ხშირად იძულებულნი ვართ გამოვიყენოთ გარკვეული საწყისი მონაცემები, მეორე მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს გამომთვლელი სქემების კრებადობის სისწრაფე.

მოცემულ პარაგრაფში განხილული სქემა გამოიყენება პირველი გვარის სინგულარული ინტეგრალური განტოლების რიცხვითი ამოცანებისათვის, ნებისმიერი გახსნილი კონტურების შემთხვევაში, იმ დაშვებით, რომ მოცემულ ზუსტ განტოლებას ამოხსების განსხილველ კლასში აქვს ერთადერთი ამოხსნა.

მარჯვენა მხარისა და გულის მიმართ გარკვეულ დაშვებებში, (იხ. ქვემოთ) მოცემული განტოლების მიმართ, შეგვიძლია მივაღწიოთ კრებადობის საკმარისად მაღალ რიგს.

ამ პარაგრაფში მოყვანილი შედეგის საფუძველზე, რომელშიაც მტკიცდება სინგულარული ინტეგრალისათვის, გახსნილი კონტურებით, H_β მეტრიკით კვადრატული პროცესების კრებადობა, შესაძლებელია შესაბამისი გამოთვლითი პროცესების დაფუძნება. ამასთან გამოყენებული კვადრატული პროცესები საშუალებას გვაძლევს საკმარისად ადვილად ავაგოთ შესაბამისი რეალური გამოთვლითი სქემები.

ამგვარად, ჩავთვალოთ, რომ (2.50) განტოლებაში $L \equiv ab$ წარმოადგენს გახნილ გლუვ კონტურს, რომელსაც ჩვენ კვლავ ჩავთვლით, რომ მოცემულია პარამეტრული სახით $t = t(s)\ (s_a \le s \le s_b), K(t_0, t)$ და $f(t)$ L-ზე მოცემული ფუნქციებია, რომებიც აკმაყოფილებენ ჰელდერის პირობას (იხ. [77]).

ვეძებოთ (2.50) განტოლების ამონახსნი, რომელიც შემოსაზღვრულია a ბოლოზე და შემოუსაზღრელი a-ზე ასეთ ამონახსნს, როგორც ცნობილია აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi_0(t) = \sqrt{\frac{t-a}{t-b}}\varphi(t) \tag{2.51}$$

სადაც, k და f-ზე ზემოთ მოთხოვნილ დაშვებებში, φ ფუნქცია L-ზე აკმაყოფილებს ჰელდერის პირობას.

მახასიათებელი ნაწილის შემობრუნებით, მოცემული განტოლება შეიძლება მიყვანილი იქნას სახეზე:

$$\varphi_0(t_0)+\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\left[\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\frac{t_1-b}{t_1-t_0}\frac{k(t_1,t)}{t_1-t_0}dt_1\right]\varphi_0(t)dt=\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\sqrt{\frac{t-b}{t-a}}\frac{f(t)}{t-t_0} \qquad (2.52)$$

შემდეგში ამ უკანასკნელ განტოლებას განვიხილავთ როგორც ოპერატორულ განტოლებას, გარკვეულ ფუნქციონალურ სივრცეში. ამასთან დაკავშირებით მას ჩავწერთ შემდეგი სახით:

$$K^0\varphi=I\varphi+k\varphi=f_0(t_0) \qquad (2.53)$$

სადაც

$$k\varphi=\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\left[\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\frac{t_1-b}{t_1-t_0}\frac{k(t_1,t)}{t_1-t_0}dt_1\right]\varphi_0(t)dt \qquad (2.54)$$

$$f_0(t)=\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\sqrt{\frac{t-b}{t-a}}\frac{f(t)dt}{t-t_0}$$

ხოლო I ერთეულოვანი ოპერატორია, როგორც ვხედავთ განტოლების თავისუფალი წევრი და გული წარმოადგენენ სინგულარულ ინეგრალებს:

$$(k\varphi)(t_0,t)=\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\left[\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\frac{t_1-b}{t_1-t_0}\frac{k(t_1,t)}{t_1-t_0}dt_1\right]\varphi_0(t)dt \qquad (2.55)$$

ინტეგრალურ ოპერატორში გული

$$\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\sqrt{\frac{t_1-b}{t_1-a}}\frac{k(t_1,t)}{t_1-t_0}dt_1 \qquad (2.56)$$

შევცვალოთ პროფესორ მ. კუბლაშვილი მიერ აგებული კვადრატული ფორმულით, მივიღებთ:

$$\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\sqrt{\frac{t_1-b}{t_1-a}}\frac{k(t_1,t)}{t_1-t_0}=L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}K\right);t_0,t\right],\quad \mathrm{t}_0\in ab \qquad (2.57)$$

სადაც

$$L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}K\right);t_0,t\right]=L_{nj}\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}K\right);t_0,t\right],\quad \mathrm{t}_0\in\tau_j\tau_{j+1}\ \left(\mathrm{j}=\overline{1,\mathrm{n}}\right)$$

$$L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}K\right);t_0,t\right]=\sum_{k=1}^{m}\frac{\omega_j(t_0)}{(t_0-t_{jk})\omega_j'(t_{jk})}\mathrm{S}_\mathrm{n}^{(1/2;-1/2)}\left(\mathrm{K},\mathrm{t}_{\mathrm{jk}};t\right),\ \mathrm{t}_0\in\tau_j\tau_{j+1}$$

ანალოგიურად

$$\frac{1}{\pi i}\int_{ab}\sqrt{\frac{t-a}{t-b}}\,\frac{f(t)dt}{t_1-t_0}\approx L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}f\right);t_0\right] \tag{2.58}$$

(2.54)-თან ერთად $L_n[\varphi_n,t_0]$ფუნქციათა ქვესივრცეში განვიხილოთ განტოლება:

$$K_n^0\left[L_n[\varphi_n;t_0]\right]=L_n[\varphi_n;t_0]+\frac{1}{\pi i}\int_{ab}L_n\left[\left(S_nK\right)^{(1/2;-1/2)};t_0,t\right]L_n[\varphi_n;t]dt=$$
$$=L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}f\right);t_0\right],$$

თუ ამ განტოლებაში t_0 პარამეტრს მივცემთ მნიშვენლობას

$$T(v,j)=\{t_{v,j}\}\qquad (v=1,2,...n;\quad j=1,2,...m)$$

სამრავლიდან მივიღებთ წრფივ განტოლებათა სისტემას $T(v,j)$ წერტილებში $\varphi_n=(t_{v,j})$ უცნობების მიმართ:

$$\left[K_n^0\left[L_n[\varphi_n;t_0]\right]\right]_{t_0=t_{vj}}=\left\lfloor L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}f\right);t_0\right]_{t_0=t_{vj}}\right\rfloor\left(\mathrm{v}=\overline{1,\mathrm{n}};\ \mathrm{j}=\overline{1,\mathrm{m}}\right) \tag{2.59}$$

უფრო დაწვრილებით ამ სისტემას ექნება შემდეგი სახე:

$$\varphi_n(t_{vj})+\sum_{i=1}^{n}\sum_{l=1}^{m}q_{ie}A_n(t_{ie},t_{vj})\varphi_n(t_{ie})=f_0(t_{vj}) \tag{2.60}$$

სადაც

$$A_n(t_{ie},t_{vj})=\left[1+\sum_{\substack{\sigma=1\\ \sigma\neq v}}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\sigma k}-t_{vj}}+\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{vk}-t_{vj}}-P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}d_{vk}(t_{vj})\right]K(t_{vj};t_{il})-$$
$$-\sum_{\substack{\sigma=1\\ \sigma\neq v}}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\sigma k}-t_{vj}}K(t_{\sigma k},t_{ie})-\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{vk}-t_{vj}}K(t_{vk},t_{ie})+P_{vj}^{*(1/2;-1/2)}\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}d_{vk}(t_{vj})K(t_{vk},t_{ie})$$

ხოლო $\varphi_n(t_{vj})$ საძებნი სიდიდეებია.

$$f_0\left(t_{\nu j}\right)=\left[1+\sum_{\substack{\sigma=1\\ \sigma\neq\nu}}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\nu j}-t_{\sigma k}}+\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\nu j}-t_{\nu k}}-P_{\nu j}^{*(1/2;-1/2)}\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}d_{\nu k}\left(t_{\nu j}\right)\right]f\left(t_{\nu j}\right)-$$

$$-\sum_{\substack{\sigma=1\\ \sigma\neq\nu}}^{n}\sum_{k=1}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\nu j}-t_{\sigma k}}\,f\left(t_{\sigma k}\right)-\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}\frac{P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}}{t_{\nu j}-t_{\sigma k}}\,f\left(t_{\nu k}\right)+P_{\nu j}^{*(1/2;-1/2)}\sum_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{m}d_{\nu k}\left(t_{\nu k}\right)f\left(t_{\nu j}\right)$$

$$\left(\nu=1,2,\ldots,n;\qquad \mathrm{j}=1,2,\ldots,\mathrm{m}\right)$$

$$P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}=\frac{1}{\pi i}\int_{\tau_\sigma\sigma_{\sigma+1}}\sqrt{\frac{t-b}{t-a}}\prod_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{m}\frac{t-t_{\sigma j}}{t_{\sigma k}-t_{\sigma j}}dt\qquad q_{il}^{(1/2;-1/2)}=\frac{1}{\pi i}\int_{\tau_\sigma\sigma_{\sigma+1}}\sqrt{\frac{t-a}{t-b}}\prod_{\substack{j=1\\ j\neq e}}^{m}\frac{t-t_{\sigma j}}{t_{ie}-t_{ij}}dt$$

$$P_{\sigma k}^{*(1/2;-1/2)}=\begin{cases}P_{\sigma k}^{(1/2;-1/2)},\ \mathrm{k}=\overline{2,\mathrm{m}-1};\ \sigma=\overline{1,n},\\ P_{\sigma 1}^{(1/2;-1/2)}+P_{\sigma-1m}^{(1/2;-1/2)};\ \mathrm{k}=1,\sigma=\overline{1,n},\end{cases}\quad \mathrm{d}_{\nu k}=\frac{\prod\limits_{\substack{j_0=1\\ j_0\neq k,j}}^{m}\left(t_{\nu j}-t_{\nu j0}\right)}{\prod\limits_{\substack{j_0=1\\ j_0\neq k}}^{m}\left(t_{\nu j}-t_{\nu j_0}\right)}$$

ვიგულისხმოთ, რომ (2.50) განტოლებაში $K\left(t_0,t\right), f\left(t_0\right)\in H_a^{(r)}(L)$.

დავამტკიცოთ, რომ თუ (2.50) განტოლებას აქვს ერთადერთი $\varphi_0=\sqrt{(t-a)/(t-b)}\varphi(t)$ სახის ამონახსენი, მაშინ გარკვეული n=n_0-დან დაწყებული (2.59) განტოლება და (2.60) სისტემა ცალსახად ამოხსნადია, ამასთან, თუ $L_n\left[\varphi_n,t_0\right]$არის (2.60) განტოლების ამონახსენი, მაშინ φ-ს მიმართ ზემოთ მიღებულ დაშვებებში სამართლიანია შეფასება

$$\left\|\varphi(t)-L_n\left[\varphi_n,t\right]\right\|_{H\beta}\leq\frac{C_r\ln n}{n^{r+\alpha-\beta-1/2}}\left(m>r+1,\beta<\alpha-1/2\right)\qquad(2.61)$$

სადაც φ-არის (2.53) განტოლების ამონახსნი, ხოლო C_r რაიმე მუდმივია.

ამ თეორემის სამართილიანობა გამოდინარებს ზოგადი მიახლოებითი თეორიის ცნობილი შედეგებიდან სამართლიანია

$$\left\|L_n\left[u\left[L_n,\varphi_n\right]\right]\quad U_n\left[L_n,\varphi_n\right]\right\|_{H\beta}\quad\frac{\alpha_{\mathrm{r}}\ln n}{n^{r\alpha\beta1/2}}\left\|L_n\varphi_n\right\|_{H\beta}$$

$$\left\|f_0-L_n\left[\left(S_n^{(1/2;-1/2)}f\right),t_0\right]\right\|_{H\beta}\leq\frac{b_{\mathrm{r}}\ln n}{n^{r+\alpha-\beta-1/2}}\left\|f_0\right\|_{H\beta}$$

როცა α=1 (2.61) შეფასებიდან პლემელი პრივალოვის ცნობილი თეორების თანახმად, შესაბამის დასვებებში K-სა და *f*-ის მიმართ შეგვიძლია დავამტკიცოთ, რომ $\left\|\varphi-L_n\varphi\right\|$-ის რიგი არის $O\left(\frac{1}{n^{r+1/2-\varepsilon}}\right)$, სადაც ε რაგინდ მცირე დადებითი რიცხვია.

2.6 ბზარის ამოცანების რიცხვითი ამონახსნები სინგულარული ინტეგრალური განტოლებების გამოყენებით (წრფივი ჭრილის მქონე დრეკადი სიბრტყის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეება)

მყარი სხეულების რეალური სიმტკიცე არსებითადაა დამოკიდებული რეალურ სტრქტურის დეფექტებზე. რეალურ მასალებში ყოველთვის არსებობს სხვადასხვა ტიპის დიდი რაოდენობის მიკროდეფექტები, რომელთა განვითარება მოდებული დატვირთვის მოქმედებით მათი ზრდის მიმართულებით წარმოშობს ბზარებს, რომელთა შედეგად საბოლოო ჯამში ხდება სხეულის ლოკალური ან სრული რღვევა. როგორც გამოცდილება აჩვენებს, ეს მოვლენა განსაკუთრებით დამახასიათებელია მყიფე ან კვაზიმყოფე დეფორმირებადი მყარი სხეულების რღვევისათვის.

კონსტრუქციის ელემენტების და ბზარების მქონე ნაგებობების სიმტკიცის საკითხების შესწავლა წარმოადგენს მრავალი ცნობილი მკვლევარის დიდ ინტერესს.

მყარი სხეულების მყიფე თეორიის საკითხებისადმი მიძღვნილი აქვს მონოგრაფიები: ნ. მოროზვი [61], ვ. პანასიუკი, ს. სავრუკი, ა. დაცნიში [59], ვ. პანასიუკი [58], ფ. მაკკლინტონი, ა. არგონი, ტ. ეკობორი [25], გ. ჩერპანპვი [66], ვ. პარტონი ე. მოროზოვი ცალკეული თავები მონოგრაფიების ნ. მუსხელიშვილი, ლ. სედოვი [63], ასევე სტატიები: ჯ. სი [74], გ. ჩერპანოვი [67], რ. ბანცური [78] და სხვა. ფართო მიმოხილვა შრომებისა მოცემულია მონოგრაფიაში [59]. ამ შრომებში ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს გამოკვლევას წარმოადგენს სახეულებში ძაბვებისა გადანაწიელბის გათვალისწინება მათში ბზარებისა და ხვრელების წარმოშობის დროს. დღეისათვის წრფივი დრეკადობის ფარგლებში ამოხსნილია საკმარისად ბევრი სხვადასხვა სახის ჭრილების (ბზარების) მქონე დაძაბულ-დეფორმირებული სხეულების მდგომარეობა. ძირითადად ეს ამონახსები ეხება ერთი ჭრილის (ბზარის) ან გარკვეული აზრით მოწესრიგებული ჭრილების მქონე სხეულებს, ხოლო ამოსხნის გამოყენებული მეთოდები ეფექტურად გამოიყენება მხოლოდ ამა თუ იმ კლასის ამოცანებისათვის.

წინამდებარე ნასლომის აღნიშნულ თავში სინგულარული ინტეგრალური განტოლების გამოყენებით შესწავლილია ბზარის სხვადასხვა სახის ამოცანების

რიცხვითი ამონახსნები. მყიფე რღვევის მექანიკის მეცნიერების საფუძველს წარმოადგენს ბზარების მქონე სხეულების დაძაბული დეფორმირებადი მდგომარეობის შესწავლა ბზარის წვეროების (ან სხვა ასეთი ტიპის დეფექტების) მიახლოებაში. ასევე ბზარების გავრცელების კრიტერიუმი დეფორმირებად სხეულებზე გარე მოქმედების ველის შემთხვევაში. მყიფე რღვევის მექანიკა სატავეს იღებს ა. გრიფითსის [79-80] შრომიდან, შემდეგ ეს თეორია განავითარეს გ. ირვინმა [84], ე. ოროვანმა და ა.შ.

ბოლო დროს მომრავლდა ახალი გამოკვლევების მნიშვნელოვანი რაოდენობა. ამასთან მათი რიცხვი იზრდება ყოველწლიურად. კერძოდ, მნიშვნელოვანი პროგრესია მიღწეული ბზარებით შესუსტებული ფირფიტრბის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევებში.

სიმტკიცეზე ნაგებობებსა და კონსტრუქციის ელემენტების გაანგარიშებისას მყიფე რღვევის მექანიკის ერთ-ერთი ძირითადი საკითხია ბზარების გასწვრივ განაწილების განსაზღვრა, რომელიც ხასიათდება ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტით.

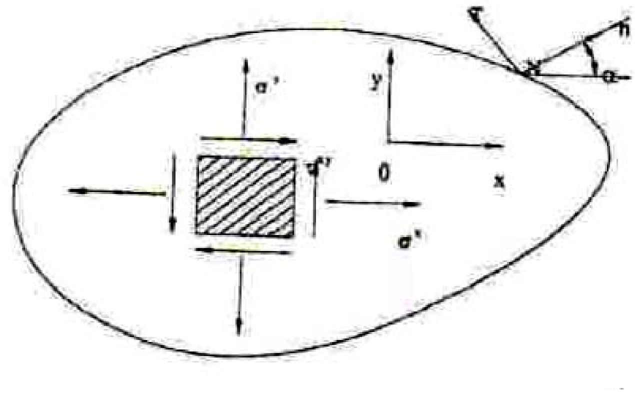
კვლევის ეს მიმართულება წარმოადგენს პრობლემის შემდეგი განვითარების, დეფორმირებად დრეკად, სხეულებში ძაბვების კონცენტრაციის შესახებ განსაკუთრებული სახის კონცენტრირებად ბზარებთან.

ბზარების გასწვრივ დაზაბული მდგომარეობის შესწავლა დაიწყო ჯერ კიდევ 1909 წელს კოლოსოვის [29] მიერ, რომელმაც შეისწავლა თანაბრად გაჭიმული სიბრტყის, წონასწორობა, რომელიც შესუსტებულია ელიფსური ტიპის ხვრელით. შემდეგ ეს ამოცანა განიხილა ინგლისმა [75] ნებისმირი დატვირთვის მქონე ელიფსური ტიპის ხვრელებით. შესუსტებული სიბრტყის დაძაბულობის მოცანა ამოხსნა მუსხელიშვილმა [50].

რღვევის მექანიკის განსაკუთრებულ ინერესს წარმოადგენს, ძაბვისა და გადაადგილების განაწილების შესწავლა ბზარის წვეროების მიახლოებაში. ამ საკითხებს როგორც სიბრტყეზე ასევე გარშემო ბზარების სხვადასხვა მდგომარეობისას მიძვნილი აქვს მრავალი შრომა, რომელთა ვრცელი მიმოხილვა და ბიბლიოგრაფიული ჩამოთვლა მოცემმულია მონოგრაფიაში [59].

როგორც ცნობილია [59], იზოტროპული სხეულის ნებისმიერი წერტილში დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრისათვის აუცილებელია ძაბვის

ვექტორის ტენზორის სამი კომპონენტის $-\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ (ნახ. 2.9) და გადაადგილების ვექტორის ორი შემადგენელი კომპონენტის u, v პოვნა.



ნახ.2.9

ამოცანის დასმა და მისი მიყვანა ინეტეგრალურ განტოლებაზე.

ვთქვათ რე, რომელიც დაკავებულია დრეკადი სხეულით, წარმოადგენს X რეღძზე $|x| \le l,\ \gamma = 0$ მონაკვეთის გასწვრივ გაჭრილ მთელ სიბრტყეს. ვიგულისხმოთ, რომ უსასრულობაში ძაბვა ნულის ტოლია, ხოლო ჭრილის ნაპირებზე მოცემულია $\sigma_y^+, \tau_{xy}^+, \sigma_y^-, \tau_{xy}^-$ ძაბვის კომპონენტები. შემდეგში „+“ და „-„ ნიშნები არნიშნავენ შესაბამისი სიდიდეების სასაზღვრო მნიშვნელობებს, შესაბამისად ჭრილის ზედა და ქვედა მხრიდან. ავღნიშნოთ [59]:

$$\sigma_y^{\pm}(x,0) - \tau_{xy}^{-}(x,0) = p(x) \pm q(x) \quad |x| < l \qquad (2.62)$$

სადაც p(x) და q(x) ცნობილი ფუნქციებია:

$$\begin{aligned} p(x) &= \frac{1}{2}\left(\sigma_y^+ + \sigma_y^-\right) - \frac{i}{2}\left(\tau_{xy}^+ + \tau_{xy}^-\right) \\ q(x) &= \frac{1}{2}\left(\sigma_y^+ + \sigma_y^-\right) - \frac{i}{2}\left(\tau_{xy}^+ - \tau_{xy}^-\right) \end{aligned} \qquad (2.63)$$

ვთქვათ $|x| \le l$ მონაკვეთზე მოცემულია ძაბვისა და გადაადგილების წარმოებულის წყვეტა:

$$\sigma_y^+ - \sigma_y^- - i\left(\tau_{xy}^+ - \tau_{xy}^-\right) = 2q(x) \qquad (2.64)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[u^+ - u^- + i\left(v^+ - v^-\right)\right] = \frac{i(\aleph + 1)}{2\mu} g'(x) \qquad (2.65)$$

(სადაც $\aleph, \mu$ მუდმივებია).

ამასთან მონაკვეთის ბოლოებში გადაადგილების წყვეტის მნიშვნელობა ნულის ტოლია ე.ი.

$$g(-\ell) = g(\ell) = 0 \tag{2.66}$$

შემოვიტანოთ ფუნქცია

$$\Omega(z) = \phi(\bar{z}) + z\varphi'(\bar{z}) + \psi(\bar{z}) \tag{2.67}$$

მაშინ გადაადგილება და ძაბვები გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებებით [29,50]

$$\sigma_x + \sigma_y = 2\left[\phi(z) + \phi(\bar{z})\right] \tag{2.68}$$

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \phi(z) + \Omega(\bar{z}) + (z - \bar{z})\phi'(\bar{z})$$

$$2\mu(u' + i v') = \aleph\,\phi(z) + \Omega(\bar{z}) - (z - \bar{z})\phi'(\bar{z}) \tag{2.69}$$

უსასრულობაში ქრობადი $\phi(z)$ და $\Omega(z)$ ფუნქციები გამოისახება შემდეგი სახით:

$$\phi(z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-e}^{+l}\frac{Q(t)}{t - z}dt \tag{2.70}$$

$$\Omega(z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-e}^{-l}\frac{Q(t) + 2iq(t)}{t - z}dt \tag{2.71}$$

რომლებიც ხსნიან (2.64) და (2.65) სასაზღვრო ამოცანას, სადაც $Q(x)$ განისაზღვრება პირობიდან:

$$\Phi^+(x) - \Phi^-(x) = i\left[g'(x) - i\frac{2q(x)}{\aleph + 1}\right] = iQ(x)|x| < 1 \tag{2.72}$$

მხედველობასი მოვიღოთ

$$\psi(z) = \Omega(\bar{z}) - \phi(z) - z\phi'(\bar{z}) \tag{2.73}$$

$\psi(z)$ ფუნქციისათვის მივიღებთ ფორმულას

$$\psi(z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-e}^{-l}\left[\frac{\overline{Q(t)} + 2\overline{iq(t)}}{t - z} - \frac{iQ(t)}{(t - z)^2}\right]dt \tag{2.74}$$

დავუშვათ ეხლა რომ $|x| \le l,\ y = 0$ ჭრილის ნაპირებზე მოცემულია (2.62) დატვირთვა და ძაბვა უსასრულობაში არა გვაქვს. ამ ამოცანის პოტენციალები $\phi(z)$ და $\Omega(z)$ ვეძებოთ (2.70) და (2.71) სახით, დავუშვათ ამასთან რომ $g(x)$ ფუნქცია

უცნობია, შესაბამისად ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ განვსაზღვროთ $g(x)$ ან $g'(x)$ ფუნქცია. როგორც ცნობილია ეს ამოცანა მიიყვანება [59] სინგულარულ ინტეგრაულ განტოლებაზე

$$\frac{1}{\pi}\int_{-l}^{+l}\frac{Q(t)+iq(t)}{t-x}dt = p(x) \qquad (2.75)$$

საიდანაც $\int_{-l}^{l} g'(t)dt = 0$ პირობის გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$g'(x) = -i\frac{\aleph-1}{\aleph+1}q(x) + \frac{1}{\pi\sqrt{l^2-x^2}}\left[-\int_{-l}^{+l}\frac{\sqrt{l^2-t^t}\,p(t)}{t-x}dt + iR\right]$$

სადაც

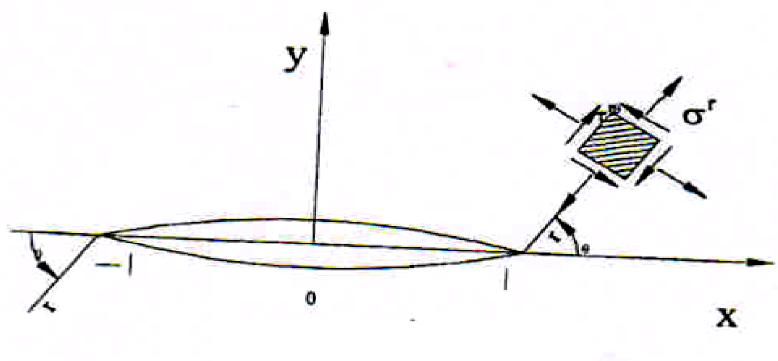
$$R = -i\frac{\aleph-1}{\aleph+1}q(t)dt$$

ამოცანის სრული ამოხსნისათვის ვღებულობთ:

$$\begin{aligned}\phi(z) &= \frac{1}{2\pi\sqrt{z^2-l^2}}\int_{-l}^{+l}\frac{\sqrt{l^2-t^t}\,p(t)dt}{t-z} + \frac{1}{2\pi i}\left[\int_{-l}^{+l}\frac{q(t)dt}{t-z} + \frac{R}{\sqrt{z^2-l^2}}\right],\\ \Omega(z) &= \frac{1}{2\pi\sqrt{z^2-l^2}}\int_{-l}^{+l}\frac{\sqrt{l^2-t^t}\,p(t)dt}{t-z} + \frac{1}{2\pi i}\left[\int_{-l}^{+l}\frac{q(t)dt}{t-z} + \frac{R}{\sqrt{z^2-l^2}}\right],\end{aligned} \qquad (2.76)$$

განვიხილოთ უსასრულო იზოტროპული სიბრტყე და ძაბვებისა და გადაადგილების განაწილება ამ სიბრტყეში წრფივი ბზარის ბოლოების მცირე მიდამოში. ამ მიზნით გადავიდეთ ახალ (პოლარულ) კოორდინატთა სისტემაზე სათავით ბზარის წვეროში $z_{10} = l$ ან $z_{20} = -l$ (ნახ. 2.10) [59] ე.ი. დავუშვათ

$$z = \pm(z_1, +l), \qquad z_1 = ze^{i\varphi} \qquad (2.77)$$



ნახ. 1.10

$\Phi_1(z_1)$ და $\Omega_1(z_1)$ პოტენციალები, რომლებიც შეესაბამებიან ახალ კოორდინატთა სისტემაში $\Phi(z)$ და $\Omega(z)$ ფუნქციების XOY სისტემაში განისაზღვრება ფორმულებით

$$\Phi_1(z_1) = \Phi(\pm z_1 \pm l) \qquad (2.78)$$
$$\Omega_1(z_1) = \Omega(\pm z_1 \pm l)$$

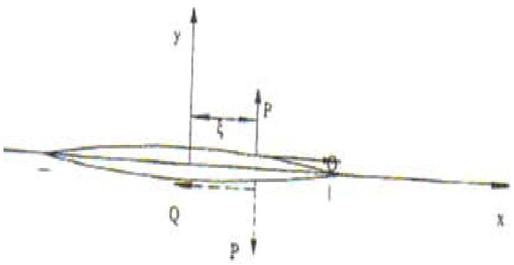
ბზარის მცირე მიდამოში ე.ი. $|z_1| << l$ ადგილი აქვს $\Phi_1(z_1)$ და $\Omega_1(z_1)$ შემდეგ წარმოდგენებს

$$\Phi_1(z_1) = \frac{k_1^{\pm} - ik_2^{\pm}}{2\sqrt{2z_1}} + O(1)$$
$$\Omega_1(z_1) = \frac{k_1^{\pm} - ik_2^{\pm}}{2\sqrt{2z_1}} + O(1) \qquad (2.79)$$

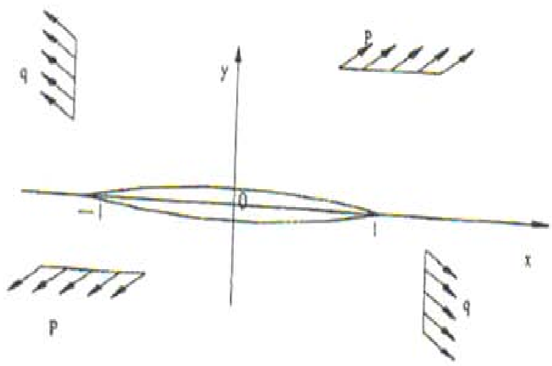
სადაც O(1) შემოსაზღვრული სიდიდეა, როცა $|z_1| \to 0$;

$$k_1^{\pm} - ik_2^{\pm} = -\frac{1}{\pi\sqrt{l}}\left[\int_{-l}^{+l}\sqrt{\frac{l \pm t}{l \mp t}}\,p(t)dt \pm i\frac{\aleph - 1}{\aleph + 1}\int_{-l}^{+l} q(t)dt\right] \qquad (2.80)$$

აქ და შემდეგში $k_1^{\pm}$ და $k_2^{\pm}$ ნამდვილი სიდიდეებია. „+“ ნიშანი ეკუთვნის ბზარის მარჯვენა წვეროს (z=*l*), ხოლო ქვედა „–“ მარცენა წვეროს (z=-*l*). $k_1^{\pm}$ და $k_2^{\pm}$ კოეფიციენტებს უწოდებენ დაძაბულობის ინტესივობის კოეფიციენტებს. ზოგიერთ შრომებში მიღებულია ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტები უწოდონ $\sqrt{\pi}$ -ჯერ მეტ სიდიდეებს ე.ი. $k_1^{\pm} = \sqrt{\pi}k_1^{\pm}$, $k_2^{\pm} = \sqrt{\pi}k_2^{\pm}$. ისინი განისაზღვრებიან დრეკადობის თეორიის ამოცანების ამოხსნის ძაბვის ფუნქციებითა და პარამეტრებით, რომლებიც ახასაითებენ სხეულის კონფიგურაციასა და ბაზრის ფორმას. ზოგიერთ კერძო შემთხვევბში (1.80) ფორმულას აქვს მარტივი სახე. მაგალითად, როცა ბზარის ქვედა საზღვარზე $x = \xi$ (y=0) წერტილში მოდებულია P და Q სიდიდის, მაგრამ ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალები (ნახ. 2.11), მაშინ (2.80)



ნახ. 2.12



ნახ. 2.13

ფორმულა მარტივდება და $$k_1^{\pm} - ik_2^{\pm} = \frac{P-Q}{\pi}\sqrt{\frac{l \pm \xi}{l \mp \xi}} \qquad (2.81)$$

ხოლო, როცა უსასრულო სიბრტყეზე, რომელიც შესუსტებულია $2l$ სიგრძის ბზარით, რომელზედაც უსასრულობაში მოქმედებენ ერთმანეთის მართობულად p და q ძალები (ნახ.2.13) სადაც α არის კუთხე, რომელსაც ძაბვა ადგენს ბზარის სიბრტყესთან.

ბზარების გასწვრივ ყველაზე ზოგადი დატვირთვის დროს $k_1^{\pm}$ და $k_2^{\pm}$ ინტენსივობის კოეფიციენტები გამოითვლება (2.80) ფორმულით. შევნოშნოთ, რომ ამავე ფორმულით შეიძლება მივიღოთ $k_1^{\pm}$ და $k_2^{\pm}$ სიდიდეები იმ შემთხვევაში, როცა დატვირთვა მოდებულია უსასრულობაში ან სიბრტყის შიგა წერტილში. ამისათვის აუცილებელია განვსაზღვროთ $\sigma_y(x,0) - i\tau_{xy}(x,0)$, ძაბვების კომბინაცია $|x| < l$, $y = 0$ ბზარის წირზე, სიბრტყეზე, ჭრილის გარეშე იგივე დატვირთვის დროს. შემდეგ ძაბვის ინტესივობის კოეფიციენტები სიბრტყისათვის ჭრილით განოითვლება (2.80) ფორმულით, რომელშიაც უნდა დავუშვათ $q(x) = 0$; $p(x) = -[\sigma_y(x,0) - i\tau_{xy}(x,0)]$, სხვა სიტყვებით, რომ ვთქვათ ასეთი ამოცანის ამოხსნის დროს გამოიყენება სუპერპოზიციის მეთოდი. არსებითი მნიშვნელობა აქვს იმ ფაქტს, რომ ძაბვისა და გადაადგილების განაწილებას ბზარის წვროს მიახლოებაში ყოველთვის აქვს პოლარული კოორდინატების (z,Q) მიმართ ერთიდაიგივე ფუნქციონალური დამოკიდებულება [59]. შესაბამისად ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტები, შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც პარამეტრები, რომლებიც ასახავენ სხეულში ბზარების წარმოქმნის გამო ძაბვების განაწილებას. ამიტომ ბზარის წვეროს მცირე მიდამოში

ძაბვის განაწილება ცნობილი იქნება, თუ განსაზღვრული იქნება ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტები. ამიტომ არსებითი მნიშვნელობა აქვს $k_1^{\pm}, k_2^{\pm}$ ინტენსივობის კოეფიციენტების განსაზღვრას.

ზღვრული წონასწორობის განტოლებები. ბზარების ტიპის დეფექტების მქონე მყიფე სხეულების ზრღვრულ-წონასწორული მდგომარეობის გამოკვლევის დროს, მოითხოვება განისაზღვროს გარე დატვირთვის კრიტიკული მნიშვნელობა,რომლის მიღწევის დროს ბზარები იწყებენ გავრცელებას ე.ი. იწყება სხეულის ლოკალური ან სრული რღვევა. ამ ამოცანის ამოხსნის დროს პრინციპული მომენტია ზღვრული წინასწორობის პირობის ფორმულირება. ასეთი პირობა შედარებით ადვილად ფორმულირდება ეგრეთწოდებული კვაზიმყიფე ბზარების თეორიაში, როცა ბზარის წვეროს მიდამოში პლასტიკური არის უდიდესი ზომა მცირეა, ბზარის ზომებთან შედარებით და მანძილთან ბზარის წვერიოდან სხეულის საზღვრამდე. ამ პირობის უმარტივესი ვარიანტი გრიფისტისის [79-80] ფიზიკურ იდეაზე დაყრდნობით ჩამოაყალიბა ირვინმა [84]. ნორმალური განვითარების ბზარის შემთხვევაში ე.ი. ლოკალური სიმეტრიის $(k_2 = 0)$ შემთხვევაში მის მიერ გამოთქმული იყო მტკიცება იმის შესახებ, რომ მყიფე კვაზიმყიფე სხეულებში ბზარის გავრცელება იწყება მაშინ, როცა მოცემუყლი მასალისათვის, მოცემულ პირობებში ძაბვის ინტენსიოვობის კოეფიციენტი ბზარის წვეროსთან აღწევს რაიმე მუდმივ მნიშვნელობას.

$$k_1 = K_{1c} / \sqrt{\pi} \qquad (2.82)$$

K_{1c} მუდმივი, რომელიც ახასიათებს მასალის რღვევის წინააღმდეგობას უნდა განისაზღვროს ექსპერიმენტალურად.

ზოგად შემთხვევაში, სხეულის ზღვრული წონასწორობის საკითხის განხილვისას, როცა ლოკალური სიმეტრიის პირობა $(k_2 = 0)$ არ სრულდება, აუცილებელია ჩამოვაყალიბოთ ჰიპოთეზა იმის შესახებ, რომ ბზარის საწყისი მიმართულება ემთხვევა სიბრტყეს, რომელშიაც ძაბვის მთავარი ნაწილი (ნახ. 2.11) აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას. ჰიპოთეზა განხილულია [60], [66] შრომებში. ამ ჰიპეთეზის საფუძველზე ბზარის საწყისი გავრცელების კუთხე გამპოითვლება ფორმულით:

$$\theta_* = 2arctg \frac{k_1 - \sqrt{k_1^2 + 8k_2^2}}{4k_2} \qquad (2.83)$$

ზღვრული წონასწორობის განტოლებას ექნება სახე:

$$\cos^2\frac{\theta_*}{2}\left(k_1-3k_2 tg\frac{\theta_*}{2}\right)=\frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi}} \qquad (2.84)$$

აქედან გამოპითვლება გარე დატვირთვის კრიტიკული მნიშვნელობა, რომლის დროსაც იწყება სხეულის ლიკალური რღვევა.

ნებისმიერად ორიენტირებულ ფირფიტის ერთღერძა გაჭიმვა

ვთქვათ, წრფივი $2l$ სიგრძის ბზარის მქონე იზოტროპული ფირფიტა (ნახ. 2.12) $(q=0)$ იჭიმება უსასრულობაში, ბზარის სიბრტყის მიმართ α კუთხით, მონოტონურად ზრდადი გარე P ძაბვით. მოცემულ მომენტში ბზარის მარცხენა და მარჯვენა წვერო იმყოფება ერთნაირ პირობებში $k_{1,2}^{\pm}=k_{2,1}$ (2.81) ფორმულით მოცემული ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტები, როცა $(q=0)$ დაითვლება ფორმულებით:

$$k_1 = p\sqrt{l}\sin^2\alpha \qquad\qquad k_2 = p\sqrt{l}\sin^2\alpha\cos\alpha \qquad (2.85)$$

ბზარის საწყისი განვითარების θ_* კუთხე, გამოითვლება ფორმულით:

$$\theta_* = 2arctg\frac{1-\sqrt{1+8ctg_2\alpha}}{4ctg\alpha} \qquad (2.86)$$

ხოლო ზღვრული ძაბვის მნიშვნელობა $p=p_*$ გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$p_* = \frac{p_0}{\cos_3\frac{\theta_*}{2}\sin^2\alpha\left(1-3ctg\alpha\cdot tg\frac{\theta_*}{2}\right)} \qquad (2.87)$$

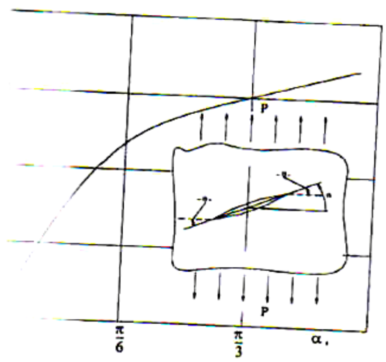
სადაც

$$p_0=\frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi l}}$$

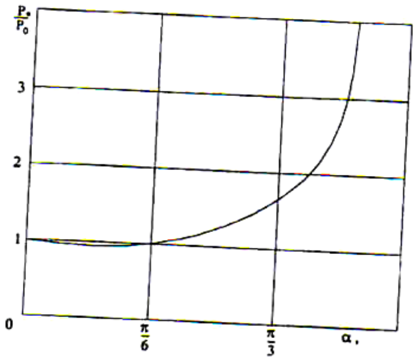
კრიტიკული გარე ძაბვის მნიშვნელობაა, ფირფიტის გაწიმვის დროს, რომელიც გაწიმვის მიმართულების პერპენდიკულარულია.

(2.87) ფორმულა წარმოადგენს გრიფისტის ცნობილი ამოცანის ამოხსნას.

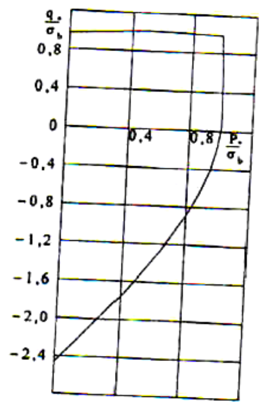
(2.86) ფორმულით, 2.13 ნახაზზე აგებულია θ_* კუთხე ბზარის ორიენტაციის მიხედვით, მოცემულ მომენტში. ბზარის გავრცელების საწყისი მიმართულება ახლოს არის გარე ძაბვის მიმართულების მართ კუთხესთან



ნახ. 2.13



ნახ. 2.14



ნახ. 2.15

ნახ. 1.14 ნაჩვენებია დამოკიდებულება p_*/p სიდიდისა $\alpha\left(0 \le \alpha \le \dfrac{\pi}{2}\right)$ კუთხესთან p_* ზღვრული დატვირთვა ღებულობს $p_* \approx 0{,}97\, p_0$ მინიმალურ მნიშვნელობას, როცა α≈1,19 რადიანს.

უნდა აღინიშნოს, რომ (2.86).და (2.87) დამოკიდებულებანი, რომლებიც მიღებულნი არიან ბზარის საწყისი გავრცელების ჰიპოტეზაზე, კარგად ეთანხმება ექსპერიმენტულ მონაცემებს (ვ. პანასიუკი, ლ. ბერეჟნიცკი, ს. კოვჩიკი [80]).

ზღვრული დაძაბულობის დიაგრამა.

განვიხილოთ უსასრულო იზოტროპული ერთეულოვანი სიგანის ფირფიტა $2l$ სიგრძის წრფივი ბზარით, როცა უსასრულობასი ერთმანეთის მართობულად მოქმედებენ p და q (იხ. ნახ.2.12) დატვირთვები, იმ დაშვებით, რომ ბზარის ნაპირები ერთმანეთთან კონტაქტში არ არიან, მაშინ (2.86) და (2.87) ფორმულების საფუძველზე p_* და q_* ზღვრული ძაბვებისათვის გვექნება:

$$p_* = p_0 \sec^2 \frac{\theta_*}{2}\left[\cos\frac{\theta_*}{2}\left(\sin^2\alpha + \eta_0 \cos^2\alpha\right) - 3(1-\eta_0)\sin\alpha\cos\alpha\sin\frac{\theta_*}{2}\right]^{-1} \qquad (2.88)$$

$$q_* = \eta_0 / p$$

აქ

$$\theta_* = 2arctg\frac{1 \mp \sqrt{1+8n^2}}{4n} \qquad (2.89)$$

სადაც „+“ შეესაბამება $k_1 < 0$ მნიშვნელობას, ხოლო „-“ მნიშვნელობა $k_1 > 0$;

$$n = \frac{k_2}{k_1} = \frac{(1-\eta_0)\sin\alpha\cos\alpha}{\sin^2\alpha + \eta_0\cos^2\alpha} \qquad (2.90)$$

(2.88) და (2.90) დამოკიდებულება გამოიყენება მყიფე წრფივი ჭრილით შესუსტებულ სხეულების ბრტყელი დაძაბული მდგომარეობის ზღვრული დიაგრამების ასაგებად.

ვთქვათ, საწყის არადეფორმირებულ მყიფე სახელში გვაქვს შინაგანი დეფექტები, რომელთა მახასიათებელი წრფივი განზომილებაა $2l$. ვთქვათ ისინი ერთმანერთისაგან იზოლირებულნი ნებისმიერად ორიენტირებულნი არიან მთელ სხეულში. თუ ასეთი სხეული გაჭიმულია გარე $p(\eta_0 = 0)$ ძაბვით, გაჭიმვის ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობაა, სხვადასხვა α კუთხისათვის ტოლია $p_* \approx 0{,}97\,p_0$.

განსახილველ შემთხვევაში $\min p_*$ სიდიდე, წარმოადგენს მოცემულ ნივთიერებას σ:

$$\min p_* \approx 0{,}97\,p_0 = \sigma \qquad (2.91)$$

თუ ბზრის მქონე სხეული იცდება ორღერძა გაჭიმვით p და q ძაბვებით, მაშინ p_* და q_* ზღვრული ძაბევბის მნიშვნელობები (η_0-ის ფიქსირებული მნიშვნელობების α კუთხის ორიენტაციის მიხედვით) გამოითვლება (1.88) და (1.90) ფორმულებით.

2.15 ნახაზზე აგებულია η_0 პარამეტრზე დამოკიდებულებით ზღვრული ძაბვის მნიშვნელობების ცვლილება, სადაც აბსისათა ღერძზე იზომება p_*/σ მნიშვნელობანი, ხოლო ორდინატაზე $\min p_*/\sigma$ მნიშვნელობანი. ეს გრაფიკი წარმოადგენს p_* და q_* ძაბვების ზღვრული მნიშვნელობების გრაფიკს, რომელიც სამართლიანია ბზარი-ხვრელისათვის, რომელთა ნაპირები სხეულის დეფორმაციის პირობებში არ ეხებიან ერთმანეთს. ამასთან $\min p_*/\sigma$ და $\min q_*/\sigma$ უნდა განვიხილოთ როგორც მთავარი ძაბვის მნიშვნელობები, რომლებიც ალიძვრებიან ბრტყელ დაძაბულ მდგომარეობაში მყოფ დეფორმირებულ სხეულებში.

ამგვარად, როგორც ზემოთმოყვანილი მსჯელობიდან ჩანს, ბზარების კვლევის ამოცანებში არსებითია ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტების დათვლა, ასევე დრეკადი დეფექტების მქონე სხეულების ზღვრული დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრა, რომლის შემდეგ საწიროა განისაზღვროს ძაბვების განაწილება, რატა თავიდან ავიცილოთ სხეულის რღვევა.

თავი 3. ბზარიანი კონსტრუქციების ექსპერიმენტალური კვლევა. ვიზუალური და ინსტრუმენტალური ძიების მეთოდიკა კონსტრუქციებში აქტიური რღვევის ზონის დასადგენად

3.1 შესავალი

რღვევის ექსპერიმენტალური მექანიკა, როგორც რღვევის მექანიკის ნაწილი, შეისწავლის ბზარების გავრცელებას და ინიცირების პროცესებს მყარ სხეულებში, როცა მათზე მოქმედებს დატვირთვა, ფიზიკური ველი ან აგრსიული გარემო. რღვევის მექანიკის ამ ნაწილში გამოიყენება დაძაბაულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანალიზის მეთოდი ბზარის გარშემო წვეროზე, ბზარის გავრცელების სიჩქარის და ზომების გაზომვის მეთოდი, ფაქტოგრაფიკული მეთოდი, რღვევის ზედაპირის გამოკვლევა მექანიზმების და რღვევის კინეტიკა, ფიზიკური მოდელირება შიგა ექსპერიმანტალურ მოქმედებაზე მყარ სხეულებში. ექსპერიმენტალური მექანიკის ჩარჩოებში რღვევის მექანიკაში შეიძლება გამოვყოთ ფუნდამენტალური და გამოთვლითი მიმართულება. ფუნდამენტალური გამოკვლევის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს მყარი სხეულის რღვევის მექანიზმის და კინამატიკის შესწავლა, რომელზეც დაფუძნებულია რღვევის მექანიკის მოდელები და კრიტერიუმები. ძირითად გამოკვლევებს მიეკუთვნება ექსპერიმენტალური გამოკვლევები ბზარის გავრცელებაზე მასალის კონსტრუქციებში, პირობით კონსტრუქციაზე ფიზიკო-მექანიკური რეალური ზემოქმედება ხორციელდება.

დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური ანალიზი ბზარის გარშემო მყარ სხეულზე დრეკადი და დრეკადპლასტიკური დატვირთვისას დაფუძნებულია მასალების ექსპერიმანტალური მექანიკის მეთოდებზე, რომელთა შორის შეიძლება დავასახელოთ მყიფე ტენზომგრძნობიარე დაფარვის მეთოდი, ოპტიკურად მგრძნობიარე დაფარვით, ელექტროტენზომეტრით, პოლარულ-ოპტიკური, აკუსტიკურ ემისიის, ულტრაბგერითი და ა.შ.

ბზარის გავრცელების სიგრძის გაზომვა და სიჩქარის გავრცელება დამოკიდებულია ბზარის გავრცელებასთან ფიზიკური ველებით, რომლებიც

წარმოიქმნება რღვევის პროცესის გარეშე. ფიზკური ველებს შეიძლება მივაკუთვნოთ: სინათლის, დრეკადი, ელექტრული, მაგნიტური და ელექტრომაგნიტური.

ჩამოვთვალოთ რამოდენიმე მეთოდი ბზარის გავრცელების სიჩქარის და სიგრძის გაზომვის, რომლებიც დამოკიდებულია ხსენებულ ფიზიკურ ველებზე: ოპტიკური და ვიზუალური; დრეკად დამყოლი და აკუსტიკურ ემისიური; ელექტროწინააღმდეგობა და ელქტრული პოტენციალის სხვაობა; ფეროგრაფია და მაგნიტურფხვნილური; რენტგენული და ელქტრო-მიკროსკოპული.

ზედაპირის რღვევა (ტეხილი) მყარ სხეულებში შეიცავს თავის თავში მთელ ინფორმაციას კონსტრუქცების შესახებ. ტეხილების შესწავლა დაფუძნებულია სიჩქარის ელექტრულ და რენტგენოსტრუქტურულ მეთოდებზე.

ექსპერიმანტალური მეთოდები, რომლებიც განსაზღვრავენ ბზარის ხასიათს შეიძლება დაფუძნებულნი იქნან რღვევის მექანიკის შემდეგ მიდგომებზე:

– როცა სხეულის ზომა ბზარის ზომის ტოლია, ამასთან ანალიზის შედეგები გავითვალისწინოთ ბზარის წვეროს გარშემო დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობისას;

– ენერგიის დანაკარგი სხეულის ზედაპირის ერთეულზე წარმოქნილი ბზარის გავრცელების დროს;

– დადგენილია კორელაციური დამოკიდებულებები კონსტრუქციის ბზარმედეგი და ფიზიკურ პარამეტრებს შორის.

3.2. კონსტრუქციის რღვევის აქტიურ ზონებში ვიზიალური და ინსტრუმენტალური ძიების მეთოდიკა

ნივთიერების ფიზიკო-მექანიკურ მდგომარეობაზე ობიექტური ინფორმაციის მისაღებად აუცილებელია გამოვიყენოთ კომპლექსური მეტოდი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ გამოსაცდელი კონსტრუქციის შედეგები ნებისმიერ ადგილზე, ეს აუცილებელია.

ამჟამად ნაგებობების გამოსაკვლევად იყენებენ ვიზუალურ მეთოდებს სპეციალური ხელსაწყოების გამოყენებით.

დაზუსტებულია, რომ არამრღვევი (ურღვევი) კონტროლის მეთოდების გამოყენებით მიიღება შემდეგი ობიექტური დასკვნები:

- სამშენებლო მასალის ძირითადი მახაიათებლები;
- კონსტრუქციის ერთგვაროვნება;
- მასალის დრეკადი მახასიათებლები;
- კონსტრუქციის დეფექტურობა;
- მასალის სიმკვრივე და ტენიანობა.

ვიზუალური მეთოდი. ვიზუალური მეთოდი კონსტრუქციის მდგომარეობის შეფასებისათვის გამოიყენება. ნაგებობების ვიზუალური დათვალიერების ტექნიკური ექსპერტი გამოავლენს ხილულ დეფექტებს, გეომეტრიულ ზომებში ცდომილება, მოხაზულობის ცვლილება, განსახილველი კონსტრუქციის ფაქტორის და ფერის ცვლილება, ბზარების განლაგება.

ბზარის გახსნის დაკვირვებისათვის იყენებენ უქურას (ყალაურს), მსაზე მიუთითებენ მისი დაყენების თარიღს, ნომერს იმ ორგანიზაციის მონაცემებს რომელმაც იგი დაამონტაჟა. დაკვირვებები დეფექტების აღმოჩენის შესახებ ფიქსირდება სპეციალურ ჟურნალში.

არამრღვევი მეთოდი. ბოლო წლებში ნაგებობების გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ფართოდ გამოიყენება ეგრეთ წოდებული არამრღვევი კონტროლი. მისი უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ სხვადასხვა გაზომვები ხდება სხვადასხვა ხელსაწყოებით.

კონტროლის მეთოდები, რომლებიც რეკომენდირებულია თანამედროვე მეცნიერებით, იყოფა ორად აქტიურად და პასიურად:

- შემწოვი გამომსხივებლით კონტროლი;
- რადიოაქტიური მეთოდი;
- კაპილარული მეთოდი.

კონსტრუქციების დეფექტების და დაზიანებების ტექნიკური დიაგნოსტიკას ატარებენ გამომდინარე მისი გეომეტრიული ზომებიდან, წარმოქმნის მიზეზებზე და ზრდის დინამიკაზე, მასალის ქიმიური შემადგენლობის ანალიზით.

გახსნილი დეფექტები და შიგა დაზიანებები მასალის მოცულობაში გამოსაკვლევ კონსტრუქციაში გამოიკვლევა არამრღვევი კონტროლის მეთოდით.

განვიხილოთ კონსტრუქციების კონტროლისათვის გავრცელებული და პერსპექტიული არამრღვევი კონტროლის მეთოდები:

აკუსტიკური ემისია

აკუსტიკური ემისიის სიგნალები შეიძლება მომდინარეობდნენ მყარი სხეულების დეფორმირებისას სხვადასხვა წყაროდან. ჩვეულებრივ ისინი იუწყებიან მასალის შიგა სტრუქტურის ძალიან სწრაფი ლოკალური ცვლილების შესახებ. აკუსტიკური ემისიის გამომწვევი მიზეზი სხვადასხვა მასალისათვის სხვადასხვაა; ასე მაგალითად: სრიალი დისლოკაციისას, გაორება, მარტენსიტული ტიპის ფაზური გარდაქმნები და რა თქმა უნდა მიკრობზარწარმოქმნა, ბზარების განვითარება და ხახუნის პროცესები. ატომების სრიალი, გაორება და ფაზური გარდაქმნები არღვევენ სტრუქტურის მთლიანობას და ამით განაპირობებენ გარემოში დრეკადი ტლღების გამოყოფას. ასეთი ტალღების ზუსტი ანალიზი ბეტონის შემთხვევაში გაძნელებულია და არც არის მიზანშეწონილი, რადგან ისინი ხასიათებიან დაბალი ენერგიით და სწრაფად მიილევიან მასალაში მაღალი სიხშირის გამო. ამ მოვლენების აკუსტიკური ემისია შესწავლილია სხვა უფრო ერთგვაროვანი მასალებისათვის (ლითონები, პოლიმერები, შენადუღი ნაერთები და სხვა).

ბზარების წარმოქმნის დროს მექანიკური ტალღების გამოსხივება შეიძლება აიხსნას მასალის იმ ნაწილის დინამიკური განტვირთვით, რომელიც ბზარის ნაპირებს ესაზღვრება. ამავე ეფექტს იწვევს ბზარების ნახტომისებური ზრდაც [15].

ვ. ფინკელის [61] ცაზრით, განვითარებადი ბზარის დრეკადი ტალღის წარმოქმნას ხელს უწყობს მისი სიჩქარის პულსაცია, ასევე მიმართულების მკვეთლი ცვლილება, ე.ი. აკუსტიკური სიგნალების წარმოქმნის ერთ-ერთ მიზეზად შეიძლება დავასახელოთ ბზარების განტოტვა.

ბზარების განვითარებისას წარმოქმნილ აკუსტიკურ მოვლენებს იკვლევდნენ მრავალ ნაშრომში [18,19,22,24].

ყოველგვარი მშრალი ხახუნი მიმდინარეობს ზედაპირების მიკროარაერთგვაროვარობების პლასტიკური დეფორმაციების თანხლებით. სხეულების შემადგენელი ნაწილების უერთიერთსრიალის დროს იღრვევა ძველი და ჩნდება ახალი საკონტაქტო უბნები. ყველაფერმა ამან შეიძლება გამოიწვიოს მიკრობზარების

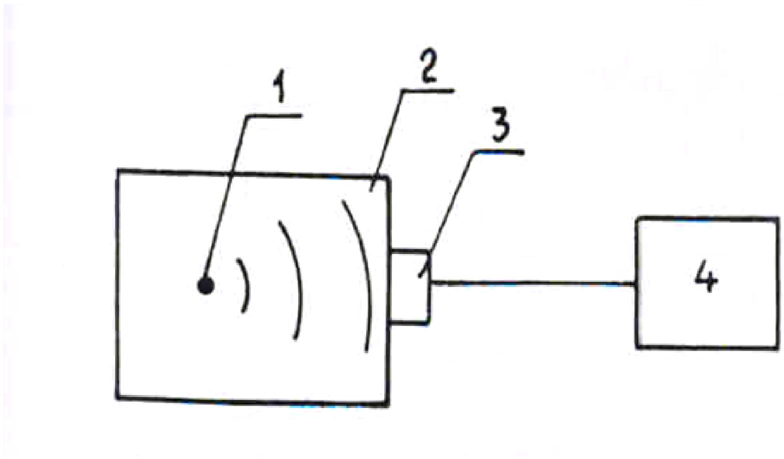
წარმოქმნა ხახუნის ზედაპირებზე. ამგვარი პროცესები მიმდინარეობს სხეულის შიგნითა (ტანში) მისი დეფორმაციების დროს. ხახუნის შედეგად გამოწვეული მექანიკური ტალღები ასევე აკუსტიკური ემისიის ჩამოყალიბების საფუძველია. გერმანელი მეცნიერი ი. კაიზერი მიიჩნევდა გაგლეჯვის ზედაპირების ურთიერთხახუნის პროცესს, რომელიც მასალის შიგნით მისი დეფორმირებისას მიმდინარეობს, აკუსტიკური სიგნალების აღმოცენების ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად [21].

ზემოთ მინიშნებული წყაროები, რა თქმა უნდა, ვერ ამოწურავენ აე-ს იმპულსების წარმოშობის ყველა მიზეზს, მაგრამ ისინი ითვლებიან ძირითად კერებად კონსტრუქციებში ბგერითი რხევების გაჩენისა, აქედან გამომდინარე აკუსტიკური ემისიის, როგორც მოვლენის ცნება შეიძლება ასე განისაზღვროს აკუსტიკური ემისია არის მასალის შიგა სტრუქტურის დინამიკური გადაწყობით გამოწვეული მექანიკური ტალღების გამოსხივების პროცესი" [15].

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ მექანიკური ტალღები შეიძლება გამოთავისუფლდნენ, როგორც სუბმიკროსკოპულ და მიკროსკოპულ დონეებზე (ერთგვაროვანი მასალების მესერებში წარმოქმნილი სრიალის და გაორების პროცესები დეფორმაციისას, ფაზის სწრაფად მიმდინარე მარტენსიტული გარდაქმნები), ასევე მიკროდონეებზეც (ბზარების გაჩენა, მათი განვრცობა და განვითარება, რღვევისა და ხახუნის პროცესები).

წყაროების სიდიდის მიხედვით, იმიტირებული ბგერითი სიგნალები ვრცელდებიან რამდენიმე ათეული რიგის სიხშირეებით, კერძოდ ინფრაბგერიდან (<16 ჰც-ზე, როგორც მიწისძვრების შემთხვევაში) დაწყებული და ულტაბგერით დამთავრებული (<16 კჰც-ზე) [23].

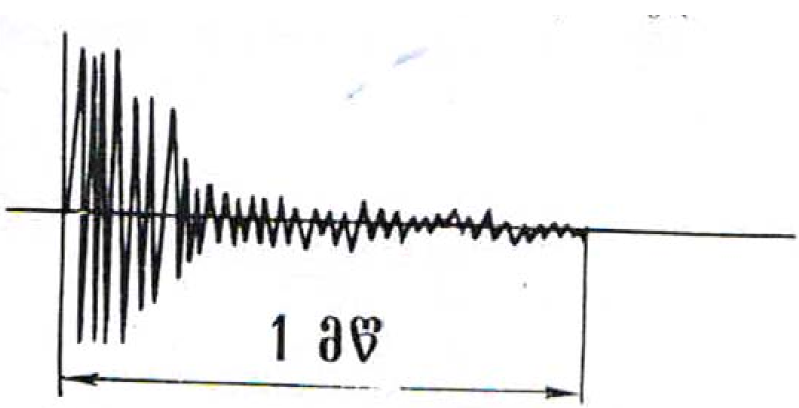
აკუსტიკური სიგნალების რეგისტრაციის უმარტივესი სქემა წარმოდგენილია ნახ. 3.1-ზე



ნახ. 3.1

გამოსაკვლევ სხეულში 2 აღძრული მექანიკური იმპულსები, რომლებიც 1 წყაროს მიერ არიან გამოწვეულნი, გარდაიქმნებიან ელექტრულ სიგნალებად კონტაქტური პიეზოგაქდამქნელით 3. ეს ელექტრული სიგნალები ძლიერდება, გადამუშავდება და რეგისტრირდება ელეტქრული აპარატურით 4.

ტალღური მოძრაობის დისპერსია მყარ სხეულში იწვევს საწყისი მექანიკური სიგნალის ფორმის დამახინჯებას. შემდეგი დამახინჯებების მიზეზია გარდამქნელის თვისებები. საწყისი მექანიკური იმპულსის მცირე ენერგიის გამო, რათა მოხდეს ხელსაწყოს მგრძნობიარობის ამაღლება, როგორ წესი იყენებენ პიეროგადამწოდებს. ამ გადმწოდების მუშაობა დაფუძნებულია გრაკვეული კრისტალების თვისებებზე, რაც გამოიხატება მათზე მექანიკური ზემოქმედების შემთხვევაში ელექტრული სიგნალის აღძვრის ფენომენზე (პიეზოელექტრული ეფექტი), ამიტომ მექანიკური ზემოქმედების ცალკეული ციკლის დროს აღიძვრება თავად გარდამქნელის რეზონანსული რხევები, ხოლო გარდამქნელის ბოლოში გამოსული ელექტროსიგნალს ექნება რადიოიმპულსური სახე, რომელიც ნახ. 3.9 ზე ასახული.



ნახ. 3.2 ელექტრონულ ოსცილოგრაფზე დაფიქსირებული სიგნალის სახე

დეპოლიარიზაციის საშიშროების თავიდან აცილების მიზნით რომელიც შესაძლებელია წარმოიშვას შემხვედრი, ძლიერი ელექტრული ველების (>100 ვოლტ/მმ), დიდი მექანიკური დაძაბულობის, ან ატომური გამოსხივების ზემოქმედების (>$10^{10}$$_{რად}$) დროს, ბგერითი ემისიის გარდამქნეი სიგნალები საკვლევი ობიექტის ზედაპირიდან არინებული უნდა იქნას სპეციალური ტალღაგამტარებით, ოსცილოგრაფზე რეგისტრაციის და შემდგომი ანალიზისათვის.

თუ ორი მექანიკური სიგნალის წარმოშობის დრო აღემატება გარდამავალი პროცესების მიმდინარეობის დროს საკვლევ სხეულში, ამ შემთხვევაში აკუსტიკური ემისიის იმპულსები აღქმულნი იქნებიან ხელსაწყოს მიერ, როგორც დისკრეტული თანმიმდევრობა და ამ ტიპის ემისიას ეწოდება დისკრეტული ემისია.

თუ ბგერითი იმპულსები წარმოიქმნებიან ძალიან მჭიდრო თანმიმდევრობით, მაშინ ფაქტიურად შეუძლებელი ხდება ერთი სიგნალის მეორედან გამოცალკავება. ამ შემთხვევაში საქმე გვაქვს უწყვეტ აკუსტიკურ ემისიასთან, რომელიც ოსცილოგრაფზე გამოისახება მთლიანი ელექტრული ტალღა.

აკუსტიკური ემისიის პარამეტრები. უნდა აღინიშნოს, რომ დღემდე არ არის სტანდარტიზირებული აკუსტიკური ემისიის ტერმინოლოგია. გამოქვეყნებულ სამუშაოებში ერთი და იგივე ცნების აღსანიშნავად ხშირად სხვადასხვა ტერმინი იხმარება, რაც ძალიან ართულებს მიღებულ შედეგების გაგებას და ინფორმაციის გაცვლას. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ სამუშაოში, ჩვენს მიერ გამოქვეყნებული იქნება [15] წიგნში მოყვანილი ტერმინები. აკუსტიკური ემისიის პარამეტრებია: იმპულსების საერთო რაოდენობა (დროის გარკვეულ შუალედში დისკრიტული აკუსტიკური ემისიის იმპულსების საერთო რაოდენობა), ჯამური აკუსტიკური ემისია (დროის საკვლევ ინტერვალში აკუსტიკური ემისიის სიგნალებისრაოდენობა დაწესებული შეზღუდვის (დისკრიმინაციის) დონის პირობებში), აე-ს აქტიურობა (იმპოულსების საერთო რაოდენობაა დროის ერთეულში), აკუსტიკური ემისიის სიგნალების ამპლიტუდა (აე-ს ინტენსივობაა (ჯამური აკუსტიკური ემისია, დროის ერთეულში), აკუსტიკური ემისიის (ტალღის) მაქსიმალური მნიშვნელობა დროის მოცემულ შუალედში), ამპლიტუდური განაწილება (დროის არჩეულ შუალედში აე-ს იმპულსების ამპლიტუდების განაწილება), აე-ს სიგნალების ენერგია (დროის

მოცემულ ინტერვალში, წინასწარ დადგენილი სიხშირის ზონაში, გამოყოფილი ენერგია), აე-ს სპეციალური სიმკვრივე (აე-ს სიგნალების განაწილება ენერგიის სიხშირის მიხედვით).

როგორც აღნიშნული იყო, მასალაში წარმოქმნილი მექანიკური ტალღები, პიეზოგარდაქმნელით გარდაიქმნება ელექტრულ სიგნალებად. პრაქტიკაში ძირითადად ამ ელექტრული სიგნალებით ოპერირებენ, რომლებიც ასევე შეგვიძლია დავახასიათოთ ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრებით.

ჩვენთვის ცნობილია, რომ აე-ს სიგნალები წარმოიქმნებიან დიდი სიხშირის დიაპაზონში – სმენით აღსაქმელი ხმაურიდან ულტრაბგერებით იმპულსებამდე. პრაქტიკულად გასაზომი სიხშირე იმყოფება 30 ჰერცისა და 200 კილოჰერცის შუალედში. გასაზომი დიაპაზონის შეზღუდვა ძირითადად განპირობებულია სხვადასხვა ხელის შემშლელი ფაქტორების თავიდან აცილების მიზნით (როგორებიცაა დანადგარის ხმაური, წნეხის ფილების მოძრაობა და სხვა). ასე მაგალითად, დ. მოსესოვის [37] მონაცემებით აე-ს იმპულსების სიხშირის დიაპაზონი ბეტონისათვის იცვლება 20 კჰც-დან 120 კჰც-მდე. სხვა ექსპერიმენტატორები [71, 72] იყენებენ აპარატურას, რომლის რხევის სიხშირის დიაპაზონი მერყეობს 1,6 კჰც-დან 50 კჰც-მდე, შესაბამისი გარდამქნელების და ფილტრების შეღევით სიხშირის სპექტრი ცალკეული ექსპერიმენტებისათვის მიღებულია სხვადასხვა.

აკუსტიკური ემისიის სიგნალების მართებული ინტერპრეტაციისთვის აუცილებელია ნათელი მოვფინოთ, თუ რამდენად შეესაბამებიან ოსცილოგრაფზე რეგისტრირებული იმპულსები მასალაში დატვირთვისას მიმდინარე დესტრუქციულ მოვლენებს. ამ მიზნით ს. ჟურკოვის და მისი მოწაფეების ნაშრომში [28] გამოკვლეული იქნა რაოდენობრივი ურთიერთდამოკიდებულება მყარ ტანში წარმოქმნილ დეფექტებსა და დარეგისტრირებულ ელექტრულ სიგნალებს შორის. ამასთან რეგისტრირდებოდა, როგორც სიგნალების საერთო რაოდენობა, ასევე მათი ამპლიტუდური განაწილებაც. შემდეგ ხდებოდა ნიმუშის განტვირთვა და დატვირთვის გამო მასში გაჩენილი ბზარების გამოკვლევა ხდებოდა ოპტიკური მიკროსკოპით, ნიმუშიდან ამოკვეთილი ნახეხების (შლიფების) მეშვეობით. ექსპერიმენტების გაკონტროლების მიზნით ნახეხის (შლიფის) ამოღება ხდებოდა დაუტვირთავი ნიმუშებიდანაც. ნახეხების შედარებამ ცხადყო, რომ მიკრობზარების უმეტესობა წარმოშობილ იქნა დატვირთვის შემდეგ, თუმცა მათი გარკვეული კონცენტრაცია

დაუტვირთავ ნიმუშებშიც აღინიშნებოდა. ნახეხის ზედაპირზე ბზარების რაოდენობის დათვლის შემდეგ წარმოებდა მათი სეპარაცია ზომების მიხედვით. ამის შემდეგ ნიმუშიდან წარმოებდა 5000 მკმ სისქის ნახეხის ამოღება, მასზე ბზარების დატვლა და ა.შ. ამან საშუალება მისცა ავტორებს მიეღოთ ბზარების კონსცენტრაციის სურათი ნიმუშის მთელს მოცულობაში და ეს მონაცემები შეედარებინათ იმპულსების მთვლელ აპარატზე დაფიქსირებული აკუსტიკური სიგნალების სპექტრისათვის. აღმოჩნდა, რომ ნახაზებზე დავთლილ ბზარების და აკუსტიკური სიგნალების რაოდენობებს შორის სხვაობა მხოლოდ რამდენიმე ერთეულს შეადგენდა. ასევე გამოკვლელული იქნა დამოკიდებულება ბზარის სიგრძესა და გამოსხივებული იმპულსის ამპლიტუდას შორის. ამისათვის ორ ნიმუშს შორის მაგრდებოდა სხვადასხვა დიამეტრის მინის ძაფები. ღუნვისას ეს ძაფები მყიფედ იმსხვრეოდნენ და მათი მსხვრევისას წარმოქმნილი დრეკადობის იმპულსი რეგისტრირდებოდა პიეზოგადამწოდით, რომელიც თავის მხრივ მიმაგრებული იყო ნიმუშის ზედაპირზე, ელექტრულ სიგნალად გარდაქმნილი ტალღები შემდგომ ხვდებოდნენ ამპლიტუდურ ანალიზატორში. სიგნალის ამპლიტუდის პარამეტერების დამოკიდებულება მინის ძაფების დიამეტრზე წრფივი აღმოჩნდა.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ეჭვს აღარ იწვევს რომ აე-ს პარამეტრები უტრყუარ ინფორმაციას გვაწვდიან მასალის შიგნით მიმდინარე სტრუქტურულ ცვლილებებზე და ხელსაწყოს მგრძნობიარობის ზღურბლის მართებული გრადუირებით შეიძლება მოვიცვათ მასალის დესტრუქციის მთელი პროცესი.

მიკრობზარების წარმოქნის და დაგროვების პროცესების შესასწავლად სხვადასხვა მეცნიერის მიერ გამოყენებული იქნა აე-ს სხვადასხვა პარამეტრი, სხვადასხვა შეთანხმებით. ასე მაგალითად, ს. ჟურკოვსკისა და მისი მოწაფეების სამუშაოებში მიკრობზარების დაგროვების კინეტიკის შესწავლის და მასალების ხანგამძლეობის პროგნოზირების მიზნით გამოყენებოდა აე-ს იმპულსების რაოდენობისა და ამპლიტუდური განაწილების ანალიზი. მიმოხილვით ნაწილში აღნიშნული იყო რომ გ. პოჩტოვიკი და ნ. ტემნიკი ბეტონის სიმტკიცის შესაფასებლად იყენებდნენ ბზარწარმოქმნის ენერგიის პარამეტრებს. აკუსტიკური ემისიის ენერგია და სიგნალების ამპლიტუდური ანალიზი გამოიყენება აგრეთვე ვ. ლოგუნოვისა და ვ. მიხაილევსკაიას ნაშრომში [33], ბეტონის ხანგრძლივი წინაღმდეგობის პროგნოზირებისათვის.

გამოყენებული აღჭურვილობა და აპარატურა. აკუსტიკური ემისიის მეთოდის გამოყენება მოითხოვს მუშაობის განსაკუთრებულ პირობებს, რადგან ყოველგვარი გარეშე ხმაური ექსპერიმენტების ჩატარების დროს წარმოადგენს ხელის შემშლელ ფაქტორს – ცრუ სიგნალების წყაროს. ამიტომ იმ გამოსაცდელ მანქანებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ ნიმუშის დატვირთვას, მოეთხოვებათ უხმაურო, ჩუმი მუშაობა. როგორც ცნობილია, ყველა ჰიდრავლიკური წნეხი აღჭურვილია ჰიდროტუმბოებით, რომელთა მოძრაობაც უზრუნველყოფილია ელექტროძრავებით. ჰიდროტუმბოების მუშაობისას აღიძვრება ვიბრაციები, რომელიც გადაეცემა ჰიდრავლიკურ წნეხის ძალოვან დანადგარს და მასში ჩაჭედილი ნიმუში განიცდის ვიბრაციას. ამ მდგომარეობაში აკუსტიკური გადამწოდი, რომელიც ნიმუშის წიბოზეა მიჭერილი, იღებს ცრუ სიგნალებს რხევის შედეგად და აე-ს ჭეშმარიტი სიგნალები ძნელად გასარჩევი ხდება. ხელის შემშლელი ხმაურის თავიდან აცილების მიზნით ან უარი ითქვას ელექტრონულ ამძრავიან ჰიდროდგუშზე, ან ჰიდროდგუში უნდა დაცილდეს წნეხის ძალოვან ნაწილს ისეთ მანძილზე, რომელზეც ვიბრაცია და რხევები საგრძნობი აღარ იქნება.

ჰიდავლიკური წნეხის მიერ განვითარებული ძალვა ვიზუალურად კონტროლირდება სანიმუშო მანომეტრით. დატვირთვისას აღნიშნული ძალვა მანომეტრის გარდა იზომება სპეციალურად დამზადებული და წნეხში ჩამონტაჟებული ტენზომეტრული ძალის საზომით, რომელიც ბურდონის მილაკს წარმოადგენს და რომელზეც ორი მხრიდან დაწებებულია ტენზორეზისტორები. მილაკი ორივე ბოლოთი ჩაჭერილია კორპუსში და მათგან ერთ-ერთით მისი შიგა ღრუ მიერთებულია წნეხის ცილინდრის ღრუსთან, რის საფუძველზეც ის დეფორმირდება. მილაკზე დამაგრებულ ტენზორეზისტორები აღიქვამენ მილის ზედაპირზე განვითარებულ დეფორმაციებს. ამ დროს აღიძვრება ძალვის პროპორციულ ელექტრონული სიგნალი. ეს სიგნალი შემდგომში ძლიერდება ტენზოგამაძლიერებელი მოწყობილობით და შეიძლება გაიზომოს ან მიეწოდოს გრაფოამგებს.

ამგვარად, გამოყენებული ელექტრონული, გამაძლიერებელი და მარეგისტრირებელი აპარატურა საშუალებას იძლევა ჩაწერილი იქნას გრძივი, განივი და მოცულობითი დეფორმაციების დაიგრამები, დატვლილი იქნსა დატვირთვისას წარმოშობილი აე-ს იმპულსების საერთო რაოდენობა და დაფიქსირებული იქნას მათი განაწილება დატვირთვის ზრდის მიხედვით. ხოლო ელექტრული ოსცილოგრაფის

ეკრანზე წარმობდეს ვიზუალური დაკვირვება შემოსული სიგნალების ფორმაზე, ზომებზე და ჩაქრობის ხარისხზე.

ულტაბრგერთი კონტროლის მეთოდების კლადიფიკაცია

ულტარბგერითი კონტროლის მეთოდები ძირითადა გამოიყენება კონსტრუქციაში ფარული დეფექტების გამოსავლენად. ისინი არაპირდაპირ მეთოდებს მიეკუთვნება და ფლობენ სპეციფიკურ შესაძლებლობებს, რომლებიც დაფუძნებულია კონსტრუქციის სიღმეში ულტრაბგერის შეღწევის უნარზე.

ულტრაბგერითი კონტრლის მეთოდებს საფუძვლად უდევს ულტაბგერის იმპულსების არეკვლა დეფექტიდან, რის შედეგად განისაზღვრება ზედაპირიდან დეფექტის მდებარეობის სიღმე, რომელიც დამოკიდებულია კონსტრუქციაში ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარეზე და დეფექტამდე მანძილის გავლის დროზე.

დეფექტის მდებარეობა ზედაპირიდან განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$h = \frac{ct}{2} \qquad (3.1)$$

სადაც: c – ულტაბგერის გავრცელების სიჩქარეა, მმ/წმ;

t – დეფექტამდე და უკან ულტაბგერის გავრცელების დრო, წმ.

ულტაბგერითი დეფექტოსკოპია დაფუძნებულია მიმართული ტალღის თვისებებზე. ტალღა გარემოში მიმართულად, სხივის სახით ვრცელდება და აირეკლება გარემოს საზღვრიდან ან დეფექტებიდან, რომელაც სხვა აკუსტიკური თვისებები აქვს.

მოწყობილობის ტიპებიდან გამომდინარე შეიძლება გამოვყოთ ულტაბგერითი კონტროლის შემდეგი მეთოდები.

1. ექოიმპულსური მეთოდი (ექოლოკაციის მეთოდი) დაფუძნებულია ულტაბგერითი რხევის მოკლე იმპულსების კონსტრუქციაში გატარებასა და იმ ექოსიგნალების რეგისტრაციაზე, რომელიც აირეკლებადეფექტიდან და

მიემართება მიმღებისაკენ. დეფექტის ნიშანია ექოსიგნალი დეფექტოსკოპის ეკრანზე.

მეთოდი საკმაოდ არის გავრცელებული პრაქტიკაში მაღალი მგრძნობელობის, რეალიზაციის სიმარტივისა და უნივერსალურობის გამო.

2. ჩრდილური მეთოდი (გამჭოლი გამტარობის მეთოდი). ამ მეთოდში გამომსხივებელი და მიმღები განლაგებულია თანარ რძულიად კონსტრუქციის სხავადასხვა მხარე დეფექტის ნიშანი არის გამომსხივებლიდან მიმღებამდე მისული სიგნალის ამპიტუდის შემცირება. მეთოდის რეალიზება შესაძლებელია ფირფიტის, მილის და ა.შ. კონტროლისათვის, როგორც იმპულსური, ისე უწყვეტი გამოსხივებით.
3. სარკისებრ-ჩრდილური მეთოდი დაფუძნებულია ტალღის სიგნალის შესუსტებაზე, რომელიც არეკლილია კონსტრუქციის მოპირდაპირე ზედაპირიდან. შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ერთი გარდამქმნელი. დეფექტის ნიშანია მიღებული სიგნალის ამპიტუდის შ მცირება. წარამტებით გამოიყენება ფურცლოვანი ლითონის, ნაჭედის, მილის, რელსის და ა.შ. კონტრლისათვის.
4. იმპენდანსის მეთოდი. განკუთვნილია წვრიკედლიანი ლითონური და პლასტმასის შემონაკერების მირჩილვის ან მიწებების ხარისხის განსაზღვრისათვის მყარ დანამატთან და დაფუძნებულია ღ ღოს რხევის რეჟიმის ანალიზზე (პიეზოელემენტით), მიყრდნობილია კონსტრუქციის ზედაპირზე დეფექტის არსებობისას ზედაპირის მოცემული უბნის აკუსტიკური იმპენდანსი მცირდება, რაც იწვევს ღეროს რხევის ამპლიტუდის გაზრდას, მის ბოლოზე მექანიკური ძაბვის შემცირებას, რხევის ფაზის ცვლილებას და რეზონანსული რხევის სიხშირის გადანაცლებას. ამ ნიშნებიდან ნებისმიერი ამტკიცებს დეფექტების არსებობას.
5. თავისუფალი რხევის ანუ სპექტრული მეთოდი. დაფუძნებულია კონსტრუქციის საკუთარი რხევის სიხშირის სპექტრის ანალიზზე, მასზე ვიბრაციული დარტყმის შემდეგ სპექტრის ანალიზი წარმოებს სმენით (ჭურჭლის წკარუნის მიხედვით) ან სპეციალური აპარატურის გამოყენებით. მეთოდს წარმატებით გამოიყენებენ მასალების დრეკადი

მუდმივების შეფასებისათვის თავისუფალი რხევის აღგზნების გზით განსაზღვრული ფორმის და ზომის ნიმუშში, მაგალითად ღეროში.

6. რეზონანსული მეთოდი დაფუძნებულია რეზონანსული რხევის აღგზნებაზე და ანალიზზე კონსტრუქციის საკვლევ მოცილობაში. რეზონანსული სიხშირის მიხედვით განაზღვრავენ კონსტრუქციის სისქეს. დეფექტის არსებობას უჩვენებს ნორმალურთან შედარებით სისქის ნაკლები მნიშვნელობა, რეზონანსული პიკის ოსცილოგრაფის ეკრანზე შესუსტება ან გაქრობა.

მეთოდების პირველი ჯგუფი განიხილავს ულტაბგერის ლოკალურ ათგზნებას, ხოლო მეორე ჯგუფი – ულრაბგერითი აღგზნების მთელ კონსტრუქციაში ან მთელი სისქის მიხედვით გამომსხივებელზე.

ვინაიდან ულტრაბგერითი თალღა, რომელიც გამოყენებულია პრაქტიკაში სიხშირის მეგაჰერცულ დიაპაზონზე, არ გადის ჰაერში, ამიტომ d ღრეჩო გარდამქმნელსა და საკონტროლებელ კონსტრუქციას შორის ავსებული უნდა იყოს კონტაქტური გარემოთი (საკონტაქტო სითხით).

ულტრაბგერითი ტესტირება წარმოადგენს დაუზიანებელი ტესტირებას, რომელიც ეყრდნობა ბეტონში ულრაბგერითი იმპულსური სიჩქარის ანათვლებს.

მიმართულება რომლითაც ვრცელდება მაქსიმალური ენერგია წარმოადგენს მართ კუთხეს გადაცემის ზედაპირისადმი, შესაძლებელია იმპულსების აღმოჩენა ბეტონში სხვა მიმართულებითაც. ამიტომაც შესაძლებელია გაიზომოს იმპულსური სიჩქარე ორი გადამცემის განთავსებით პორ საპირისპირო სიბრტყეებზე (პირდაპირი გადაცემა), ან მეზობელ სიბრტყეებზე (ნახევრად პირდაპირი გადაცემა), ან ერთიდაიგივე სახე (არაპირდაპირი ან ზედაპირული გადაცემა).

შენიშვნა 1. შესაძლებელია აუცილებელი იყოს გადამწოდების განთავსება საპირისპირო სიბრტყეებზე, მაგრამ არა ერთმანეთის საპირისპირო სიბრტყეზე. ამგვარი განთავსება ითვლება ნახევრად პირდაპირ გადაცემად.

შენიშვნა 2. არაპირდაპირი გადაცემის მოწყობა არის ყველაზე ნაკლებ მგრძნობიარე და უნდა გამოყენებული იქნას, როდესაც ბეტონის მხოლოდ ერთი სიბრტყე არის მისაღები, ან როდესაც ბეტონის ზედაპირის ხარისხი შედარებით საერთო ხარისხთან არის მისაღები.

შენიშვნა 3. ნახევრად პირდაპირი გადაცემის მოწყობა აქვს შუალედური მგრძნობიარობა ნასესხები მოწყობებს შორის და უნდა გამოყენებული იქნეს მხოლოდ მაშინ, როდესაც პირდაპირი მოწყობა არ შიძლება გამოყენებული იქნეს.

პირადპირი გადაცემისათვის, ნაწილაკის გარბენის სიგრძე წარმოადგენს მანძილს გადამწოდებს შორის და როდესაც ეს შესაძლებელია, ნაწილაკის გარბენის სიგრძის გაზომვის სიზისტე უნდა იყოს ±1% და სიზუსტე უნდა იყოს ჩაწერილი.

ნახევრად პირდაპირი გადაცემისათვის, საერთოდ დადგენილია, რომ საკმარისი სიზუსტით ნაწილაკის გარბენის სიგრძედ მიიჩნევა გაზომილი მანძილი გადამწოდების სიბრტყეების ცენტრებს შორის. ნაწილაკის გარბენის სიგრძეს სიზუსტის შეფასება დამოკიდებულია გადამწოდის ზომაზე ცენტებს შორის მანძილთან შედარებით და იგი უნდა შეფასდეს.

პირდაპირ და ნახევრად პირდაპირი გადაცემისათვის იმპულსის სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$V = \frac{L}{T} \tag{3.2}$$

სადაც: V – არის იმპულსი სიჩქარე, კმ/წმ;

L– არის ნაწილაკის განარბენის სიგრძე, მმ-ში;

T – არის იმპულსი მიერ სიგრძის გავლის დრო, სმ.

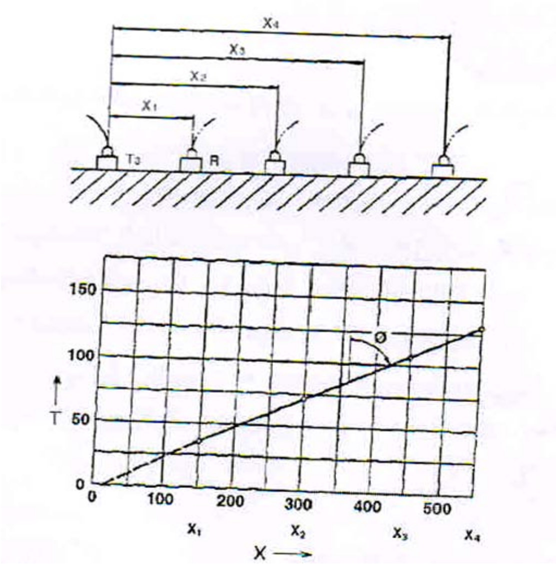
იმპულსის სიჩქარის საბოლოო განსაზღვრა შესაძლებელია გამოიხარტოს 0,01 კმ/წმ ან სამი თანრიგიანი ციფრით.

არაპირდაპირი გადაცემისას არსებობს გაურკვევლობა დაკავშირებული გადაცემის ტრაექტორიის ზუსტ სიგრძესთან გზაზე, გამომდინარე გადამწოდისა და ბეტონს შორის უმნიშვნელო საკონტაქტო ფართიდან. ამიტომ სასურველია, შესრულდეს მრეწველობა მრავალჯერადი გაზომვები გადამწოდების ერთმანეთთაისაგან განსხვავებულ მაზილზე დაშორებით.

ამისათვის გადამცემი გადამწოდი უნდა განთავსდეს ბეტონის ზედაპირის ფიქსირებულ წერტილში P და მიმღები გადამწოდი უნდა განთავდეს ფიქსირებული ნაზრდით X ზედაპირზე შერჩეული ხაზის გასწვრივ. გადაცემის დრო აღინიშნება წერტილებად გრაფიკზე და ასახავს მათ დამოკიდებულებას გადამწოდებს შორის მანძილზე. მაგალითად ასეთი გრაფიკი ნაჩვენებია ნან. 3.3-ზე.

წერტილზე გამავლი დახაზული საუკეთესო სწორი ხაზის დახრა გაიზომება და ჩაიწერება როგორც იმპულსის საშუალო სიჩქარე ბეტონის ზედაპირზე სელცეული

ხაზის გასწვრივ. როცა ამგვარად გაზომილი და ჩაწერილი წერტილები ასახავენ წყვეტას, მოსალოდნელია, რომ ზედაპირზე არსებობენ ბზარები ან ზედაპირული ფენა უხარისხოა და სიჩქარის გაზომვა ამ შემთხვევაში არასაიმედოა.



ნახ. 3.3 იმპულსის სიჩქარის დადგენა არაპირდაპირი (ზედაპირული) გადაცემისას

დახაზეთ უჯრედები ბეტონზე და გაზომეთ გარბენის სიგრძე უჯრედების წერილებს შორის, ამით შესაძლებელია შევაფასოთ ბეტონის ერთგვაროვნება. მნიშვნელოვანია გრაფიკების გამოყენება ცდების შედეგების ნატლად წარმოსაჩენად და ბეტონის საშუალო ხარისხის დემონსტრირებისათვის.

როდესაც ულტრაბგერითი იმპულსი ბეტონში გაივლის შეხვდება ბეტონის და ჰაერის გაყოფის ზედაპირს, ამ დროს ენერგიის გადაცემა გაყოფის ზედაპირიდან უმნიშვნელოა (დიფრაქციისა და არეკვლის გამო) ასე რომ ნაწილაკის გარბენის სიგრძე უნდა აღემატებოდეს მსგავსი დეფექტების გარეშ ბეტონის შემთხვევას. ეს მოვლენა შეიძლება გამოვიყენოთ დეფექტების, ფუღუროების, დაზიანებული ადგილების, ბზარების ადგილმდებარეობის დასადგენად.

თუ დეფექტის სიგრძე ძალზე მცირეა შეუძლებელია შეფასების გაკეთება (მაგ. შეუძლებელია ფუღუროების გამოვლენა რომელთა სიგრძე ნაკლებია თავაკის დიამეტრზე).

მასალების მნიშვნელოვანი ფიზიკური თვისებები, რომლებიც გავლენას ახდენენ იმპულსის სიჩქარეზე, წარმოადგენენ დრეკადობის მოდულს და სიმკვრივეს. ბეტონში ეს თვისებები არის დამოკიდებული შემავსებლის ტიპზე, მის პროპორციებზე

(ნარევში) და მის ფიზიკურ თვისებებზე და ცემენტის ფიზიკურ თვისებებზე, რომელიც დაკავშირებულია ძირითადად, ორიგინალური წყალ-ცემენტის შეფარდებაზე და ბეტონის ასაკზე. მეორე მხრივ, ბეტონის სიმტკიცე უფრო მეტად დამოკიდებულია წყალ-ცემენტის შეფარდებაზე ვიდრე შემავსებლის ტიპზე და შემავსებლის და ცემენტის პროპორციაზე. ეს დამოკიდებულება იმპულსის სიჩქარესა და ბეტონის სიმძლავრეს შორის ფიზიკურად არაპირდაპირია და უნდა დადგინდეს კონკრეტული ბეტონის ნარევისათვის. უცნობი ბეტონისათვის სიმძლავრის შეფასება მხოლოდ იმპულსის სიჩქარის საფუზველზე არ არის სარწმუნო.

როდესაც ბზარის ადგილმდებარეობა დადგენილია, ფიქსირებულია ორი ანატვალი, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 3.1 (1,2). ერთი ანათვალი აიღება როდესაც თავაკები სიმძლავრისტულად არის განთავსებული ბზარის (2) მიმართ, მეორე შემთხვევაში იგივე მანძილი ცეცებს შორის აიღ ბა დეფექტების გარეშე ზედაპირზე (1).

შემდგომი ფორმულით შეიძლება გამოთვლილი იქნას “h” სიღრმის დეფექტი, იმ პირობით რომ ბზარი არ არის წყლით გავსებული:

$$h = x\sqrt{\frac{t_c^2 - 1}{t_s^2}} \qquad (3.4)$$

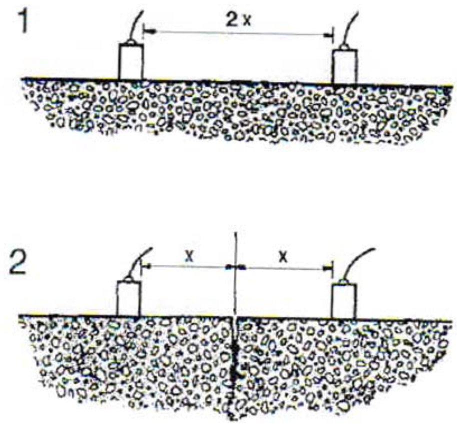
სადაც: x –ნახევარი მაძილი ცეცებს შორის;

h –ბზარის სიღმე;

T_c – ნაწილაკის გარბენის სიგრძე ბზარზე;

t_s – ნაწილაკის განარბენის სიგრძე ზედაპირის გასწვრივ ბეტონში დეფექტების გარეშე.

“h” და x ერთნაირ ერთეულებში იზომება.



ნახ.3.4 ბზარის სიღმის შეფასებისათვის თავაკების ადგილმდებარეობა

კაპილაური კონტროლის მეთოდი

კაპილაური მეთოდის შესასრულებლად გამოიყენება პრეტრანტის სითხეები მოცემული ნახ. 3.5-ზე

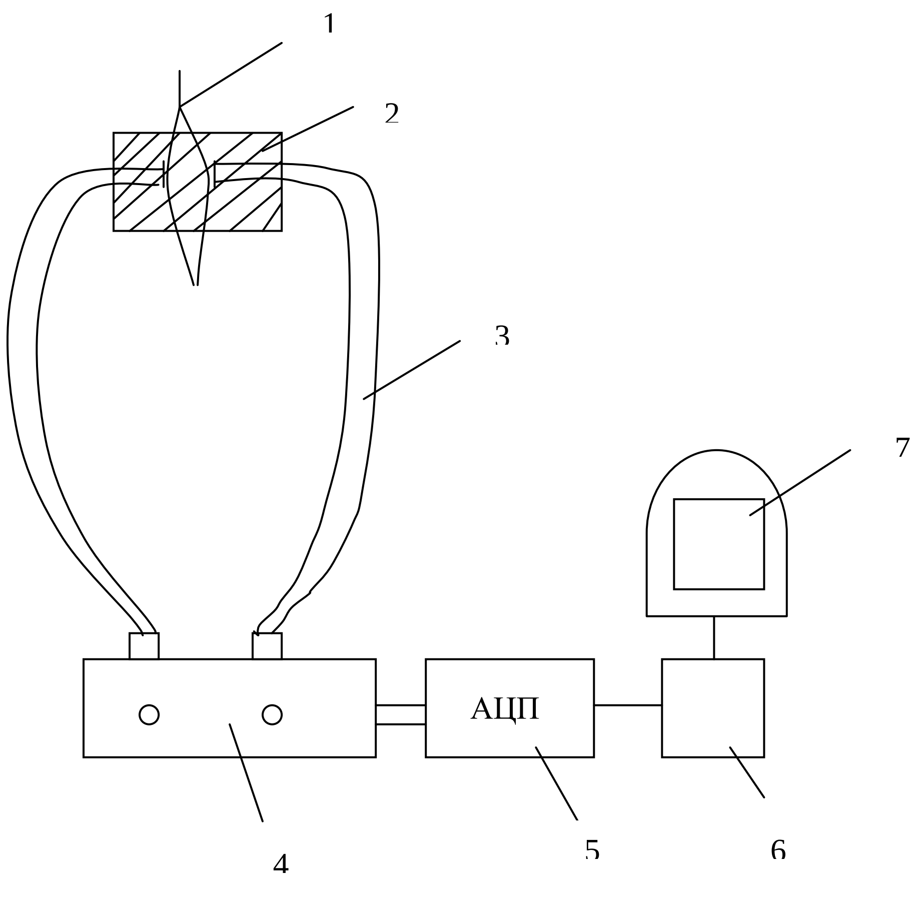
ნახ.3.5. პრენტრანტის სითხეები

პრეტრანტს ჯერ ასხავენ წითელიდან ბზარეზე სითხეს, 5 წუთს გააჩერებენ შემდეგ შუაში მოთავსებული ბალონიდან და ბოლოს მესამე ბალონიდან ნახ.3.5 რის შედეგადაც უხილავი ბზარი გამოვა ზედაპირზე.

ბზარის სიგანის გაზომვის მეთოდი და მოწყობილობა

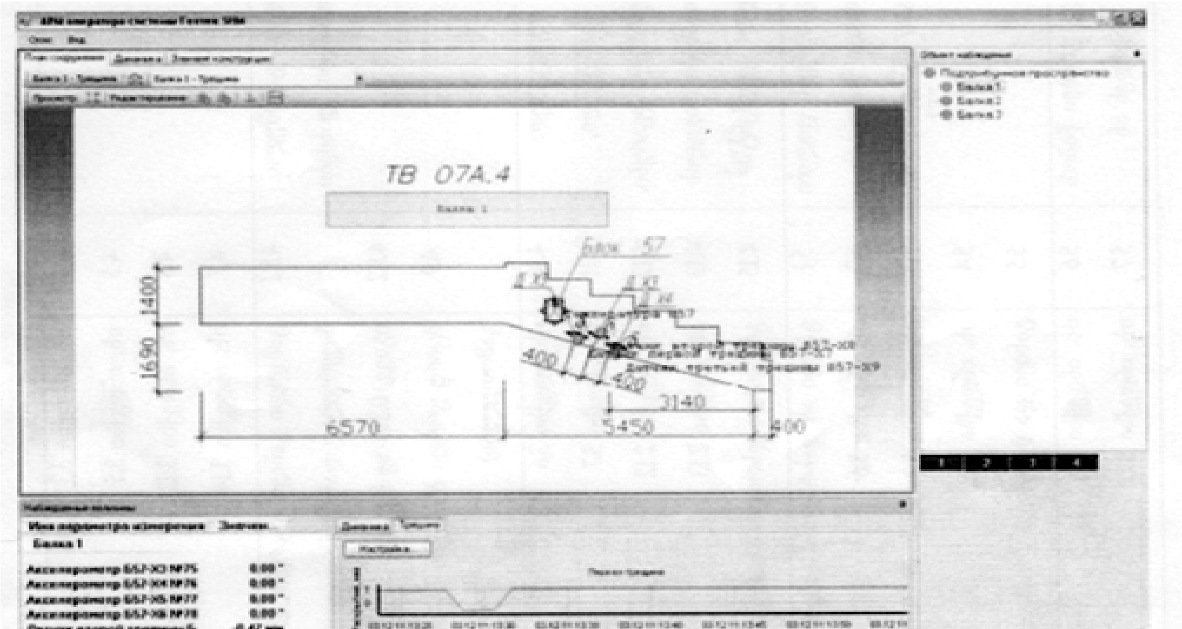
რკინაბეტონის კონსტრუქციების უმეტესობისათვის СНиП 2.03.01-84* თანახმად ბზარის გახსნის სიგანის სიდიდე ნორმირდება. ნორმირებული მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილ 2-ში СНиП 2.03.01-84*.

იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ბზარის გახსნის დინამიკა, ჩვენს მიერ დამუშავებულია მეთოდი და შესაბამისი ბოჭკოვან-ოპტიკური მოწყობილობა, რომლის სქემა მოცემულია ნახ. 3.6-ზე.



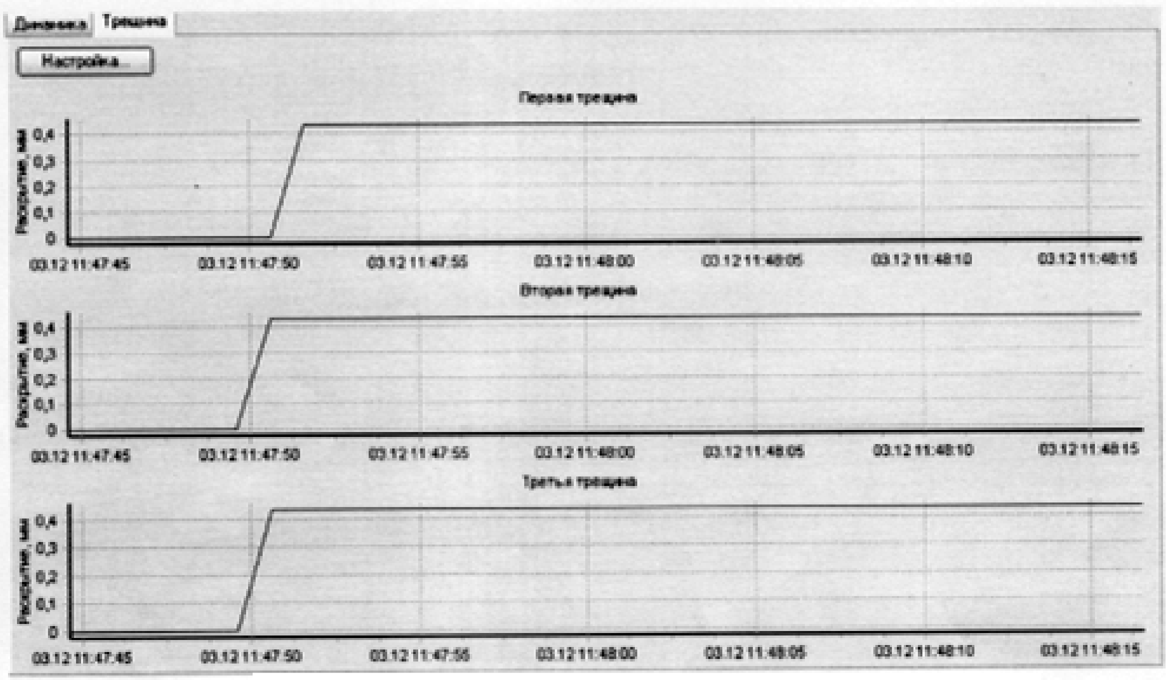
ნახ. 3.6. 1 - ბზარი, 2 - თაბაშირის ფენა, 3 – ბოჭკოვან-ოპტიკური შუქსატარი, 4 – სინათლის გამომსხივებელი და მიმღები, 5 – ანალოგიურ ციფრული გარდამქმნელი, 6 – პროცესორი, 7 - მონიტორი

წარმოდგენილი მოწყობილობა მუშაობს შემდეგნაირად: კონსტრუქციაზე წარმოშობილ ბეწვბზარზე (1), რომელიც ჯერ არ არის საშიში მოითხოვს დაკვირვებას ვამაგრებთ თაბაშირის (2) საშუალებით ორ ბოჭკოვან-ოპტიკურ შუქსატარს (3) ერთმანეთის თათარღერძულად მათ შორის ღერჩო ტოლია მათი დიამეტრის ნახევარის, მეორე ბოლოებით შუქსატარები მიერთებულია გამომსხივებელზე და მიმღებზე (4), მიმღები (4) მიერთებულია ანალოგიური ციფრულ გარდამქნელებზე (5), პროცესორზე (6) და მონიტორზე (7). გამომსხივებლიდან სინათლის ნაკადი ვრცელდება პირველ შუქსატარში და გადადის მეორე შუქსატარში, თუ ბზარის სიგანე შუქსატარის დიამეტრზე ნაკლებია. მეორე შუქსატარის გავლის შემდეგ სინათლის სხივი მოხვდება მიმღებზე, მიმღებიდან (4) ოპტიკური სიგნალი ელექტრული სიგნალის სახით გადაეცემა ანალოგიურ ციფრულ გარდამქნელს (5) რომელიც სიგნალს დაამუშავებს და გარდაქმნის ციფრულ ფორმაში და გადასცემს პროცესორს (6), პროცესორში დევს დევს ჩვენს მიერ დამუშავებული პროგრამა, რომელიც მონიტორზე (7) გვაძლევს გრაფიკულ გამოსახვას, ბზარის გახსნის დინამიკას, როდესაც ბზარის გახსნა კრიტიკულზე მოდის ხელსაწყო იძლევა განგაშის სიგნალს, ხმოვანს ან წითელი ნათებით.

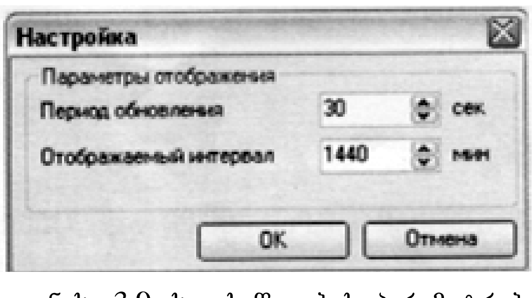


ნახ. 3.7 ოპერატორის სამუშაო ადგილი

გადაცემის მუშაობის გრაფიკული სახე ბზარების გასხნისას წარმოგვიდგება დიაგრამის სახით (ნახ. 3.7). მოცემული ფუძე აისახება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა აირჩევა ერთი ობიექტი (მაგ. ,,კოჭი'' 1) ეკრანზე გამოისახება მონაცემები, მიღებული ბოლო 24 საათის განმავლობაში. ამასთან გრაფიკების განახლება ხდება 1,5 წთ-ის ინტერვალით. ამ ხელსაწყოების შეცვლა შეიძლება დიალოგის დახმარებით, ღილაკით ,,ხელსაწყოები'' (ნახ.3.14). განახლების პერიოდი გავლენას ახდენს გრაფიკების განახლების ინტენსივობაზე. ასახული ინტერვალი იძლევა შუალედურ დროს, რომელიც იქნება გამოსახული გრაფიკზე.



ნახ. 3.8 ფუძე ,,ბზარი''



ნახ. 3.9 ხელსაწყოების პარამეტრები

ბზარის გახსნის გადაცემის მნიშვნელობა შეიტანება პროტოკოლის საერთო სისტემის მონიტორინგში, მოცემული ნახ. 3.7-ზე. პერიოდულობა დამოკიდებულია ხელსაწყოების სისტემაზე, პროტოკოლირება განხორცილდება მთელი დროის განმავლობაში სისტემის მუშაობისას.

Дата	Датчик первой трещины Б57-Х7	Датчик второй трещины Б57-Х8	Датчик третьей трещины Б57-Х9
04.12.2008 10:14:09	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:12	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:15	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:18	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:21	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:24	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:28	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:31	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:34	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:37	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:40	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:43	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:46	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:49	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:52	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:55	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:14:58	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:01	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:04	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:07	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:10	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:13	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:16	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:19	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:22	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:25	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:29	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:32	0,9344743	0,4338631	0,4338631
04.12.2008 10:15:35	0,9344743	0,4338631	0,4338631

ნახ. 3.10 გადაცემით მიღებული პროტოკოლი

სისტემის მონიტორინგის გაცნობა შესაძლებელია ,,პროტოკოლის ნახვის'' ინსტრუმენტის დახმარებით (მენიუ ,,სერვისი'' > ,,პროფილის დათვალიერება'' (ნახ. 3.10)).

მონაცემების დათვალიერებისათვის საჭიროა შესრულდეს შემდეგი მოთხოვნები:

1. მოვნიშნოთ მარცხნივ გადამცემები, რომელთა ნახვაც თქვენ გინდათ, TB7A.4-ის შემთხვევაში, შეიძლება ავირჩიოთ პროფილური გადამწოდები, მეორე და მესამე ბზარების ობიექტებზე (კოჭი 1);
2. დაზუსტდეს მოთხოვნილ დროს ინტერვალი, ვიხელმძღვანელოთ იტერაციით პირველ და მეორე ჩანაწერების საფუძველზე;

3. თუ აღებულია დროის დიდი ინტერვალი, მაშინ რეკომედირებულია გაკეთდეს არჩევა ყველა ჩანაწერებიდან მიმდევრობით, ეს მონაცემები, შეიძლება დაზუსტდეს ველში ,,ავირჩიოთ ყოველი ჩანაწერი''.
4. დავაჭიროთ ღილაკზე ,,განახლება''.

ზღვარის მნიშვნელობის მოძებნა იწვევს ბზარის გახსნის მდგომარეობის კონსტრუქციის გადასვლას სახიფათო მდგომარეობაში. სისტემა ინფორმაციას იღებს ვიზუალური და ხმოვანი სიგნალით (ნახ. 8-9) ზღვრული მნიშვნელობები აიღება ცხ.2-დან და მიიღება СНиП 2.03.01-84*/1/.

3.3.3 აკუსტიკური ემისიის და ულტრაბგერითი კონტროლის მეთოდებით აღმოჩენილი დაზიანებების ევოლუციის დადგენისათვის ფეაქტალური თეორიის გამოყენება

უსაფრთხოების და საემედოობის შეფასება არმირებული ბეტონის კონსტრუქციებში, წარმოადგენს ძალიან რთულ პრობლემას, რომელიც მეცნიერული კვლევების პირველ რიგში დგას. ამიტომ დიაგნოსტიკის და კონტროლის მეთოდები ხდება სულ უფრო მნიშვნელოვანი კონსტრუქციის საიმედობის და მდგომარეობის შეფასებისათვის. მეთოდებს შორის ყველაზე კარგ ეფექტურობას წარმოადგენს არამრღვევი კონტროლის მეთოდი დაფუძნებული აკუსტიკურ ემისიაზე და ულტრაბგერაზე.

ენერგიის დისიპაციის დროს ფრაგმენტაციისას ფართოდ გავრცელებული ეფექტები. სხვადასხვა შრომებში თეორიულად გამოყენებულ ფრაქტალურ მიდგომაში იყო ნაჩვენები, რომ ფრაგმენტაციას გააჩნია მრავალმასშტაბური პროცესი ენერგიის დისიპაციისას. მოცემული ფრაქტალური თეორია ითვალისწინებს მრავალამასშტაბური პროცესის ენერგიის დისიპაციას. მოცემული ფრაქტალური თეორიუა ითვალისწინებს მრავალმასშტაბურ თვისებას ენერგიის დისიპაციისას და მის ფართო გავრცელებულ ეფექტებს. ასეთი მიდგომა ენერგიის გავრცელებაზე უნდა იქნას ექსპერიმენტალურად დაზუსტებული აკუსტიკური ემისიის მეთოდით.

მოცემულ სამუშაოში ყურადღება უნდა მივაქციოთ დამატებით ასპექტებზე, დაკავშირებულ დროებით ეფექტებზე. გავრცელებული-დროებით ეფექტები გვაძლევს

საშუალებას შემოვიტანოთ საჭირო ენერგეტიკული პარამეტრი კონსტრუქციის მდგომარეობის შესაფასებლად, დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის სიგნალებს შორის კორელაციაზე კონსტრუქციის მცირე ნიმუშზე.

აკუსტიკური ემისიის ან ულტაბგერის ყოველ სიგნალზე ბზარების გავრცელებისას ან სხვა დაზიანებული სხეულის ტალღებზე გააჩნია ხანგრძლივობა τ, რომელსაც ჩვენ ჩავთვლით ფრაქტალურ სიდიდედ. მაშასადამე სიგნალის გავრცელების ხანგრძლივობა აღიწერება შემდეგი კაკონით:

$$P(<\tau)=\frac{N(<\tau)}{N_{\max}}=1-\left(\frac{\tau_{\min}}{\tau}\right)^{D_T} \qquad (3.5)$$

სადაც: N(<τ) – სიგნალების საერთო რაოდენობაა τ-ზე ნაკლები ხანგრძლივობით, N_{max} – სიგნალების საერთო რიცხვია; $\tau_{min}(<<\tau_{max})$ – მინიმალური ხანგრძლივობაა; $D_T(<0)$ – ფრაქტალური რიცხვი.

(3.5) განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ სიმკვრივის ინტენსივობის გავრცელების გამომსახველ შემდეგ ფორმულას:

$$P(\tau)=D_T\,\frac{\tau_{\min}^{D_T}}{\tau^{D_T+1}} \qquad (3.6)$$

ენერგიის დიციპაციისას W, მოცულობა V შეიძლება გამოვსახოთ შემედგი ფორმულით:

$$W\propto V^{D_S/3} \qquad (3.7)$$

ამრიგად, მცირე ენერგია dW დისიპირებული ცალკეული მოვლენით ულტრაბგერის გავრცელება ან აკუსტიკური ემისია აღიწერება (3.7) განტოლებით, სადაც V წარმოადგენს მოცულობას.

ორ და ერთგანზომილებიანი ობიექტებისათვისმ რომლებიც ხასიათდება A და L ზომით, მივიღებთ შემდეგს, $W\propto A^{D_S/2}$ ან $W\propto A^{D_S/2}$ ან $A\propto\tau^2$ ან $A\propto\tau$. ამრიგად ჩვენ მივდივართ შემდეგ ტოლობამდე, ენერგიის სრული დისიპაცია ტოლია:

$$W\propto\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}}\tau^{D_s}dN=\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}}N_{\max}\,p(\tau)d\tau\propto N_{\max}\frac{D_T}{D_S-D_T}\tau_{\min}^{D_\tau}\left(\tau_{\max}^{D_S-D_\tau}-\tau_{\min}^{D_S-D_\tau}\right)\cong$$

$$\cong\begin{cases}N_{\max}\dfrac{D_T}{D_S-D_T}\tau_{\min}^{D_\tau}\tau_{\max}^{D_S-D_\tau},\ \mathrm{D_T}<D_s,\\ N_{\max}\dfrac{D_T}{D_S-D_T}\tau_{\min}^{D_\tau},\ \ \mathrm{D_T}>D_s\end{cases} \qquad (3.8)$$

ბგერის გვრცელების სრული დრო განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$t \propto \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \tau dN = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} N_{\max} \tau p(\tau) d\tau \propto N_{\max} \frac{D_T}{1-D_T} \tau_{\min}^{D_\tau} \left(\tau_{\max}^{D_S - D_\tau} - \tau_{\min}^{D_S - D_\tau} \right) \cong$$

$$\cong \begin{cases} N_{\max} \dfrac{D_T}{1-D_T} \tau_{\min}^{D_\tau} \tau_{\max}^{1-D_\tau}, \ \mathrm{D_T} < 1, \\ N_{\max} \dfrac{D_T}{1-D_T} \tau_{\min}^{D_\tau}, \ \ \mathrm{D_T} > 1 \end{cases} \tag{3.9}$$

შესაბამისად მონიტორინგის ექსპერიმენტალური მონაცემებით ულტრაბგერითი ან აკუსტიკური ემისიის მეთოდებზე დაყრდნობით უნდა განვსაზღვროთ, რომ სიგნალი გაიშვება თანდათან ად არა პარალელურად.

გარდა ამისა შემივიტანოთ „კვანტი" ანუ ერთი იმპულსის ხანგრძლივობის ზომა $\tau_{\min} = const$. და მივიღებთ სტატიკურ ჰიპოთეზას ავტომოდელირებისათვის ე.ი. $\tau_{\max} \propto t$, ამრიგად გამორიცხვით (3.8) და(3.9) განტოლებებიდან მივიღებთ, რომ:

$$\text{თუ } \ D_S \geq 1, \mathrm{W} \propto \begin{cases} \mathrm{t}^{\mathrm{D_S}}, \ D_T < 1, \\ \mathrm{t}^{1+\mathrm{D_S}-D_T}, 1 \leq D_T \leq D_S \\ t, \mathrm{D_T} > D_S \end{cases} \tag{3.10}$$

$$\text{თუ } D_S < 1, \mathrm{W} \propto \begin{cases} \mathrm{t}^{\mathrm{D_S}}, \ D_T < D_S, \\ \mathrm{t}^{D_T}, D_S \leq D_T \leq 1 \\ t, \mathrm{D_T} > 1 \end{cases} \tag{3.11}$$

ავღნიშნოთ, რომ ჩვეულებრივ $D-1 < D_S < D$, როცა ზომა D=1,2,3 განტოლებიდან გვექნება $W \propto t^{\beta}$, როცა $1 \leq \beta_t \leq D_S$, თუ $D_S \geq 1$ ან $D_S \leq \beta_t \leq 1$, თუ $D_S < 1$ სრულად ექნება სახე:

$$W \propto t^{\beta^t}, 0 \leq \beta_{\mathrm{t}} \leq 3 \tag{3.12}$$

3.3.4. ბზარის გავრცელების კოორდინატების სიგრძის და მიმართულების განსაზღვრის მეთოდი და მოწყობილობა

ჩვენს მიერ დამუშავებულია კონსტრუქციებში ბზარის წარმოქმნისას დაზიანებული ადგილის პოვნის მეთოდი და მოწყობილობა ამ მეთოდის განხორციელებისათვის.

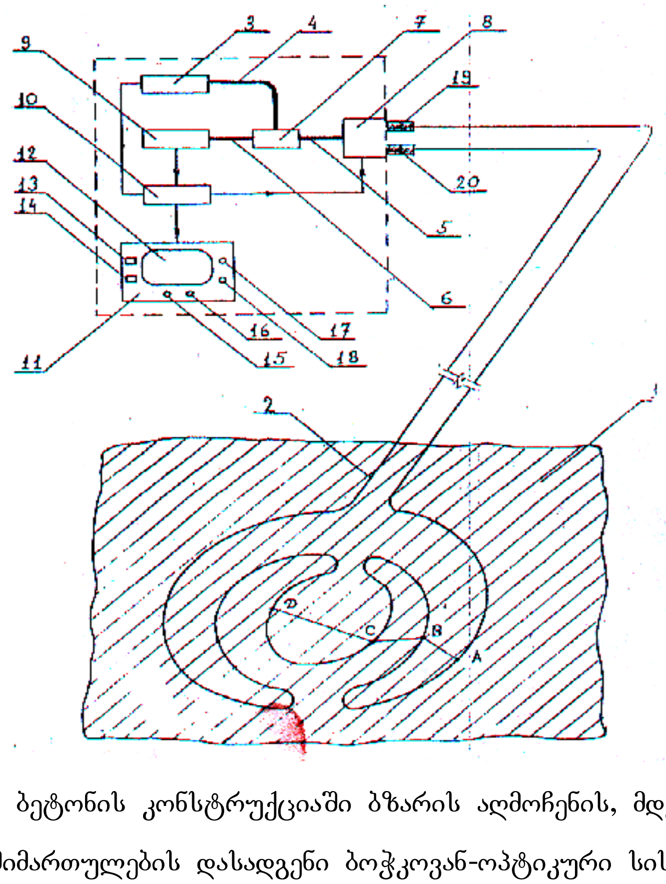
შემოთავაზებული მეთოდის მიზანია ბზარის აღმოჩენა და მისი განვითარების მიმართულების დადგენა ობიექტის ზედაპირზე.

დასახული მიზანი შემდეგნაირად მიიღწევა. საკვლევ ობიექტში ან მის ზედაპირზე ათავსებენ წინასწარ განსაზღვრული სიგრძის შუქსატარს, მაგალითად, ,,ლაბირინთული სპირალის‘‘-ს ფორმით და ამ პარამეტრებს აფიქსირებენ მეხსიერების მოწყობილობაში. შემდეგ რიგრიგობით ორივე ბოლოდან შუქსატარში უწყვეტად შეჰყავთ ლაზერული გამოსხივების პიკოწამური იმპულსები. იმპულსების უკან გაბნევის მრუდებს (რეფლექტოგრამები) არეგისტრირებენ და იხსომებენ. რეფლექტოგრამის მეშვეობით განსაზღვრავენ შუქსატარის გაწყვეტის წერტილამდე მანძილს, ხოლო ობიექტში ამ წერტილის კოორდინატებს აღნიშნული მანძილის შუქსატარის მრუდწირულ ფორმაზე გადატანით ადგენენ. ბზარის განვითარების მიმართულება კი შუქსატარის გაწყვეტის წერტილების მიმდევრობითი შეერთებით დგინდება.

მოცემული ტექნიკური გადაწყვეტა საშუალებას იძლევა, დავადგინოთ: 1) შუქსატარის წყვეტის წერტილამდე მანძილი; 2) ობიექტში ჩადგმული შუქსატარის წყვეტის წერტილების კოორდინატები; 3) ბზარის განვითარების მიმართულება და სიდიდე.

ნახ. 3.22-ზე მოცემულია გაბმითი ბოჭკოვან-ოპტიკური გადამწოდის ოპტიკური სქემა. საკითხის უკეთ წარმოდგენისათვის განვიხილოთ მოწყობილობის სქემა და მუშაობის პრინციპი. მოცემული მოწყობილობა შეიცავს: საკვლევ ობიექტს 1, რომლის ტანშიც ან ზედაპირზე თავსდება შუქსატარი 2 ,,ლაბირინთული სპირალის‘‘ სახით, ზედაპირზე დამაგრებისას შუქსატარს ფარავენ მყიფე საფარველით, იმპულსურ ლაზერს 3, შუქსატარებს 4, 5, განმშტოებელს 7, ოპტიკურ გადამრთველს 8,

ფოტომიმღებს 9, პროცესორს 10, ინფორმაციის ასახვის ბლოკს 11. იმპულსური ლაზერი 3, 5 და 6 შუქსატარებით ოპტიკურად დაკავშირებულია ოპტიკურ გადამრთველს 8 და ფოტომიმღებთან 9, რომელიც, თავის მხრივ, ელექტრულ კავშირშია პროცესორთან 10. უკანასკნელი ელექტრულად უკავშირდება იმპულსურ ლაზერს 3, ოპტიკურ გადამრთველს 8, ინფორ-მაციის ასახვის ბლოკს 11 და მართავს მათ მუშაობას. ინფორმაციის ასახვის ბლოკი 11 შეიცავს ეკრანს 12 რეფლექტოგრამების და საკ-ვლევი ობიექტის 1, საკოორდინატო ბადეზე შუქსატარის 2 ფორმის ასახვისათვის, მოწყობილობაშია აგრეთვე ორი რიცხვითი ინდიკატორი, 13 ემსახურება მთლიანი შუქსატარის სიგრძის, ხოლო 14– შუქსატარის სიგრძის შემოკლების ასახვას და ოთხი შუქდიოდი, რომელთაგან 15 დანიშნულია ბზარის არსებობის სიგნალიზაციისათვის, 16 – მისი კრიტიკული სიგრძისათვის, 17 – შუქსატარის ზონდირებისათვის ერთი ბოლოდან, 18 – შუქსატარის ზონდირებისათვის მეორე ბოლოდან. შუქსატარის 2 ოპტიკურ გადამრთველთან 8 შეერთებას ემსახურება 19 და 20 ოპტიკური გასართი მისაერთებლები.



ნახ. 3.11. ბეტონის კონსტრუქციაში ბზარის აღმოჩენის, მდებარეობის და მიმართულების დასადგენი ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემა.

წარმატებით მუშავდება სპეციალური დანიშნულების ოპტიკური ბოჭკოები, მაგალითად, თხევადი გულარით, ორმაგი გულარით და ა.შ.

ბოჭკოვან-ოპტიკურ გადამწოდების ერთ-ერთი თავისებურებაა ნახევრადგამტარული ლაზერების ხელსაყრელი გამოყენება.

ამპლიტუდურ გადამწოდებს ოპტიკურ ბოჭკოზე აქვს დიდი პერსპექტივები და უკანასკნელ პერიოდში მიმდინარეობს აქტიური გამოკვლევები.

თუ გამოვიყენებთ ტრადიციულ გამზომ ტექნიკას, მაგალითად ელექტროტენზომეტრებს, ულტრაბგერითი დეფექტოსკოპებს, დავრწმუნ-დებით რომ ელექტროტენზომეტრები განიცდიან კოროზიას და დიდ მანძილზე გაზომილი პარამეტრების გადაცემა შეუძლებელი ხდება, ტენზომეტრიდან მიღებული ინფორმაცია არ არის დაბრკოლება მედეგი ტრაქტი. ყოველივე ეს და ის გარემოება, რომ ის იძლევა წერტილოვან არეზე დეფორმაციის მნიშვნელობას. ხოლო ჩვენ შემთხვევაში ამოცანის გადაწყვეტა მოითხოვს რამოდენიმე ასეულ ასეთი გადამწოდის დამაგრებას ხიდებში შეუძლებელს ხდის გაზომვის ჩატარებას.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნული მიგვითითებს იმაზე, რომ ელექტროტენზომეტ-რებით მოწყობილი ქსელი შეიცავს მთელ რიგ უარყოფით ფაქტორებს და დიაგნოსტიკურ ცენტრში ამ ტექნიკური საშუალებებით ინფორმაციის გადაცემა და მონიტორზე ასახვა თითქმის შეუძლებელი ხდება.

ისმის კითხვა, არსებობს თუ არა სხვა უფრო პროგრესული ტექნიკური საშუალებები, რათა მივაღწიოთ შედეგს. ასეთი ტექნიკა უკვე შექმნილია და ჩვენს მიერ დაწვრილებით იყო აღწერილი წინა პარაგრაფებში.

როგორც აღვნიშნეთ, დამუშავებულია გაბმითი ბოჭკოვან-ოპტიკური გადამწოდები, რომელიც საშუალებას იძლევა ოპტიკური ძაფი (მონო ბოჭკო) დავამაგროთ გამოსაცდელ კონსტრუქციაზე და დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობიდან დამოკიდებულებით დავაფიქსიროთ ოპტიკური ძაფის გაწყვეტის წერტილები. ოპტიკური ძაფი მაგრდება ლაბირინთული ფორმით სიბტყეზე ან სივრცეში.

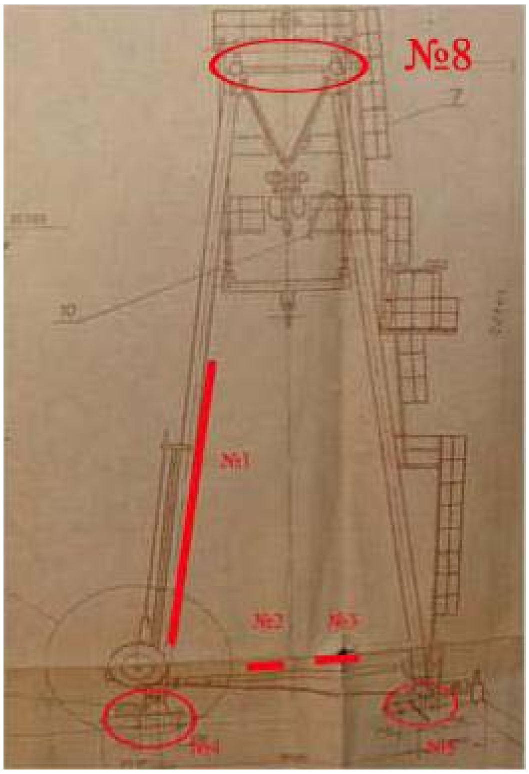
თავი 4. თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის გამოყენების მაგალითები. ბზარიანი კონსტრუქციების ხანმედეგობის გაზრდის შესაძლებლობები

4.1. ლითონის კონსტრუქციების გამოკვლევა ულტაბგერითი დეფექტოსკოპის გამოყენებით

მაგალითი 1.

გამოსაკვლევი ობიექტი

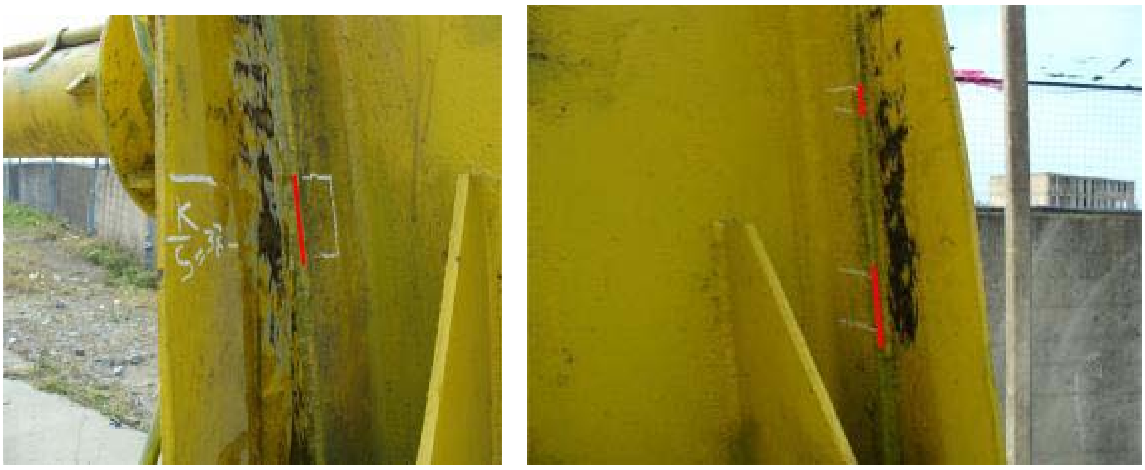
შ.პ.ს.. ‘‘ჯორჯიან ტრანს ექსპედიცია-ფოთი’’-ის ჯოჯგინა №5 ამწის შენადული ნაკერების ურღვევი მეთოდებით შემოწმება. სურათი 1-ზე მოცემულია



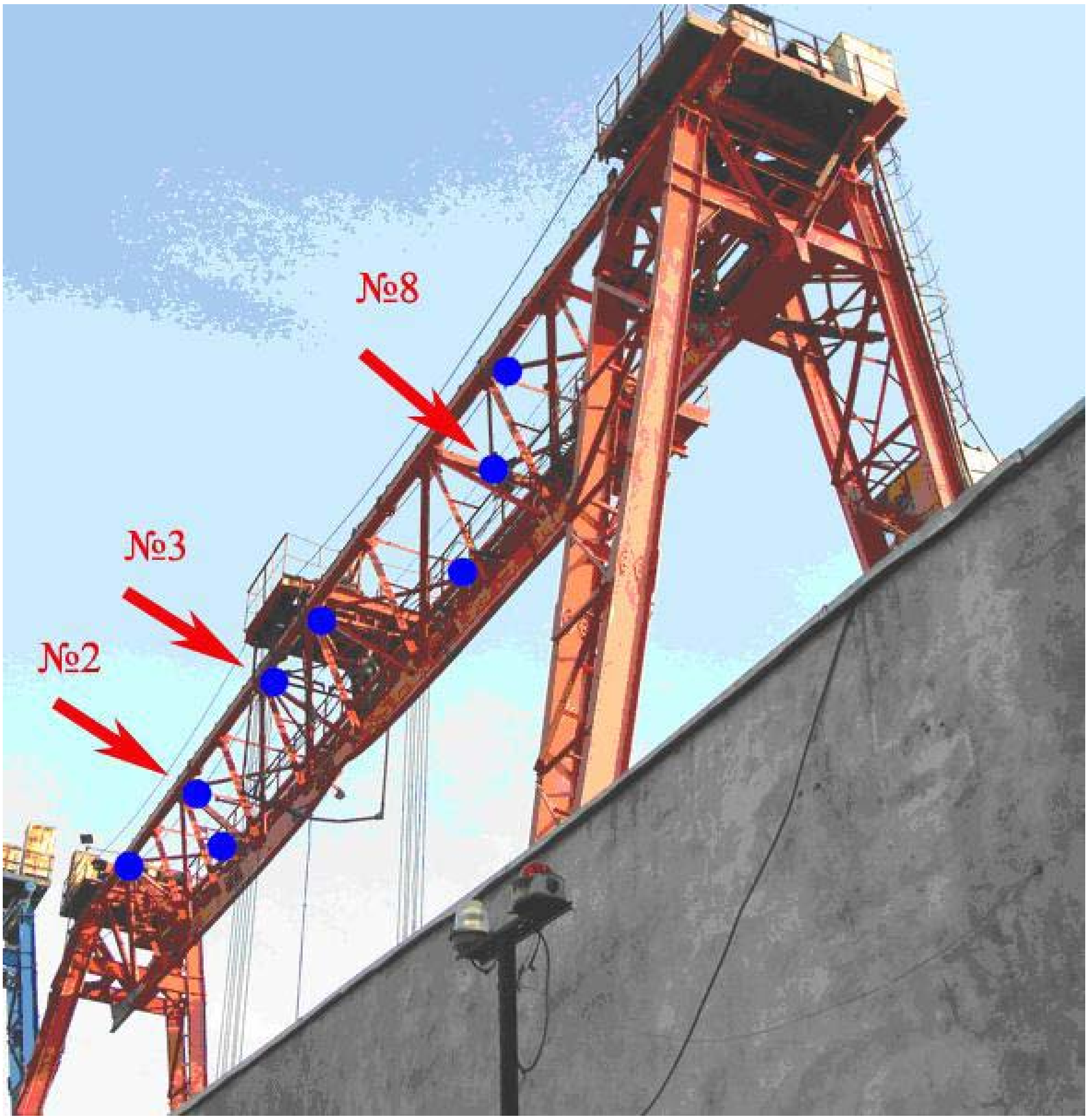
სურ.4.1. სამწყობო ნახაზზე, ჯოჯგინა К С 50-42 В ტიპის ამწეზე, ურღვევი კონტროლის მეთოდებით შემოწმებული შენადული ნაკერების განლაგება.

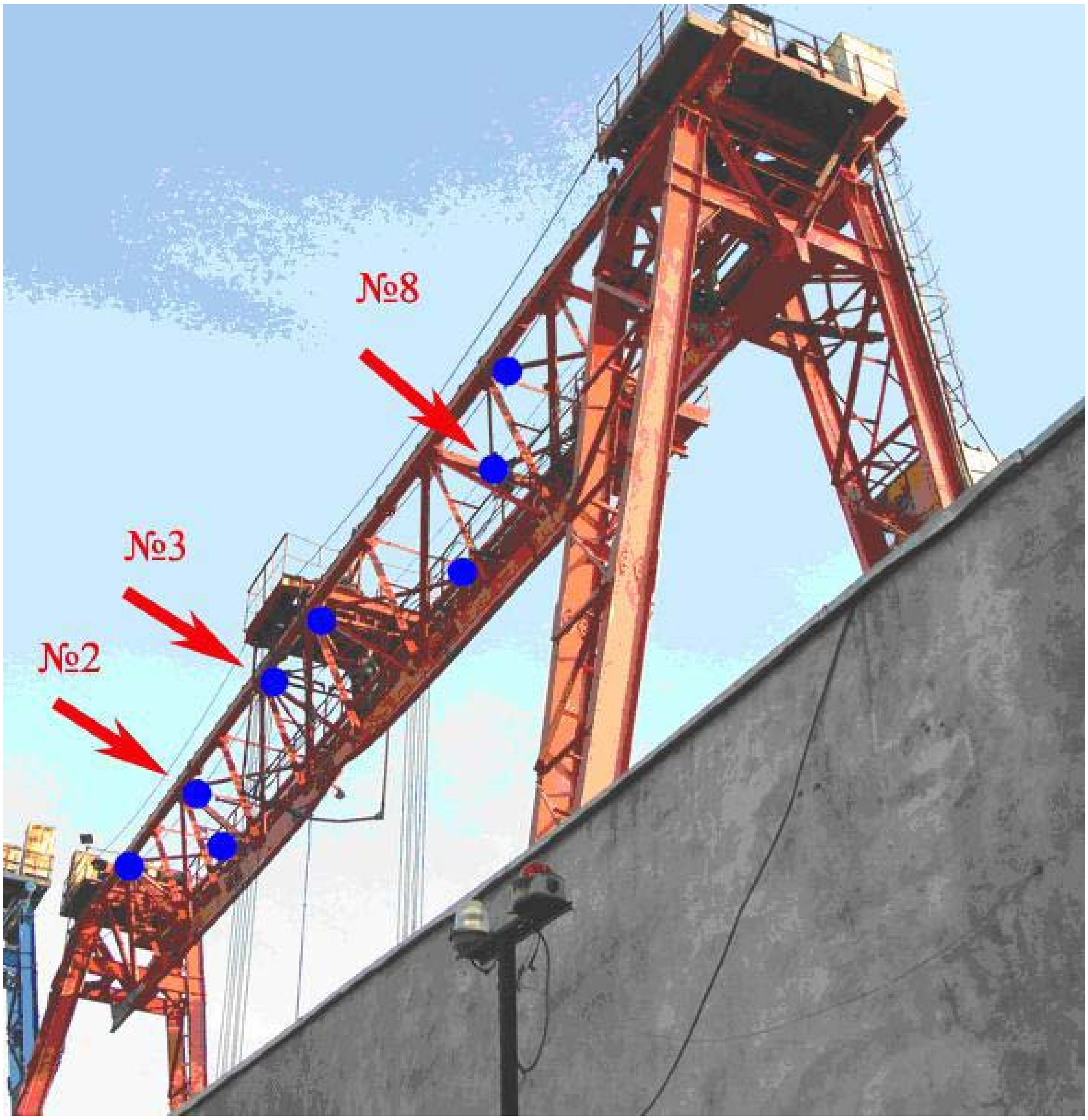
სურ.4.2. ულტრაბგერითი მეთოდით შემოწმებული №2 და №3 პირაპირა ნაკერები.

სურ.4.3. ვიზუალურ-გაზომვითი მეთოდით შემოწმებული №4, №5, №6 და №7 კვანძები



სურ.4.4. ულტრაბგერითი მეთოდით შემოწმებული კვანძები№.4





სურ. 4.5 ჯოჯგინა КС 50-42В ტიპის ამწის ხიდურაზე გამოვლენილი უვარგისი
ნაკერების განლანება (ნაჩვენებია ლურჯი მარკერით). წითელი №2 ისრით ნაჩვენებია დეფორმირებული ელემენტი, №3 და №8 ისრებით, კი ელემენტები,
რომლებიც დაგრძელებულია კუთხოვანების წიბოებზე შედუღებით (სურ.4.2-4.4).

შემოწმების მეთოდი და მოცულობა.

შემოწმება ჩატადა ვიზუალურ-გაზომვითი და ულტრაბგერითი მეთოდების გამოყენებით.

შემოწმება ჩატარდა იმ მონაკვეთებზე და იმ მოცულობით, რომელიც იქნა მოთხოვნილი დამკვეთის წარმომადგენლის მიერ.

ულტრაბგერითი შემოწმება შესრულდა ГОСТ 14782-ის მოთხოვნების გათვალისწინებით, ულტრაბგერითი УД4-76 დეფექტოსკოპის გამოყენებით.

ვიზუალური და ულტრაბგერითი მეთოდით ნაკერების ვარგისიანობა შეფასებული იქნა ნორმატიული დოკუმენტის П Б -10-382-00-ის მოთხოვნების მიხედვით.

სურ.4.6. ამწის ხიდურაზე ზოგიერთი კვანძის ფოტოსურათი სადაც გამოვლენილი იქნა დაუშვებელი შენადუღი ნაკერები.

შემოწმების შედეგები.

ვიზუალურ-გაზომვითი და ულტრაბგერითი მეთოდებით გამოვლენილი იქნა შენადუღი ნაკერები, რომლებიც არ შეესაბამებიან ნორმატიულ-ტექნიკური

დოკუმენტაციის მოთხოვნებს და საჭიროებენ სარემონტო სამუშაოების ჩატარებას აღმოჩენილი დეფექტების ბზარის სიგრძე ტოლია 45მმ.

მაგალითი 2

გამოსაკვლევი ობიექტი ქ. თბილისში მთაწმინდაზე მშენებარე ატრქციონის მზიდი ლითონის კონსქტრუციის შენადუღი ნაკერების შემოწმება.

4.7-4.10 ფოტოებზე მოცემულია კვლების ფრაგმენტები. სურ. 4.2-ზე ჩანს, რომ მიღებული სიგნალების პიკები გახშირდა, რაც მაჩვენებელია იმისა, რომ შენადუღ ნაკერში აღინიშნება ბზარი, რომელის სიგრძე 27 მმ-ია.

სურ.4.7

სურ.4.8

სურ.4.9

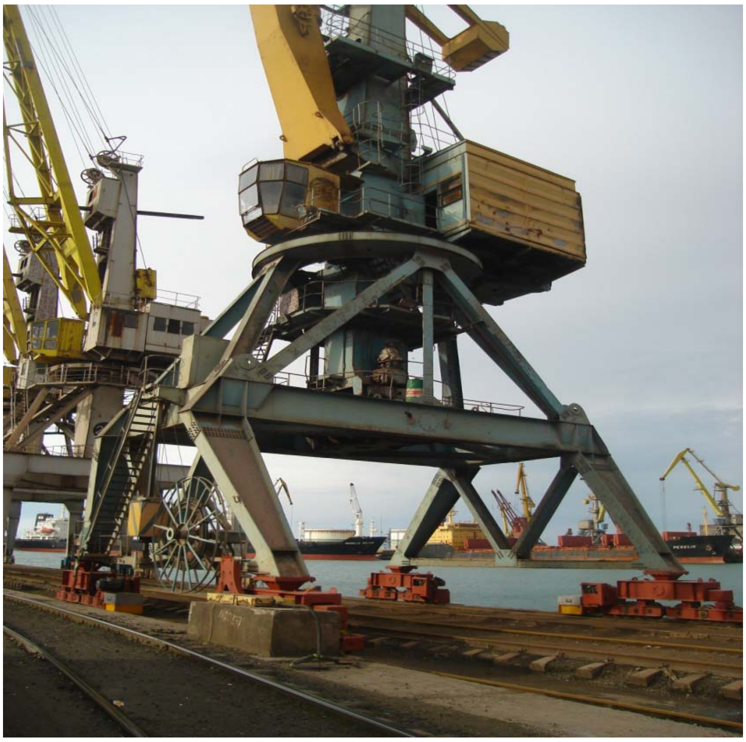
სურ.4.10

მაგალითი 3

ბზარია სამანქანო დარბაზის მარცხენა კრონშტეინზე (სურ.4.17) ჰორიზონტალური ფურცლის ამწის ტანთან შეერთების არეში (4.12-4.14)
ა) კოროზირებულია ამწის ტანის თავი ბაგირის მიმმართველი ჭაღის ზონაში (პოზ. 1). კოროზიის მაქსიმალური სიღრმე 3,5 მმ-ს აღწევს;
ბ) კოროზირებულია ზღვის მხარეს მიმართული სავალი ურიკები ლოკალურ უბნებზე. კოროზიის მაქსიმალური სიღრმე აღწევს არაუმეტეს 0,1-0,25 მმ-ს (პოზ. 2, 3)
ა) მემანქანის ჯიხურთან ასასვლელი კიბის თავზე გაბზარულია სამანქანო განყოფილების დამჭერი კრონშტეინის წინა ვერტიკალური ფურცელი ქვედა არეში (პოზ.1;);
ბ) კაპილარული ბზარია მემანქანის ჯიხურის მხარეს მარჯვენა ფლანგზე П-ს მაგვარი ჩარჩოს ამწის ტანთან შეერთების მიმდებარე არეში ამავე არეში საყურის შეერთე-ბის დასაწყისში და მის ვერტიკალურ კედელზე, სიგრძით 230 მმ;

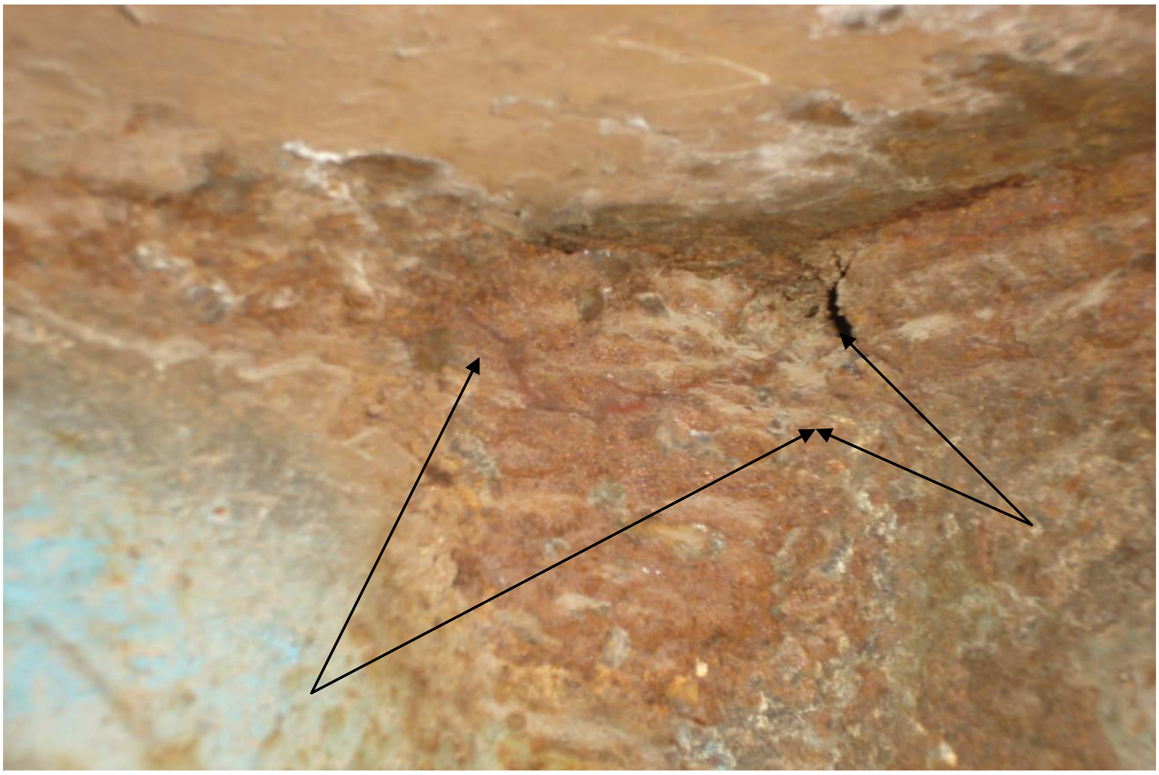
ბზარი ამწის ფეხებზე, ისრის ქვედა ძელისა და ვერტიკალური ირიბანის შე-ერთების შედუღებით ნაკერზე მარცხენა მხრიდან. ბზარია ამწის კოშკის შახტაში B-B კვეთის დონეზე (შახტაში ამავალი კიბის პირველი მარშის დონიდან 1,3 მ-ის სიმაღლეზე ბზარია პორტალის ცენტრისა და დიაგონალური ძელის გადაბმის ფურცელში (პოზ. 5)

კაპილარული ბზარებია ამწის ფეხების შედუღების ნაკერზე ფეხის ვერტიკალური ფურცლებისა და დიაფრაგმების ძირში.

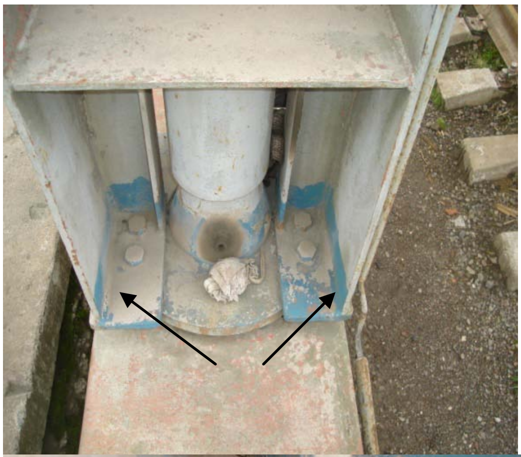


სურ.4.11

სურ.4.12



სურ.4.13



სურ. 4.14   სურ.4.15

სარემონტო ფარის ძირითადი ლითონი და შენადული ნაკერები შემოწმებული იქნა ურღვევი კონტროლის მეთოდით, რომლის დროსაც გამოყენებული იქნა ულტრაბგერითი კონტროლი (УД 2-12), ფერადი დეფექტოსკოპია კაპილარული მეთოდით პერეტრანტის გამოყენებით

ა) ბ)

გ) დ)

ე)

ვ)

. ნახ. 4.16 ბზარები სარემონტო ფარის შენადუღ ნაკერებში

4.1.1.ხანგამძლეობის ანგარიშის მაგალითი

პირველ თავში წარმოდეგნილი ხანგამძლეობის მოდელის საფუძველზე განვიხილოთ ხანგამძლეობის ანგარიშის მაგალითი I და II სტადიაზე მოკლე დაღლილობითი ბზარების ზრდის გამოსათვლელი ფორმულები და წარმოდგენილი მოდელი იძლევა კონსტრუქციების ხანგამძლეობის პროგნოზირების საშუალებას, დაზიანების ადრეულ ეტაპებზე. ვივარაუდოთ, რომ მყარი ტანის ზედაპირი შეიცავს საწყის მიკრობზარებს ზომებით, მაგალითად 1 მკმ, ხანგამძლეობის N_I I სტადიაზე ვიღებთ ინტეგრირებულ ტოლობას $\frac{dl}{dN} = A_{eq}\Delta\gamma^{\alpha}(d-l)$,

(4.1)

საზღვრებში ℓ_0=1 მკმ-დან ℓ_{tr}-მდე.

$$d_m = d_1 + 2(m-1)d_a, \quad \mathrm{d_m} < D$$

$$d_m = D \tag{4.2}$$

ფორმულით ანგარიშისას გაუთვალისწინებელი ბზარების ცვლილებების რაოდენობა, რომლებიც განპირობებულია მიკროსტრუქტურული ბზარების გადალახვით. ინტეგრირებული ტოლობა $\frac{dl}{dN} = B_{eq}\Delta\gamma^{\beta}l - D_{th}$ (4.3) რომელიც აღწერს ფიზიკურად მოკლე ბზარების გავრცელებას ℓ_{tr}-დან ბზარის კრიტიკულ სიგრძემდე ℓ_c, საშუალებას იძლევა შეფასდეს ხანგამძლეობა N_{II} მოკლე ბზარების ზრდის II სტადიაზე. ბზარის ზომა ℓ_{tr}, რომელიც შეესაბამება ბზარის გავრცელების I სტადიიდან II სტადიაზე გადასვლას, განისაზღვრება ფორმულის $A\Delta\varepsilon^{\alpha}\left(d_m - l_{tr}\right) = B\Delta\varepsilon^{\beta}l_{tr} - D_{th}$ (4.4) დახმარებით. საერთო ხანგამძლეობა განისაზღვრება ხანგამძლეობების დაჯამებით, ბზარების გავრცელების განხილული სტადიების შესაბამისად: $N_c = N_I + N_{II}$. მოვიყვანოთ ანგარიშების ზოგიერთი შედეგები მოკლე დაღლილობითი ბზარების წარმოდგენილი მოდელის მიხედვით, მცირენახშირბადოვანი ფოლადის ცილინდრული ნიმუშებისათვის ციკლური გრეხვის პირობებში ხანგამძლეობის შეფასება, როცა Δ_{γ}=0.62%-ის დროს იძლევა საანგარიშო სიდიდეს $N_c = N_I + N_{II}$=860 დატვირთვის ციკლებს, ხოლო ექსპერიმენტალური ხანგამძლეობა N_c=690 ციკლს. საანაგრიშო ხანგამძლეობების დამაკმაყოფილებელი შესაბამისობა ამტკიცებს მოკლე ბზარების სიჩქარის მოდელების და ტოლობების კორექტულობას. ამას გარდა ხანგამძლეობის საანაგრიშო მნიშვნელობის ანალიზმა კომბინირებული დატვირთვისას საშუალება მოგვცა გამოგვეტანა დასკვნა ფარდობითი ხანგამძლეობის შემცირების შესახებ $\frac{N_I}{N_{II}}$ დეფორმაციის ზრდისას.

ამგვარად მიკროსტრუქტურულად და ფიზიკურად მოკლე ბზარების კინეტიკის საფუძვლიანი კვლევა საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს კონსტრუქციების ციკლური ბზარმედეგობა ადრეულ სტადიაზე და ვიზრუნოთ კონსტრუქციის მოსალოდნელი ავარიის თავიდან ასაცილებლად. ამგვარად, მაგალითად მიკროსტრუქტურულად მოკლე ბზარების ზრდა ფორმულის ანალიზიდან $\frac{da}{dN} = A\Delta\varepsilon^{\alpha}\left(d - l\right)$ (4.5) ტოლობა, გამომდინარე, როგორც წესი, იგი ვრცელდება ზედაპირიდან. საჭიროებს

მიზანმიმართულად წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მასალის ფორმირებას ზედაპირულ ფენაში, რაც ამცირებს მათი ზრდის სიჩქარეს, ხოლო შესაბამისად, ზრდის ხანგამძლეობას.

4.1.2. ლითონის ელემენტებში ბზარის გახსნის დინამიკა და გავრცელების პროგნოზირება

განვიხილავთ ლითონის ფირფიტას და ბრტყელ ამოცანას ცენტრალური ბზარით. ულტრაბგერითი და აკუსტიკური ემისიის მეთოდები, დაფუძნებული სიგნალების რაოდენობაზე, ტალღის რიცხვის ჩათვლით ხშირად გამოიყენება დეფექტების ანალიზისას. სინამდვილეში პირველადი მიახლოების ინტეგრირების რიცხვი N შეიძლება გავუთანაბროთ ენერგიის რაოდენობას.

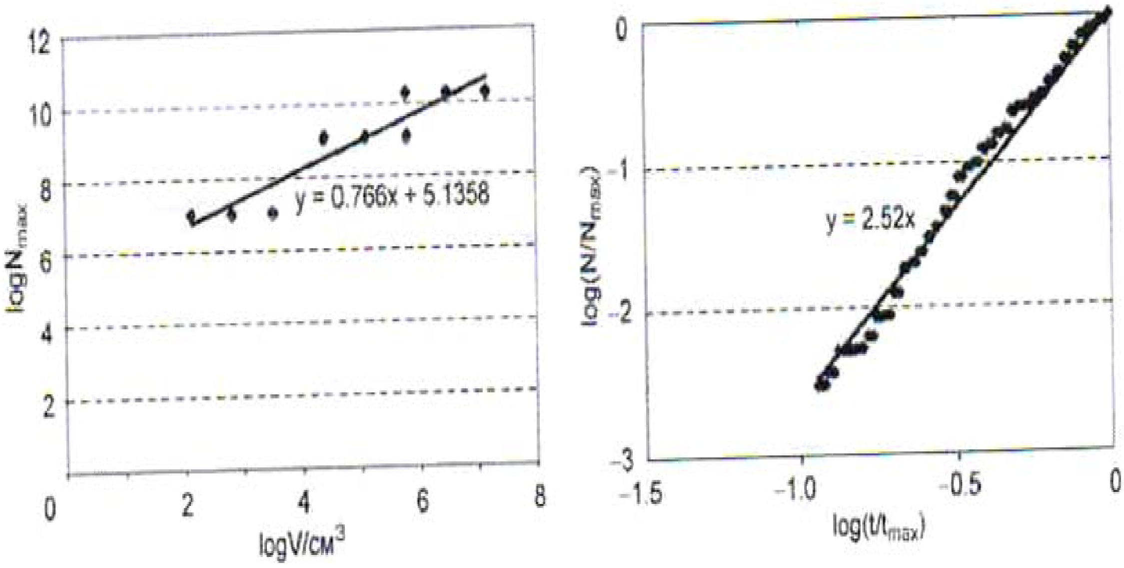
ასეთი მეთოდის დახმარებით ხდება ბზარის ევოლუცია და ხდება შეფასება განთავისუფლებული ენერგიის სიდიდის ბზარის გავრცელებისას კონსტრუქციის ელემენტებში.

თუ გავითვალისწინებთ $W \propto N$ ენერგიის პარამეტრი η ნიმუშის გამოცდისას შეიძლება გამოითვალოს ასე:

$$\eta = \frac{W}{W_{\max}} = \frac{N}{N_{\max}} = \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^{\beta_t} \qquad (4.6)$$

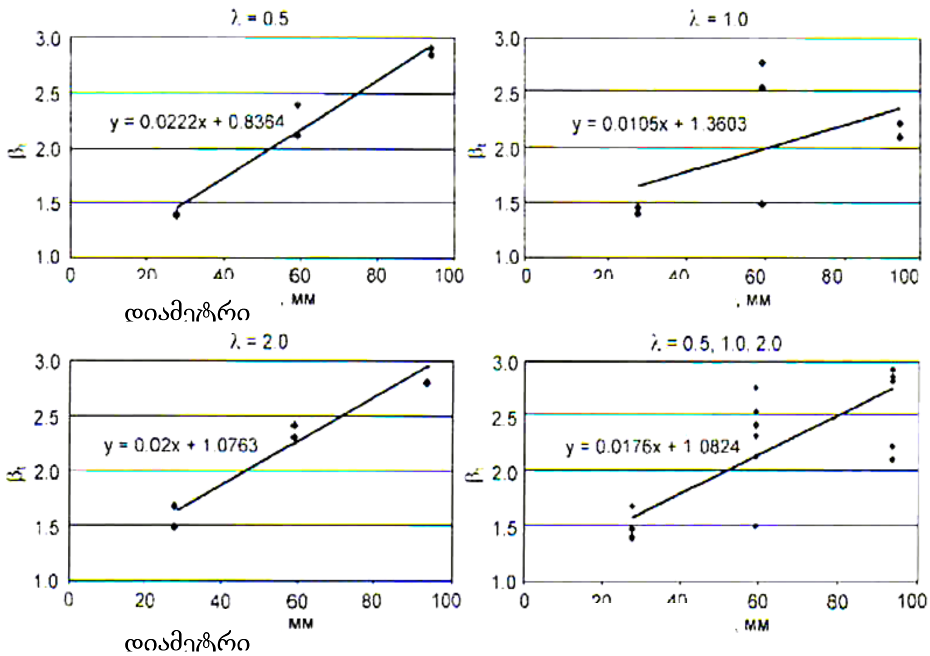
სადაც: max შეესაბამება მაქსიმალურ ძაბვას. (4.6) განტოლებიდან შეიძლება მივიღოთ ექსპერიმენტალური მნიშვნელობა β_t.

იტალიელი მეცნიერების ა. პარპინტერის, ჯ. ლაჩიდონიას და ნ. პუანოს მიერ ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტები ნახ. 4.17-ზე მოცემულია ექსპერიმანტალური დაკვირვებით ფარდობით-დროითი ექფეტი. საწყისი პერიოდის შემდეგ ($0<t/t_{max}<0{,}4$). ნახ. 1.ა გამოსაცდელი ძაბვისა და დეფორმაციის დამოკიდებულებით.



ნახ. 4.17

N_{max} მასშტაბური ზომა აგრეთვე მოცემულია როგორც ნიმუშის მოცულობა (ნხ.4.17.ბ) შეთანხმებული ექსპერიმანტალურ მონაცემებთან. ენერგიის დისიპაცია ხდება ფრაქტალურ მიდამოში მდებარე ზედაპირისა და ნიმუშის მოცემულობას შორის. ნახ.4.18 წარმოდგენილია β_t დამოკიდებულების მნიშვნელობა ნიმუშის დიამეტრზე.



ნახ. 4.18

ნიმუშის დიამეტრის C-ს გაზრდით β_t მნიშვნელობა იზრდება. აღმოჩენილი ექსპერიმენტალური მასშტაბი დროში ეთანადება ფრაქტალურ კანონს, სადაც მონაცემები იცვლება 0-დან 3-მდე. ექსპერიმანტალური მონაცემები წარმოდგენილია ცხრილ 4.1-ში.

ცხრილი 4.1

№	დიამეტრი D მმ	λ=h/d	P_1			P_2		
			σ_U	N_{max} σ_U	β_t	σ_U	N_{max} σ_U	β_t
1	27,7	0,5	91,9	1186	1,40	84,7	1180	1,38
2	27,7	1,0	62,8	1191	1,41	46,7	1181	1,46
3	27,7	2,0	48,1	1188	1,48	45,8	1186	1,67
4	59,0	0,5	68,1	8936	2,12	57,5	8924	2,39
5	59,0	1,0	53,1	8934	1,49	41,7	8930	2,52
6	59,0	2,0	47,8	8903	2,30	38,2	8889	2,41
7	94,0	0,5	61,3	28502	2,90	45,2	28484	2,84
8	94,0	1,0	47,8	28721	2,09	38,2	28715	2,21
9	94,0	2,0	44,1	28965	2,80	38,1	28956	2,92

ნიმუშები ექსპერიმენტებისათვის იყო მიღებული ორიპილიასტრი, რომლებზედაც კონტროლი ხდებოდა თავისუფალი სისტემის აღწერით დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის მეთოდზე. იმ დროში როცა დაკვირვება ხდებოდა (15 დღე) უფრო მეტად დაზაინებულ პილიასტრზე P_1 დარეგისტრირდა $N \cong 2 \cdot 10^5$ სიგნალი, უფრო ნაკლებად დაზიანებულ P_1 დარეგისტრირდა $N \cong 8 \cdot 10^4$. გავითვალისწინოთ, რომ თითოეულ პილიასტრ მოცულობა მიახლოებით ტოლია $2 \cdot 10^6$სმ^3, ექსპერიმენტალურად ნახ. 4.17.ბ საშულაებას გვაძლევს შევაფასოთ კრიტიკული რიცხვი სიგნალის აკუსტიკური ემისიის ორივე პილიასტრისათვის $N_{\max} \cong 11{,}51 \cdot 10^6$.

მიღებული მნიშვნელობები N და $N_{\max}$ (9) განტოლებაში გავითვალისწინოთ $\beta_t = 2{,}52$ მივიღებთ t/t_{max}=0,2 ხოლო P_1 და t/t_{max}=0,14 P_2-სთვის.

ამრიგად, ამ ელემენტების სასიცოცხლო დრო განისაზღვრება მაქსიმალური რიცხვის მიღებით 2,4 და 3,4 წლების შესაბამისად.

დანართი 1

ფირფიტის მოდელი ცენტრალური ბზარით წაგრძელების დროს რღვევის მექანიკის პარამეტრების გამოთვლა
(ძაბვების (КИН) ინტენსივობის კოეფიციენტები და J – ინტეგრალი ბრტყელი ნიმუშისათვის
მექანიკური რღვევის პარამეტრების გამოთვლა
(ძაბვის ინტენსივობის კოეფიციენტი (KIN) და J – ინტეგრალის ბრტყელი ნიმუშისათვის ცენტრალური ბზარით
(სიმეტრიული ამოცანა, ბრტყელი დეფორმაციის პირობები).
ნიმუშის გეომეტრიული ზომები (ნახ. 1)

bm	ნიმუშის სიგანე
lb = (0.15…0.25) bm	ბზარის სიგრძე
bb = (1.25…1.6) bm	მოჭიდების სიგანე
hm = (0.10…0.2) bm	ჩანაჭერის სიღრმე
tm = (0.15…0.25) bm	ნიმუშის სისქე
rb = 0.30 bm	მომრგვალების რადიუსი
kb = 0.03 bm	ჩანაჭერის სიგანე
lb = 3.00 bm	ნიმუშის მუშა ნაწილის სიგრძე

პარამეტრების დანიშნულება

```
AFUN,DEG
```

ძირითადი პარამეტრები

```
bic = 1.0
hic = 3.0*bic
tic = 0.1*bic
lic = 0.2*bic
zic = 0.0*tic
```

დამხმარე პარამეტრები

```
ric = 0.10*lic

aic = 8*ric

nic = 4
x1 = lic - aic/2
x2 = lic - ric
x3 = lic
x4 = lic + ric
x5 = lic + aic/2
x6 = bic/2
y1 = ric
y2 = aic/2
y3 = hic/2
alpha = 0
n1 = NINT(x1/ric/2)
n2 = NINT((x6-x5)/ric/2)
n3 = NINT((y3-y2)/ric/4)
```

მექანიკური მახასიათებლები

```
eic = 2.105e11
nuic = 0.3
```

დატვირთვა

```
p0 = 1.0e8
```

გეომეტრიული მოდელის და ს. ე. ბადის მომზადება

```
LOCAL,11,1,x3,0.0,0.0,0.0


LOCAL,12,0,x3,0.0,0.0,0.0


CSYS,0
/PREP7
ET,1,MESH200,7
ET,2,SOLID95
R,1
```

მასალის მექანიკური თვისებები (ლითონი)

```
MP,EX,1,eic
MP,NUXY,1,nuic
```

წერტილები

```
K, 1,  0.0, 0.0,
K, 2,   x1, 0.0,
K, 3,   x2, 0.0,
K, 4,   x3, 0.0,
K, 5,   x4, 0.0,
K, 6,   x5, 0.0,
K, 7,   x6, 0.0,
K, 8,   x3,  y1,
K, 9,  0.0,  y2,
K,10,   x1,  y2,
K,11,   x3,  y2,
K,12,   x5,  y2,
K,13,   x6,  y2,
K,14,  0.0,  y3,
K,15,   x1,  y3,
K,16,   x3,  y3,
K,17,   x5,  y3,
K,18,   x6,  y3,
```

წერტილი 4 (ბზარის მწვერვალი)

წირები

```
L,1,2,n1,
L,2,3,4,1/2.5
L,3,4
L,4,5
L,5,6,4,2.5
L,6,7,n2
LARC,3,8,4,ric
LESIZE,7,,,nic
L,4,8,
LARC,8,5,4,ric
LESIZE,9,,,nic
L,1,9,2
L,2,10,2
L,8,11,4,2.5
L,6,12,2
L,7,13,2
L,9,10,n1
L,10,11,2
L,11,12,2
L,12,13,n2
L,9,14,n3
L,10,15,n3
L,11,16,n3
L,12,17,n3
L,13,18,n3
L,14,15,n1
L,15,16,2
L,16,17,2
L,17,18,n2
```

ზედაპირები

```
AL,1,11,15,10
AL,2,7,12,16,11
AL,3,8,7
AL,4,9,8
AL,5,13,17,12,9
AL,6,14,18,13
AL,15,20,24,19
AL,16,21,25,20
AL,17,22,26,21
AL,18,23,27,22
SAVE
```

დანაწილების რაოდენობა და შესქელების პარამეტრი, შემდგომ ორგანზომილებიანი ბადის გენერაცია

```
TYPE,1
MAT,1
MSHAPE,0,2D

MSHKEY,0
```

ბზარის მწვერვალის მითითება (წერტილი 4)

ამ წერტილის ირგვლივ შექმნილი იქნება ელემენტები გაშუალებული კვანძებით, რომლებიც მონაცვლებულია მწვერვალის მხარეს 1/4 -ით

ბრძანების სინტაქსი KSCON,NPT,DELR,KCTIP,NTHET,RRAT

KSCON ბრძანების პარამეტრები:

```
NPT
DELR
KCTIP


NTHET
RRAT
delr = ric/4
KSCON,4,delr,1,nic

AMESH,3,4,1

MSHKEY,1
AMAP,2,8,11,2,3
AMAP,5,5,6,11,8
AMESH,1,6,5
AMESH,7,10,1
SAVE
```

სამგანზომილებიანი ბადის გენერაცია გამოწელვის მეთოდით

```
TYPE,2
nz = NINT(tic/ric)
nz = 8
EXTOPT,ACLEAR,1

EXTOPT,ESIZE,nz
VEXT,1,10,1,,,tic,1,1,1

SAVE
```

ჩამაგრება და დატვირთვა

```
CSYS,0
NSEL,S,LOC,Y,0.0
NSEL,R,LOC,X,x3,x6
D,ALL,UY,0.0

ALLSEL
NSEL,S,LOC,X,0.0

D,ALL,UX,0.0
ALLSEL
NSEL,S,LOC,Z,0.0

D,ALL,UZ,0.0
ALLSEL
ASEL,S,LOC,Y,hic/2
SFA,ALL,1,PRES,-p0
ALLSEL
```

შემდეგი სვეტი განკუთვნილია, მხოლოდ ბრტყელი დეფორმაციის პირობებისთვის

```
D, ALL, UZ   ,0.0
SAVE
FINISH
```

ოფცია ანალიზის დანიშნულება და ანგარიშზე გაშვება

```
/SOLU
ANTYPE,STATIC
EQSLV,SPARSE
SAVE
SOLVE
FINISH
```

ანგარიშის შედეგების დამუშავება

```
/POST1
SET,LAST
CSYS,0
RSYS,0
```

დაძაბულობის ინტენსივობის კოეფიციენტის ანგარიში Z=zic სიბრტყეში

კონტურის გასწვრივ ni – nk კვანძებიდან

```
ni = NODE(x3,0.0,zic)

nj = NODE(x2,0.0,zic)

nk = NODE(x1,0.0,zic)

PATH,ki,3,,48

PPATH,1,ni
PPATH,2,nj
PPATH,3,nk
```

დაძაბულობის ინტენსივობის კოეფიციენტის ანგარიში

ბრძანების სინტაქსისი – KCALC,KPLAN,MAT,KCSYM,KLOCPR

ბრძანების პარამეტრები – KCALC

KPLAN (НДС სახეობის გასაღები:
ბრტყელი /ასიმეტრიული დეფორმაცია
1 – ბრტყელი დაძაბულობა)

MAT – მასალის ნომერი

KCSMY (სიმეტრიის გასაღები:
0, 1 – განახევრებული მოდელი
სიმეტროული ГУ
2 – განახევრებული მოდელი ასიმეტროული ГУ
3 – სრული მოდელი

KLOCPR ლოკალური გადაადგილებებიუს ბეჭდვის გასაღები

```
KCALC,0,1,0

GET,KI1,KCALC,,K,1
GET,KI2,KCALC,,K,2
GET,KI3,KCALC,,K,3
```

J – ინტეგრალის ანგარიში Z=zic სიბრტყეში ni – nk კვანძებიდან გამოძახებადი მაკროსის მეშვეობით – j_f_l. mac ოთხი არგუმენტით

```
nji = NODE(x5,0.0,zic)

njj = NODE(x5,y2,zic)

njk = NODE(x1,y2,zic)

njl = NODE(x1,0.0,zic)

eic1 = eic/(1-(nuic*nuic))

j_f_1,nji,njj,njk,njl

KI1J = SQRT(eic1*JINT)
```

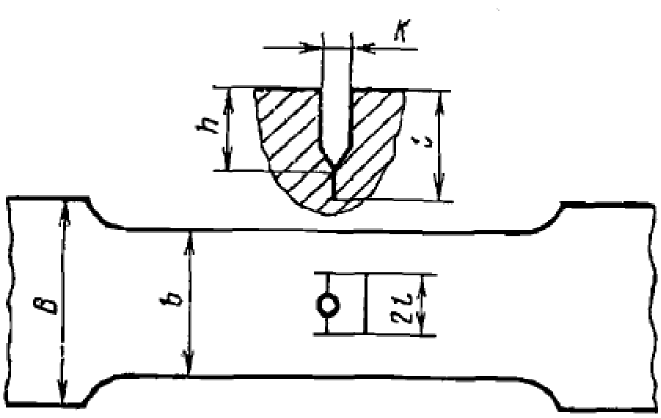
დაძაბულობის ინტენსივობის კოეფიციენტის (შემთხვევა 1) ანგარიში

```
lr = 2*lic/bic
yr = SQRT(lr)*(1.77+0.227*lr-0.51*(lr)**2+2.7*(lr)**3)
pb = p0*bic*tic
KI4 = pb*yr/tic/bic
```

დაძაბულობის ინტენსივობის კოეფიციენტის (შემთხვევა 2) ანგარიში

```
alfa = (x3/x6)
pi = 3.1415926
KI5=p0*SQRT(pi*x3)*(1-0.025*alfa**2+0.06*alfa**4)*SQRT(1/COS(alfa*90))
/DSCALE,1,100
PLNSOL,U,SUM,
FINISH
```

მაგალითი

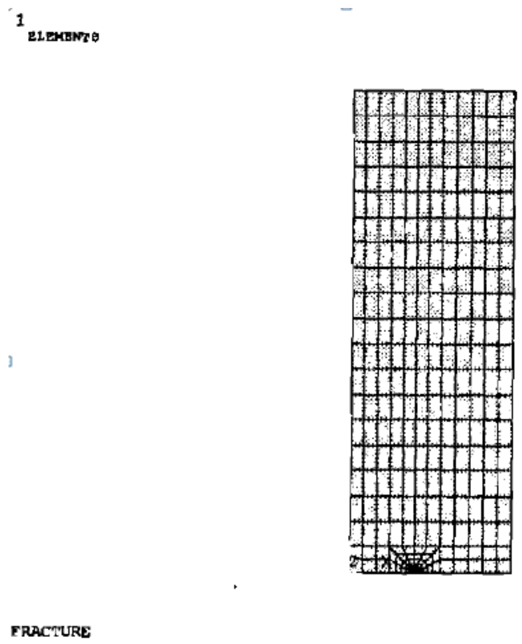


პარამეტრების გაზომვის დიაპაზონი
b – თავისუფალი პარამეტრი;
$l = (0{,}15\ldots0{,}25)b$;
$B = (1{,}25\ldots1{,}6)b$;
$h = (0{,}1\ldots0{,}2)b$;
$t = (0{,}15\ldots0{,}25)b$;
$R = 0{,}3b$;
$K = 0{,}03b$;
$L = 3b$.

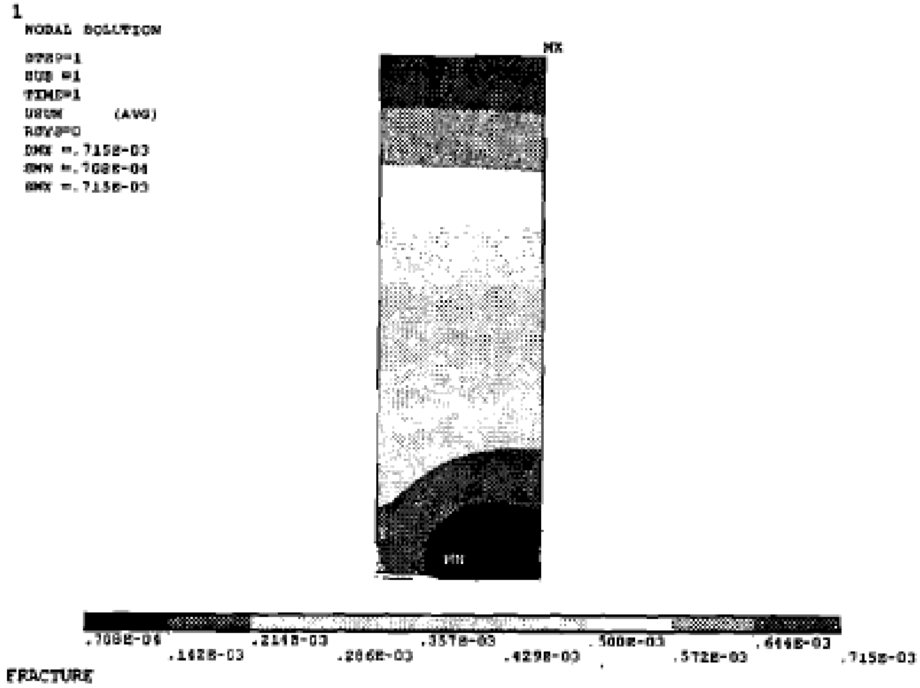
ნიმუშის აბსოლუტური შემოღებული ზომები:

$b = 1$ м;
$l = 0{,}2b = 0{,}2$ м;
B — არ
$h = 0{,}15b = 0{,}15$ м;
$t = 0{,}1b = 0{,}1$ м;
$K = 0$;
$L = 3$ м.

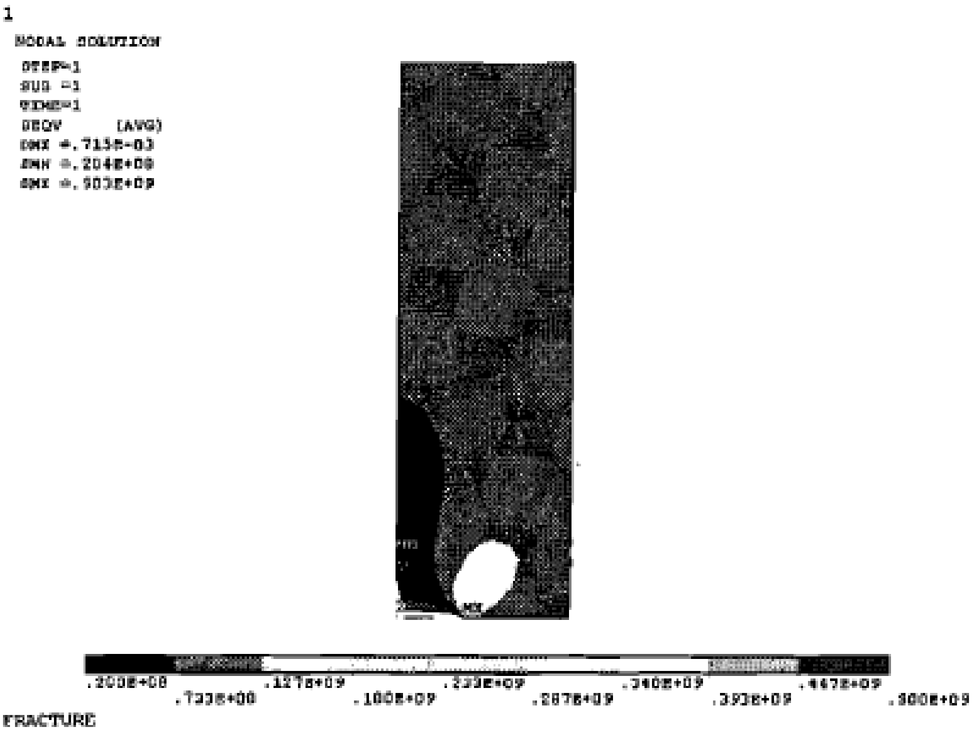
ნახ. 4.19 ნიმუშის სქემა



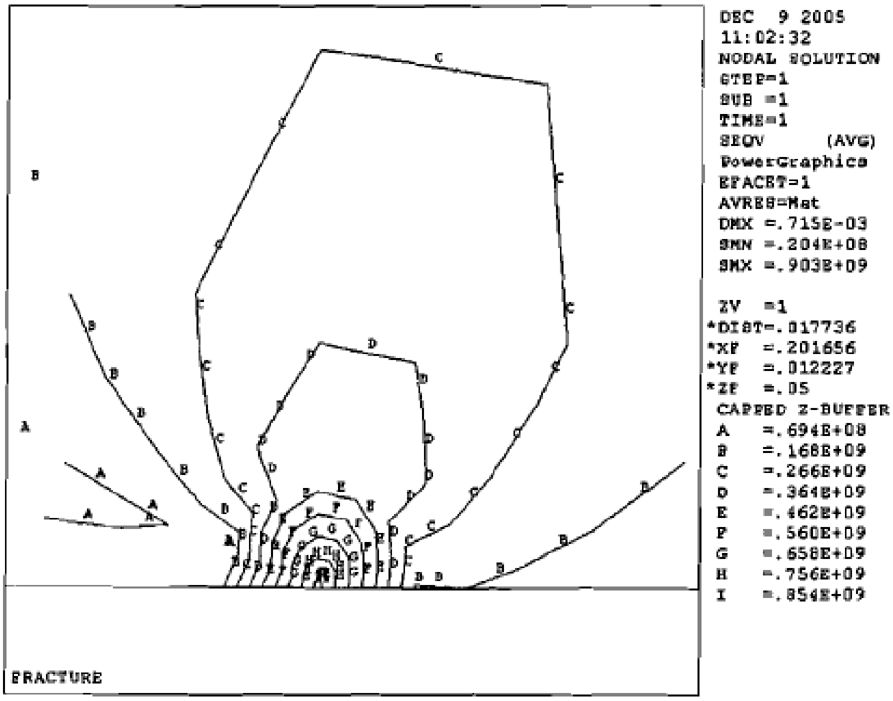
ნახ. 4.20 სასრულ ელემენტიანი ბადე



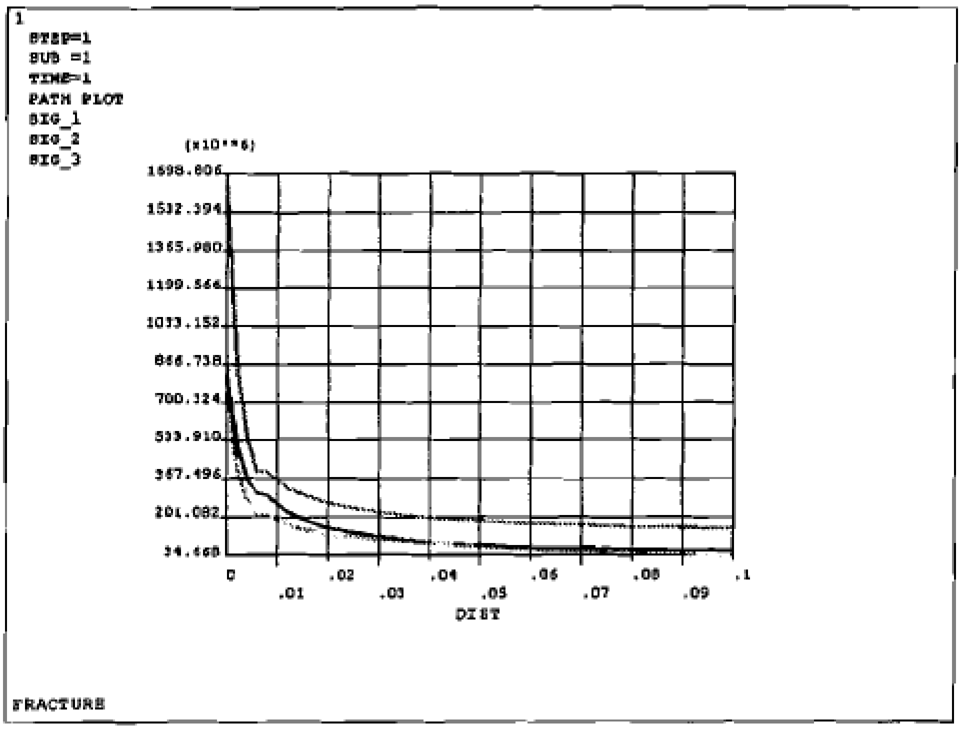
ნახ. 4.21 გადაადგილების განაწილება (მ)



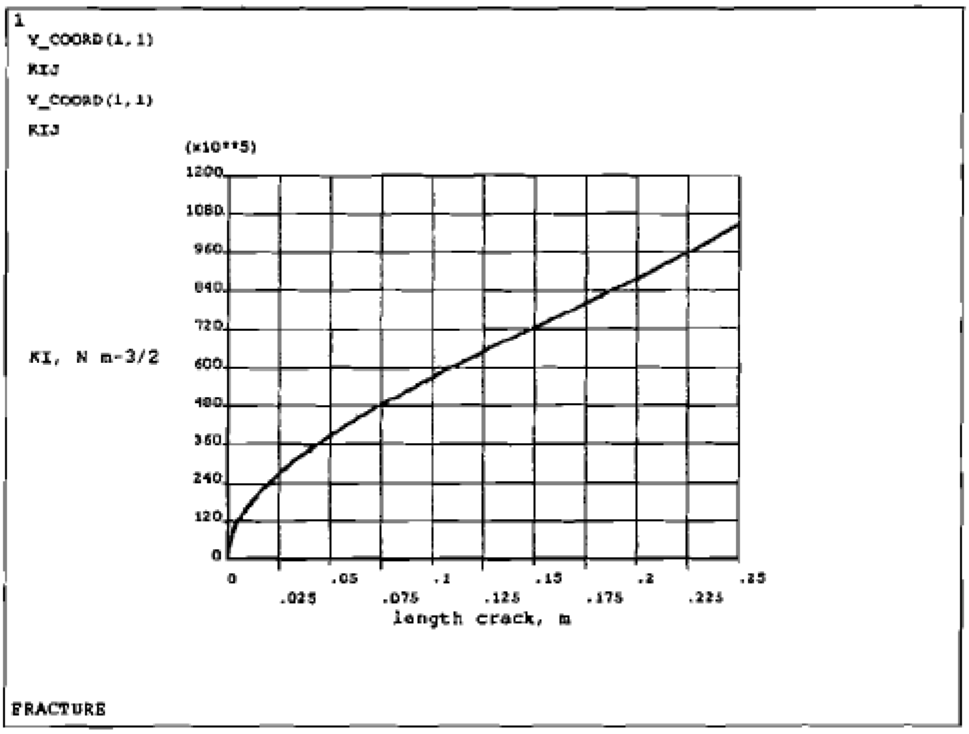
ნახ. 4.22 ძაბვის ინტენსივობის განაწილება (პა)



ნახ. 4.23 ძაბვის (პა) ინტენსივობის იზოხაზები ბზარის მწვერვალზე



ნახ. 4.24 მთავარი ძაბვების (პა) ეპიურები ბზარის გაგრძელებაზე სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ: sig_1, sig_2, sig -3 – პირველი მეორე და მესამე მთავარი ძაბვებიძაბვი



ნახ. 4.25 ბზარის სგრძის (მ) დამოკიდებულების გრაფიკი ძაბვის (პა) ინტენსივობის კოეფიციენტზე σ = 100 მპა წაგრძელების დაძაბულობის დროს

4.2. ბეტონის კონსტრუქციების გამოკვლევა ულტარბგერითი და აკუსტიკური ემისიის მეთოდებით

ბზარის ზომის დადგენა.

როდესაც ბზარის ადგილმდებარეობა დადგენილია, ფიქსირებულია ორი ანათვალი, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 4.26 (1,2). ერთი ანათვალი აიღება როდესაც თავაკები სიმძლავრისტულად არის განთავსებული ბზარის (2) მიმართ, მეორე შემთხვევაში იგივე მანძილი ცეცებს შორის აიღება დეფექტების გარეშე ზედაპირზე (1).

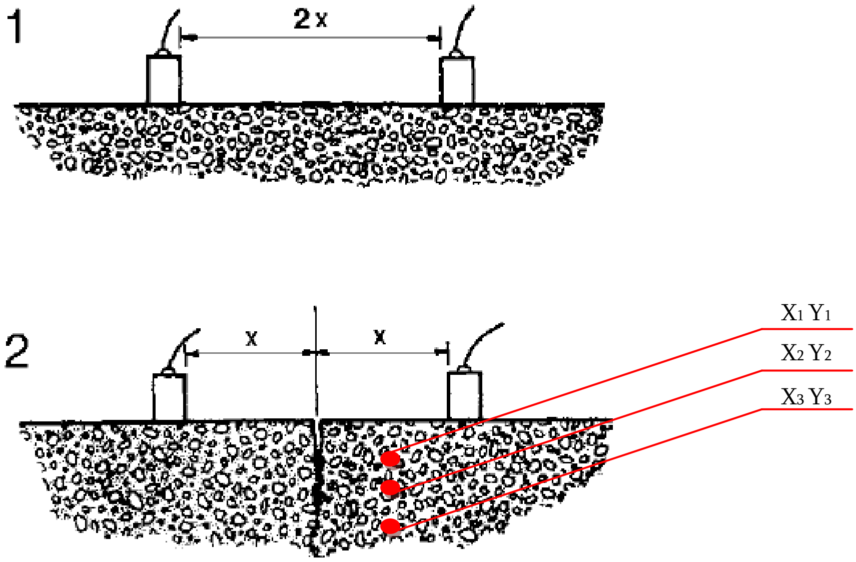
შემდგომი ფორმულით შეიძლება გამოთვლილი იქნას “h” სიღრმის დეფექტი, იმ პირობით რომ ბზარი არ არის წყლით გავსებული:

$$h = x\sqrt{\frac{t_c^2 - 1}{t_s^2}} \qquad (4.7)$$

სადაც: x –ნახევარი მაზილი ცეცებს შორის; h –ბზარის სიღმე; T_c – ნაწილაკის გარბენის სიგრძე ბზარზე; t_s – ნაწილაკის განარბენის სიგრძე ზედაპირის გასწვრივ ბეტონში დეფექტების გარეშე.

"h" და x ერთნაირ ერთეულებში იზომება.

ერთნაირ ერთეულებში იზომება.



ნახ.4.26 ბზარის სიღმის შეფასებისათვის თავაკების ადგილმდებარეობა

ნახ.4.27

ბეტონში ბზარის გავრცელების მაგალითები

ნახ.4.28

ნახ.4.29

4.3. ბეტონში ბზარის შეჩერება

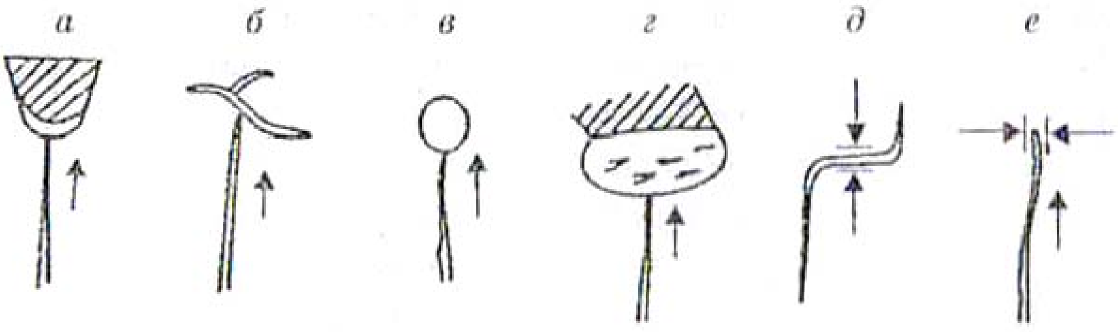
როგორც უკვე იყო აღნიშნული სტრუქტურაში არსებობს სხვადსხვა დეფექტები: ბზარები, ფორები. კონსტრუქციის დაძაბულობის კოეფიციენტი დრეკად ფორებიან მასალებში შეადგენს 3-10-ს. წვეტიანი მყიფე მასალის შიგნით მან შეიძ;ება მიაღწიოს 10^2-10^3-ის მნიშვნელობას. ამ შემთხვევაში ძაბვის დაბალი მნიშვნელობებისათვის ბზარის ბოლოებზე ძაბვა აღწევს ზღვრულ მნიშვნელობებს, რომელიც გამოიწვევს პრაქტიკულად მყისიერ რღვევას, ბზარი სწრაფად აღწევს თავის კრიტიკულ სიგრძეს, ამით აიხსნება ბეტონის დაბალი სიმტკიცე. გაჭიმვისას ბეტონი იქცევა ისე როგორც წრფივი მასალა. შემაკავებელ ფაქტორებად გვევლინება:

1) ბეტონშემავსებელი;
2) გარკვეული მიმართულების მქონე ბზარები, ფორები;
3) ქვაცემენტში მცირე ფორების უბნები და სხვა არაორდინალური სტრუქტურა.

ფორების დაძაბულობის კოეფიციენტი ბზარის დაბოლოებებზე ,,იხსნება'', ხოლო მარცვალშემავსებელი შემოევლება ბზარს და ხელს უშლის მის ზრდას, შემხვედრი ბზარები – მათ მიმართავენ უფრო საშიში მიმართულებით. გაჭიმვისას ბზარის ზიგზაგის მაგივრად ხდება ნაპირების მიზიდვა (ნახ. 4.30 დ).

ენერგეტიკული თვალსაზრისით, დამუხრუჭება ემთხვევა ბზარის განვითარების ენერგიის ინტენსიურ დისიპაციას. ბზარების თვითდამუხრუჭების ფაქტორმა (ნახ. 4.30ბ) ჰპოვა დადასტურება ბეტონის სატატისტიკურ თეორიაში.

ა ბ გ ე ვ ზ



ნახ. 4.30

ამრიგად, ბეტონის არაორდინალური სტრუქტურა ერთი მხრივ, წარმოადგენს მიზეზს ბზარების შინაგანი შეხებებისა, ხოლო მეორე ფაქტორი ეწინააღმდეგება მათ ზრდას. აქ მთავარია, რომ მეორე ფაქტორი ბევრად აღემატებოდეს პირველს.

დამამუხრუჭებელი გავლენა ბზარზე ახდენს არაერთგვაროვანი დაძაბულ მდგომარებას, ამ დროს შეიძლება ამუშავდეს რამოდენიმე ეფექტი, რომელიც იმოქმედებს ბზარზე (ნახ. 4.30 ე). ბზარის გავრცელების შეიძლება დამოკიდებული იყოს დატვირთვის სახეზე და სხვა ფაქტორებზე.

4.4. კონსტრუქციის ხანგამძლეობაზე მცირე დროითი დატვირთვის გავლენა

ხანდახან ექსპლუატაციის წესი ითვალისწინებს გამოსაცდელი მასალის აუცილებელ გადატვირთვას. ცხადია, რომ თუ მასალის დაძაბულობა დროის განმავლობაში მცირდება და მცირდება მისის რესურსი, დატვირთვის გაზრდით იზრდება დეგრატაცია და კონსტრუქციის ელემენტების რღვევა. კინეტიკური თეორიის პოზიციით, მასალის დეგრადაცია დატვირთვის დროს წარმოადგენს სიჩქარეს წარმოქმნილს ბზარზე. ბზარწარმოქმნის პროცესი მიმდინარეობს ნებისმიერი მოქმედი დაძაბულობის სიჩქარით. მზიდი ექსპოტენციალურად. აქედან გამომდინარე ვადგენთ, რომ გადატვირთვა აჩქარებს ბზარწარმოქმნას. მასალის რესურსი შემცირება პირდაპირპროპორციულია დატვირთვის მოქმედების დროის. თეორიულად შესაძლებელია, რომ დატვირთვის ექსპერიმენტი შეიძლება იყოს არა მხოლოდ რღვევის ფაქტორი. როცა კონსრტუქციას მოვამზადებთ გადასარტვირთვად გამოცდას შეუძლია დაჩქაროს რელაქსაცია დარჩენილი ძაბვის და ამით მიიღება სიმტკიცის გაზრდა და ხანგამძლეობა. ამისათვის პლასტიკური დეფორმაციის სიჩქარე უნდა იყოს ბზარწარმოქმნის სიჩქარეზე მეტი. მაგრამ ასეთი სიტუაცია არ არის უნივერსალური და მისი რეალიზაცია თხოულობს კონკრეტულ ანალიზს.

4.5 მასალის დაბერება

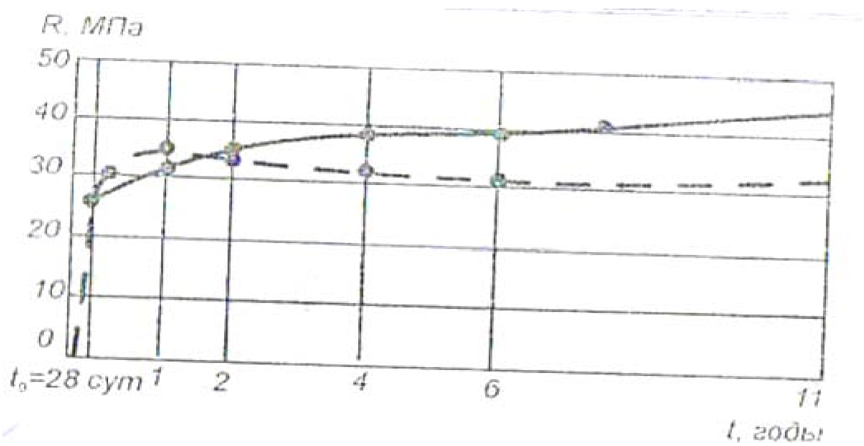
ხანგამძლეობის ბოლო ეტაპია დაბერება – ყველაზე ტიპიური პროცესი ექსპლუატაციის პერიოდის. იგი შეიძლება დაიწყოს პირველ ეტაპზე კონსტრუქციის ექსპლუატაციისას. ეს ეტაპი ხასიათდება სტრუქტურის რღვევით, ატომებს შორის კავშირი თანდათან გაითიშება. რღვევა იწყება ატომების და მოლეკულების თბური მოძრაობით გაზრდით. დადგენია, რომ პროცესი თანდათან სტრუქტურის დაზიანებას ახლავს თან, ამ დროს საქმე გვაქვს მცირე დეფორმაციასთან.

4.6 ბეტონის სიმტკიცის გამყარების ზრდა და პირობები

ბეტონის სიმტკიცე თანდათან იზრდება კარგ პირობებში (10 წელი და მეტი ნახ. 4.31 ამიტომ რაც ნაკლებია ცემენტის სიწმინდე, მით მეტია სიჩქარე და ნაკლები ბეტონის სიმტკიცის ზრდის სიგრძე. პირველ 28 დღეში ბეტონი ინტენსიურად მყარდება, ამიტომ ბეტონის გამოცდა სიმტკიცეზე ხდება სწორედ ამ პერიოდში.

ბეტონის სიმტკიცე იზრდება ფიზიკო-ქიმიური პროცესის შედეგად, როცა ცემენტის წყალთან ქმედების პროცესი ნორმალურად მიმდინარეობს სითბოს პირობებში. ცემენტის წყალთან ქმედება შეწყდება, თუ ბეტონი გაშრება ან გაიყინება. ბეტონის ადრეული გაშრობა ან გაყინვა ართულებს მის თვისებრიობას. შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ბეტონის სიმტკიცე იზრდება პირდაპირ ლოგარითმის პროპორციულად:

$$R_t = R_{28}\frac{\lg t}{\lg 28} \qquad (4.8)$$



ნახ. 4.31

როგორც ნახ. 4.32 ჩანს ბეტონის ნორმალურ პირობებში აქვს დაბალი საწყისი სიმკვრივე და მხოლოდ 7-14 დღე-ღამის შემდეგ იძენს 60-80% სიმტკიცისას.

ბეტონში პორტლანდცემენტის ნორმალურ პირობებში, დროის განსაზღვრა ხდება ემპირიული ფორმულით:

$$R_n = R_{28} \lg n / \lg 28 = 0{,}7 R_{28} \lg n \qquad (4.9)$$

სადაც: R_n - ბეტონის სიმტკიცეა n ბიჯით;

R_{28}- დღე-ღამის ასაკი.

მაღალი კლასის ბეტონი არ განიცდის მნიშვნელოვან ზრდას სიმტკიცის დროში. ბეტონის გამყარება თვალნათლივ იზრდება ტემპერატურის ზრდისას და გარემო ფაქტორების მოქმედებისას.

ფოლადის დაბერება. დროის გასვლის შემდეგ ფოლადის სტრუქტურა რამდენადმე იცვლება, იზრდება სიმტკიცის, სიმკვრივის საზღვრები, მცირდება სიბლანტე, ფოლადი ხდება უფრო მსხვრევადი. ამ მოვლენას ეწოდება ფოლადის დაბერება. დაბერების მოვლენა ხდება ფოლადის გარდამავალ პერიოდში მდგრადი სტრუქტურისას. დაბერების პროცესის მიზეზს წარმოადგენს ფოლადის თანდათანობითი გადასვლა უფრო მყარ სტრუქტურაში. ფერიტის კტისტალში რჩება გაუხსნელი ნახშირი, აზოტი და კარბიდი და სხვა ელემენტები. ეს პროცესები სროში გამოიყოფა ძირითადი გამხსნელიდან და ამყარებენ ფირფიტის მარცვლებს შრის შუაშრეს. ფოლადი მთლიანობაში რჩება მყარი, ოღონდ პლასტიკური დრო არ არის განსაზღვრული – იგი შეიძლება იყოს რაომოდენიმე დღიდან, რამოდენიმე ათეულწლებამდე, იგი დამოკიდებულია ფოლადის სტრუქტურაზე, მის დაბინძურებაზე, ტემპერატურულ და მექანიკურ ქმედებებზე.

მეტალოკონსტრუქციაში ფოლადის დაბერება არ გაითვალისწინება. ფოლადის დაბერების პროცესს აქვს ორი ასპექტი. ერთი მხრივ ეს არის უარყოფითი გამოვლინება, რომელიც მიიყვანება ფოლადის პლასტიკურობის და სიმტკიცის შემცირებასზე. მას აქვს დიდი მნიშვნელობა მცირედ ნახშირბადოვანი ფოლადი ჩვეულებრივი ხარისხით, მთლიანი წარმოებული რაოდენობის 2/3 ნაწილს შეადგენს. ამ შემთხვევაში პრობლემა წყდება იმით რომ, დაბერების ინტენსივობის პროცესი მცირდება.

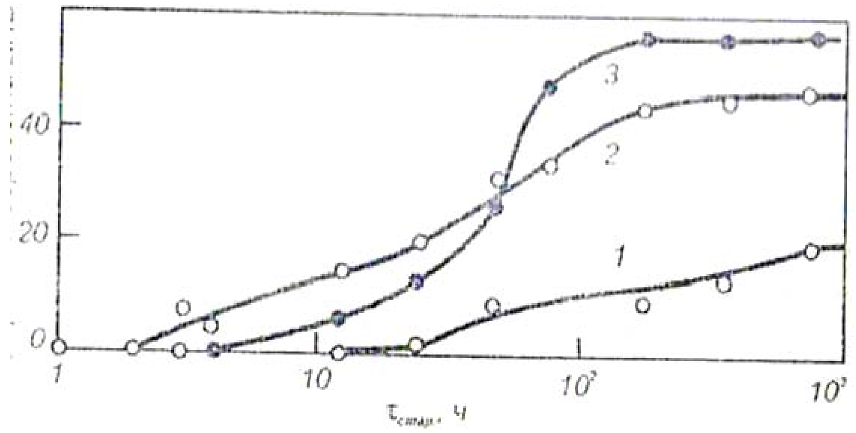
მეორე მხრივ დაბერების პროცესი შეიძლება გამოყენებული იქნას, როგორც კონსტრუქციის თვისებების განმსაზღვრელ პირობებში შესამჩნევად ამწევი რათა არ

მოხდეს მყისიერი რღვევა. ამ შემთხვევაში იღწვიან მიიღონ ისეთი კომპოზიცია და დაბერების რეჟიმი, რომელიც საშუალებას იძლევიან მიაღწიონ მითითებულ ეფექტს მაქსიმალურ საფეხურზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ მექანიკური თვისებების შესწავლა ფოლადის დაბერებისას ყოველთვის არ არის უარყოფითი. განსაზღვრულ პირობებში შეიძლება დადებითად გამოიტენონ ეფექტი, ამ დროს სიმტკიცის დონე დაღლილი სიმტკიცით.

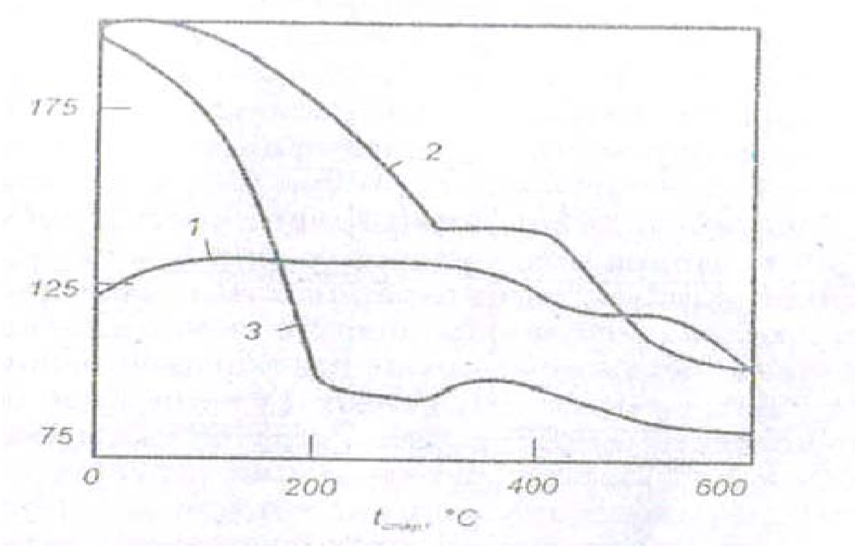
ნახ. 4.32

როგორც ნახ. 4.33-დან ჩანს დაბერების პროცესში სიმტკიცე იზრდება, მიაღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას ორი ფაზის განმავლობაში.



ნახ. 4.33

თანდათანობით დაბერებისას სიმტკიცის მაქსიმალური ზრდა შეადგენს 10-20ნბ. კონცენტრაციის ზრდა C+N მყარ გამხსნელში მიდის მყისიერ შემცირებამდე საინკუბაციო პერიოდს, რომლის დროსაც არ ფიქსირდება სიმტკიცის ცვლილება, ხოლო მაქსიმალური ზრდა დაბერებისას 2-ჯერ იზრდება, მაგრამ ის ნაკლებია ვიდრე სუფთა დაბერებისას (ნახ. 4.34)



ნახ. 4.34

ხელოვნურ დაბერებას რა თქმა უნდა მივყავართ იგივე სახის სიმტკიცის ცვლილებამდე. ხელოვნური დაბერება (8 თვე) როგორც წესი დამატებით ზრდის სიმტკიცეს.

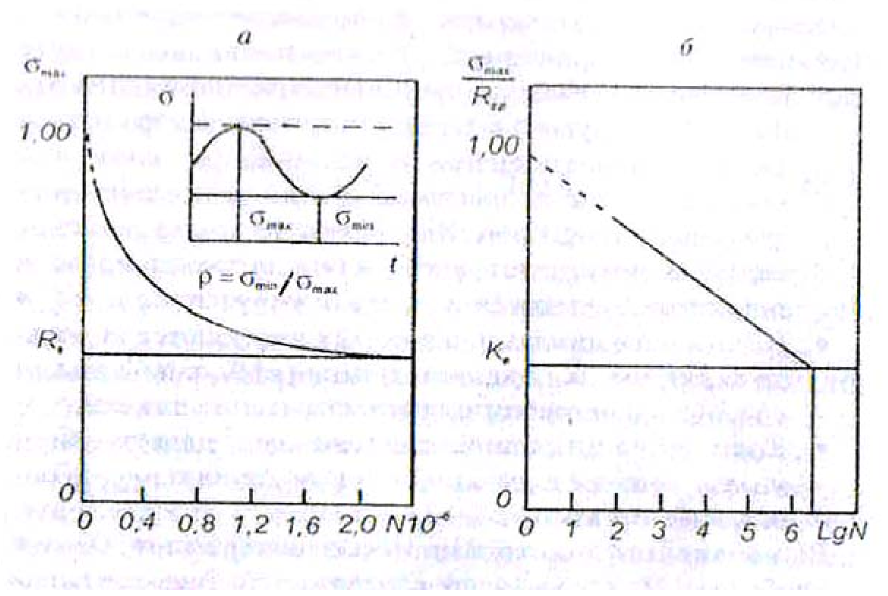
ლითონში ციკლური მოქმედებსას დაღლა.

ინჟინრულ პრაქტიკაში გამოიყენება ცნება მცირედროითი და ხანგრძლივი წინააღლდეგობა. მცირედროითი წინააღმდეგობა ჩვეულებრივ განისაზღვრება მასალის ერთჯერადი დატვირთვისას მოცემულ სტანდარტის რეჟიმში. რეჟიმის ცვლილება დატვირთვის აისახება მასალის დეფორმაციის დიაგრამაზე. დიდი სიჩქარისას დატვირთვის მცირე ზრდისას მოხდება დეფორმაციის ზრდა პროპორციულად $v \to \infty$ დაიკვირვება დინამიკური ეფექტი, მცირე ზრდისას დაიკვირვება დიდი ზრდა დეფორმაციისას. ამრიგად დაზ ბულობის დამოკიდებულება დეფორმაციაზე აისახება დროითი ეფექტით.

4.7 კონსტრუქციული მასალების დარღილობითი რღვევა

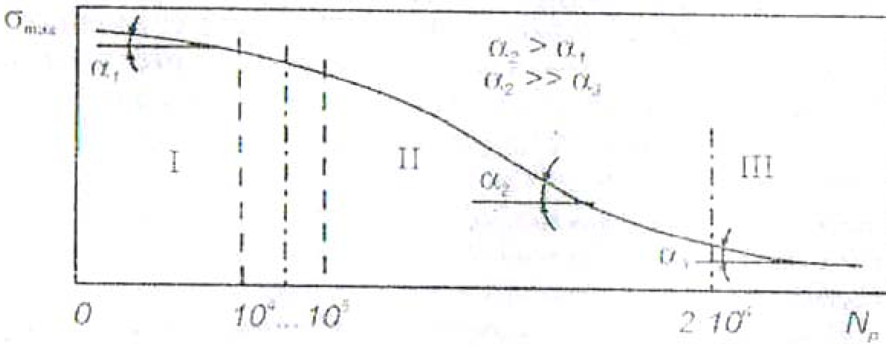
თუ რღვევა წარმოადგენს ციკლური დაძაბულობის შედეგს, მაშინ მას ეწოდება დაღლილი, ხოლო ასეთი რღვევის იზეზს წარმოადგენს დაღლილობა, დადგენილი გაგებით პროცესი თანდათან ლოკალური დაზიანებები გროვდება ცვალებადი დატვირთვის მოქმედებით მასალაზე, რომლის შედეგადაც ხდება მისი რღვევა.

ციკლური დაძაბულობა ძირითადი მახასიათებლების პირობებში არის ასიმეტრიული კოეფიციენტი $\rho = \left(\sigma_{\min} / \sigma_{\max}\right)$ დარღილობა წარმოადგენილია გარე ნორმალური (ა) და პოლულოგარითმული კოორდინატები (ბ) ნახ. 4.35.



ნახ. 4.35

ნამდვილად განაპირად გააჩნია S ხასიათი. (ნახ. 4.36).



ნახ. 4.36

ნახ. 4.36-ზე ნაპირა დარლილობა სამ ნაწილად დავყოთ:

1 უბანი – მცირეციკლური დაღლილობა, 2 უბანი – მრავლაციკლური დაღლილობა, 3 უბანი – დაღლილობის გხანგრძლივებული დარლილობა.

ძირითადი ფაქტორები, რომლელიც რღვევას ახასიათებს კონსტრუქციაში დაღლილობისას, ასეთია:

- ყველა მყარი სხეული ციკლური დატვირთვისას ირღვევა მცირე დაძაბულობისას, ვიდრე ხანგრძლივი მოქმედების დატვირთვისას;

- ციკლური დატვირთვა, როდესაც იცვლება არა მარტო სიგრძე, არამედ დატვირთვის ნიშანი ($\rho<0$), შესამჩნევად საშიში ასიმპტოტური ციკლებისათვის.
- ციკლების რაოდენობა N მივყავართ რღვევამდე, იზრდება σ_{max} მნიშვნელობის შემცირებით და P მნიშვნელობის გაზრდით.

ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი დასკვნა, გააკეთა ა. ველერმა, რომელიც შემდეგში მდგომარეობს დარლილობისას რღვევა არ შეიმჩნევა იმ შემთხვევაში, როცა დაძაბულობის მნიშვნელობა არ აღემატება ზოგიერთ მნიშვნელობას. ასიმპტოტური ხასიათიდან გამომდინარე, დაძაბულობისას გადამტანების ზღვრის ახლოს R_b ციკლის რიცხვი რღვევამდე მნიშვნელოვნად იზრდება. როცა $N \geq 2 \cdot 10^6$ ნაპირი ხდება აბსცისის ღერძის პარალელური.

ბევრი კონსტრუქციებისათვის როცა $N=(2\text{-}5) \cdot 10^6$ საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ $N_0=2 \cdot 10^6$ როცა $0< N<2 \cdot 10^6$ დატვირთვის ციკლი რომელსაც მასალა უძლებს, უწოდებენ შეზღუდულ ამტანიანობას.

ამტანობის გამოსაანგარიშებლად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ზღვრული დარლილობის ანალიტიკური აღწერა. ამ აღწერისათვის ყველაზე გავრცელებულ სახეს წარმოადგენს შემდეგი სახის განტოლება:

$$\sigma_{\max} / R_b = a - b \lg N_p$$

სადაც $\sigma_{\max}$ - ცვლის მაქსიმალური დატვირთვაა;

R_b - მასალის დროებითი წინაღობაა;

a,b – კოეფიციენტები, დამოკიდებულნი არიან ცილის ასიმეტრიულობაზე ρ და სხვა პარამეტრებზე;

N_p- ციკლური დატვირთვის რიცხვია.

$\sigma_{\max} / R_b = k_b$ დამოკიდებულებას ეწოდება ამტანობის კოფიციენტი.

4.8. სხვადასხვა მასალების კონსტრუქციის ამტანობა. რკინაბეტონის მასალებში ამტანობა

ძირითადად გამოსატველელი ფორმულებიდან შეიძლება დასკვნების გაკეთება:

- მაქსიმალური და მინიმალური ძაბვა რკინაბეტონის ელემენტების ბეტონში ან არმატურაში განსაზღვრავენ პლასტიკური დინების ჰიპოთეზას და ბეტონის მუშაობა გაჭიმვაზე მხედველობაში არ მიიღება;
- არმატურაში ან ბეტონში მაქსიმალური ძაბვა არ უნდა აღემატებოდეს შესაბამის გამოსათვლელ წინაღობას;
- გამოსათვლელი წინააღმდეგობა დგინდება დატვირთვის რეჟიმის გარეშე, ხასიატდება ასიმეტრიული ციკლის კოეფიციენტით და მასალის ტიპით – ბეტონი ან არმატურა.

რკინაბეტონის ელემენტების ამტანობა განისაზღვრება σ_B და σ_S კოეფიციენტების ფარდობით γ_{b1} და γ_{s3}-თან.

ბეტონში არამდგრადი დეფორმაციების შემჭიდროებისას ზონასი უნდა იქნას გათვალისწინებული ბეტონის სიმკვრივის მოდელის შემცირება, ნაკადის ამტანობა, ელემენტის ღერძის ნორმალური მნიშვნელობაზე უნდა განისაზღვროს შემდეგნაირად:

ა) ბეტონის შემჭიდროებისას $\sigma_{B,\max} \leq R_b \gamma_{b1}$

სადაც: $\sigma_{B,\max}$ - ბეტონში მაქსიმალური ნორმალური ძაბვაა,

R_b - ბეტონის საანგარიში წინააღმდეგობა;

γ_{b1} - შესრულებლი სამუშაოს კოეფიციენტი მაქსიმალური დატვირთვისას.

ბ) გაჭიმული არმატურისათვის

$$\sigma_{s,\max} \leq R_{sb} \gamma_{s3}, \gamma_{s4}$$

სადაც: $\sigma_{s,\max}$ - მაქსიმალური ნორმალური ძაბვაა,

R_s - ბეტონის საანგარიში წინააღმდეგობა;

γ_{s3} - შესრულებლი სამუშაოს კოეფიციენტი მრავალჯერადი დატვირთვისას.

γ_{s4} - შესრულებლი სამუშაოს კოეფიციენტი არმატურაში სვარკითი შეერთებებისას.

ფოლადის კონსტრუქციების ელემენტების ამტანიანობა.

ფოლადის კონსტრუქციების ელემენტების ამტანიანობა შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი ფრმულით:

$$\sigma_{max} \le \alpha \cdot R_v \gamma_v$$

სადაც R_v – ფოლადის დარღილობის წინააღმდეგობაა;

α - კოეფიციენტი, დატვირთვის ციკლის რაოდენობა n გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\alpha = 0{,}064\left(n/10^6\right)^2 - 0{,}5\left(n/10^6\right) - 1{,}75$$

3-8 ჯგუფის ელემენტისათვის

$$\alpha = 0{,}07\left(n/10^6\right) - 0{,}64\left(n/10^6\right) + 2{,}2$$

ლიტერატურა

1. ბაბილოძე კ. ლაღუნდარიძე გ. მაღრაძე თ, წიქარიშვილი მ. ,,საგანგებო სიტუაციებში შენობა-ნაგებობებზე დატვირთვების ზადუსტება და ემპირიულ-სიხშირული მახასიათებლები''. საერთაშირისო კონფერენციის ,,მექანიკის არაკლასიკური ამოცანები'' შრომები ტ.1 25-27 10.2007 ქუთაისი, საქართველო გვ. 164-170;
2. ჯ. ბახტაძე, ლ. ზამბახიძე, გ. ლაღუნდარიძე. ,,რღვევის მექანიკა''. თბილისი 2002წ.

3.ს. ბლიაძე, მ. მოხევიშვილი, თ. მაღრაძე, გ. ცირეკიძე, კ. ჯაფარიძე ,,ზოგიერთი რამ მასალების რღევის მექანიკიდან''. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი ,,მშენებლობა'', №3. 2006, 12-16 გვ.

4. რ. იმედაძე, ლ. იმედაძე, თ. მაღრაძე. ფოლადის კოლოფის ფორმის გადახურვები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი ,,მშენებლობა'', თბილისი, №4(19) 2010წ, 70-73გვ.
5. რ. იმედაძე, ო. ხაზარაძე, ი. ღარიბაშვილი, თ. მაღრაძე. ჰიდროიზოლაციის ფენის ზემოთ განლაგებული თბოიზოლაციანი ბრტყელი სახურავები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი ,,მშენებლობა'', თბილისი, №1(20) 2011წ, 21-27გვ.

6. მ. კუბლაშვილი, მ. წიქარიშვილი, თ. მაღრაძე, კ. ბაბილოძე. ,,კონსტრუქციების ბზარმედეგობის ხარისხის განსაზღვრა''. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“, თბილისი, № 2. 2006, 68-73 გვ.რ.
7. მ. კუბლაშვილი. პირველი გვარის სინგულარული ინტეგრალური განტოლების რიცხვითი ამოხსნების შესახებ. // პროფესორ-მასწავლებელთა და სტუდენტტ პირველი რესპუბლიკური სამეცნიერო კონფერეწნცია. აბასთუმანი, 1995წ, 18-20 მაისი, გვ. 29;
8. მ. კუბლაშვილი. ბზარის ამოცანის რიცხვითი ამოხსნის შესახებ. // საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია ,,მართვის ავტომატიზირებული სისტემები''. სამეცნიერო შრომები ქ. თბილისი, 27-28 სექტემბერი, 1996წ., გვ.28-31;
9. მ. კუბლაშვილი. კოშის ტიპის ინტეგრალების მიახლოებითი გამოთვლა გახსნილი კონტურების შემთხვევაში მაკოტექტირებელი პარამეტრის საშუალებით და მათი ზოგიერთი გამოყენება. // მეცნიერება და ტექნოლოგიები, თბილისი. №10-12, 2002. გვ. 54-58;
10. მ. კუბლაშვილი. ჭრილების მქონე ძელის გრეხის ამოცანის რიცხვითი ამოხსნების შესახებ. // სტუ-ს 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი პროფესორ-მასწავლებელთა ღია სამეცნიერო საიუბილეო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებათა თეზისები. თბილისი, 2002, გვ. 20;
11. მ. კუბლაშვილი. პირველი გვარის სინგულარული ინტეგრალური განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა დისკრეტულ განსაკუთრებულობათა მეთოდით გახსნილი კონტურებით. // სტუ-ს 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი პროფესორ-მასწავლებებლთა ღია საიუბილეო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებთა თეზისები. თბილისი 2002, გვ. 20;
12. მ. კუბლაშვილი. კოშის ტიპის ინტეგრალების აპროქსიმაცია გახსნილი კონტურების შემთხვებვაში და მათი ზოგიერთი გამოყენება. // სტუ-ს 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი პროფესორ-მასწავლებებლთა ღია საიუბილეო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებთა თეზისები. თბილისი 2002, გვ. 214;
13. ნ. კაჭკაჭიშვილი, გ. ყიფიანი. თ. მაღრაძე ,,კომპოზიციური მასალების დაპროექტება რღვევის მექანიკის საფუძველზე რთული კონსტრუქციების

შესაქმნელად". სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა", თბილისი, №2. 2006, 30-35 გვ.

14. მ. ტურძელაძე, ლ. ზუკატიშვილი „სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის დეფორმირებასა და რღვრვაზე" ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი 2009წ;
15. რ. იმედაძე, მ. წიქარიშვილი, თ. მაღრაძე, ა. წაქაძე. „შენობა-ნაგებობების დაზიანების მიზეზების და ავარიულობის ნიშან-თვისებები". საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი 2010წ;
16. თ. მაღრაძე, რ. მახვილაძე, მ. წიქარიშვილი „დისონანსი ქალაქურ გარემოსა და მის აღმშენებლობაში". სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა", თბილისი, №2(5) 2007, 20-25 გვ.
17. თ. მაღრაძე. კონსტრუქციის რღვევის აქტიურ ზონებში ვიზიუალური და ინსტრუმენტალური ძიების მეთოდიკა. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა", თბილისი, №1(20) 2011წ, 59-68გვ.
18. ა. პირადოვი, კ. პირადოვი, ლ. კახიანი, გ. იოსებაშვილი. „ბეტონის და რკინაბეტობის რღვევის მექანიკის საფუძვლები". თბილისი, 1998წ,
19. ცხვედაძე, ლ. ქაჯაია, თ. მაღრაძე „საინჟინრო ნაგებობათა სამყაროში" სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა", თბილისი, №1. 2006, 39-43 გვ.
20. მ. წიქარიშვილი, ა. წაქაძე, თ. მაღრაძე, გ. ერაგია, მ. ვარდიაშვილი. დაზიანებული (ბზარებიანი) შენობა-ნაგებობების უსაფრთხოება, ბზარმედეგობის და მარაგის დადგენა. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა", თბილისი, №2(17) 2010წ, 160-167გვ.
21. Грешников В. А. Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М: Из-во стандартов. 1976, 270 с;
22. Джикариани А. В. К решению сингулярных интегральных уравнений приближёнными проекционными методами. \\ ЖВМ и МФ, 1979, т 19, №5 с. 1149-1161;
23. Джикариани А. В. Решению сингулярных интегральных уравнений коллокационными методами. \\ ЖВМ и МФ, 1981, т 21, №2 с. 355-362;

24. Джикариани А. В. К вопросу приблихённого решения одного класса сингулярных интегральных уравнений. \\ Труды Тбилиси матем. ин-та 1986 т. 86 с. 41-49;
25. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. \\ Металлургия М. 1971;
26. Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов \ Перев. с японск. – Киев: Наукова думка, 1978. – 352 с:
27. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. М: Высшая школа, 1977, - 278 с;
28. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. М: Металлургия, 1984 – 280 с;
29. Колосов Г. В. Об одном приложеии теории функций комплексного переменного к плоской задаче математической теорий упругости. Тип. К. Маттисева, Юрьев, 1909;
30. Кублашвили М. Д. К вопросу устойчивости неклторых квадратурных формул для сингулаярных интегралов. \\ Всесоюзный симпозиум. «Метод дискретных особенностей в задачах математической физики». Тезисы докладов. Харьков – 1985г. с.55
31. Кублашвили М. Д. Замечание к одной схеме численного решения сингулярных интегральных уравнений с разомкнутыми контурами интегрирования. \\ Тр. ИВМ АН ГССР, Т. XXV:1, 1985, с. 67-73,
32. Кублашвили М. Д. О равномерных оценках аппроксимации сингулярных интегралов при разомкнутых контурах кусочно-интерполационными функциями. \\ Грузинский политехнический институт им В И Ленина. Научные труды. Математический анализ. Тбилиси. 1989 г. с. 98-106;
33. Кублашвили М. Д. Приближенное вычисление сингулярных интергалов с кусочно-дифференцируемыми плотностями. \\ Сборник трудов международного симпозиума посвященного проблемам тонкостенных пространственных систем. Тбилиси. 4-5 07. 2001 г. с. 125-131;
34. Кублашвили М. Д. О численнем решении некорорых задач бесконечных пластин с трещинами \\ Сборник трудов международного симпозиума посвященного проблемам тонкостенных пространственных систем. Тбилиси. 4-5. 07. 2001 г. с. 123-136;

35. Кублашвили М. Д. О численном решении задачи термоизолированной трещины. \\ Международный научный журнал «Проблеми прикладной механики», №4(9) 2002г. с. 89-91;
36. Кублашвили М. Д. Численное решение задачи тонкого профилия с помощью сингулярного интегрального уравнения. \\ Международный научный журнал «Проблемы прикладной механики». №2(11) 2003 г. с. 119-122;
37. Кублашвили М. Д. О Численном решении одного класа сингулярных интегральных уравнений. \\ Международный научный журнал GEN, No. 1,2003. p. 38-40;
38. Кублашвили М. Д. Численное решение задачи трещины продольного сдвига в упругом теле \\ Международный научный журнал GEN, No. 1,2003. p. 41-43;
39. Кублашвили М. Д. О построении вычислительной схемы повышенного порядка точности метода дискретных выхрей в случае разомкнутых контуров Международный научный журнал GEN, No. 1,2003. p. 44-46;
40. Р. И. Имедадзе, Т. Б. Маградзе «Металлические рамы с преднапряженными одно-или двухстоечными шпренгельными стоиками» Научно-технический журнал «Строительство» Тбилиси №1 2006, с. 55-59
41. Матвиенко Ю. Г. Некоторые аспекты механикимикроструктурно ифизически которих трещин \\ Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 64, №10. - С. 41-46;
42. Матвиенко Ю. Г. О критерии и нестабильном хрупком разрушении тела с трещиной конечных размеров \\ Проблемы механики деформируемого твердого тела: Межвуз. сб. – СПб: Изд-во СПбГУ 2002. – С. 214-219;
43. Матвиенко Ю. Г. Повреждаемость и синергетические представления в задачах механики разрушения \\ Физико-химическая механика материалов. – 1990. №1. С. 31-37;
44. Матвиенко Ю. Г. Физика и механика разрушения твердых тел. М. : Эдиториал УРСС, 2000. 76 с;
45. Мусаев Б. И.Приближенное решение полного сингулярного интегрального уровнения на отрезке \\ Инст. кибернетики АН АэССР, Баку. – 1985, 34-с, Деп. в ВИНИТИ, 23.10.85, №73, 77-85;

46. Мусаев Б. И. О приближенном решении сингулырных уравнений. Препринт \ Ин-т физики Ан АзССР-Баку, 1986 №17, 48с;
47. Мусаев Б. И. К приближенному решению сингульярных интегральных уравнений \\ В сб. Сингулярные интегральные операторы, Азерб. гос. ун-т, Баку, 1986, с. 33-61;
48. Мусаев Б. И. Приближенное решение сингулырных интегральных уравнений при отрицательном индексе методом механических квадратур. Докл. АН. СССР 1988. т. 298, №2, с. 286-290;
49. Макклинток Ф. Аргон А. деформация и разрушение материалов. \\ Мир, М. 1970;
50. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости М. Наука, 1966. с. 707;
51. Мосесов М. Д. Применение акустических методов для исследования процессов трешинообразования и механизма разрушения бетона \ Автореф. дисс. канд. техн.наук. М. 1984, 19 с;
52. Макклинток Ф. Аргон А. Деформация и разрушение материалов \ Перев. с анг. под. ред. Е. М. Морозова и Б. М. Струнина. – М: Мир, 1970. 443 с;
53. Механика разрушения и прочность материалов \ Справочное пособие под. ред. В. В. Панасюка. В 4- х т. – Киев Наукова думка, 1988-1990;
54. Морозов Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Л : Машиностроение, Ленинград. отд-ние 1984 224с;
55. Логунова В. А., Михалевская Н. В. Маслевцов А. В. Исследование долговременного сопротивления бетона с помощью метода акустической эмисии \\ Известия ВНИИГ, СНТ. – 1986 т. 136 с. 106-110;
56. Лифанов И. К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. \\ М: ТОО «Янус», 1995-504 с;
57. Лифанов И. К. О сингулярных интегральных уравненях с одномерными и кратними интегралами тира Коши. ДАН СССР, 1978, №2, с. 265-268;
58. Лифанов И. К. О методе дискретных вихрей – Прикл. Мат. и Мех. 1979, 43, №1, с. 184-188;
59. Панасюк В. В. Саврюк М. П. Дацышин А. П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. \\ Киев, Наукова думка, 1976, с. 443;

60. Панасюк В. В., Бережницкий Л. Т., Ковчик С. Е. О развитии произволно ориентированной прямоленейной трещины при растяжении пластины. ПМ, 1965, 1, 2, 48-55;
61. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. «Наукова думка» Киев, 1968;
62. Полонскии Я. Е. Обаснование численного метода «Дискретных вихрей» решения сингулярних интегралных уравнений – Пикл. Мат. И мех. 1975, 39, №4, с. 742-746;
63. Сарен В. Э. О сходимости метода дискретных вихрей. Сиб. Мат. Ж. 1978, 19, №2, С. 385-395;
64. Саникидзе Д. Г. Нинидзе К. Р. Метод свободных параметров в приближённом вичислении интегралов типа Коши. \\ Труды X Междунагодного симпозиума Методы дискретрых особенностей в задачах матем. физ. (МДОЗМФ-2001). с. 299-302;
65. Седов Л. И. Механика сплошной среды \\ 2. «Наука» М. 1973;
66. Черепянов Г. П. Одна задача о вдавливании индентора с образованием трещин. ПММ, 1963, 27,1 150-153;
67. Черепянов Г. П. Механика хрупкого разрушения. \\ «Наука», М. 1974;
68. Фридман Я. Б. Механические свойства материалов. В 2-х т. – М: Машиностроение, 1974, т. 1. – 472 с. т. 2 – 368 с;
69. Финкел В. М. Физика разрушения. рост трещин в твердых телах. – М. Металургия 1980, 176 с;
70. Руайе Д. Дьелесан Э. Упругие волны в твердых телах. Пер. с фран. М: Наука 1992, 385 с;
71. anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications . – Bosa Ration: CRC Press. 1991 – 793 c;
72. Davis B. E. Davis H. E. Broun E. H. Plastic flour and Voleume change of Concrete // Soc. for. Test. Proc. 1987. p. 37;
73. Duneagan H. L. Harris D. O. Tetelman A. S. Detection of fatigue crack growth by acoustic emission techiques // Materials Evaluation: 1979. v. 28 #10. p. 221-227;
74. Cu (Sih G.G.) О сингулярном характере температурных напряжений у вершины трешины. \\ Прикладная механика (перевод Трудов Американского общества инжинеров-механиков), б ИЛ, 1962 296E, с. 157-159;

75. Egle D. M. Tatro C. A. Analyse of acoustic – emission strain waves // I Acoustical Soc. Am. 1987. v. 41. #2 p. 321-327;
76. Eisenbalatter I. Fanniger G. Zur Anwendung der schallemissions analyse in Forschung und Technuck // Metall. #1 1997 p. 51;
77. England A. H. A note on cracks under longitudianl shear-Matematika, 1963, 10, 20, 107-113;
78. R. Bansturi. One mixed type bounday value problem of the theory of analitic functions. Proceedings of A. Razmadze matematical institute. Vol. 121, 3-9, 1999;
79. Griffith A. A. The fenomenon of repture and glow in soilds. – Phiul. Trans. Roy. Soc. 1920, A 221, 163-198;
80. Griffith A. A. The theory of repture.-proc. First Intern. Congr. Appl. Mech. DElft,
81. Goods S. H. Brown L. M. The nuclation of cavities by plastic deformation // Acta Metallurgia. – 1979. V. 27. P. 1-15;
82. Matvienko Yu. G. Brown M. K. Miller K. J. Modelling threshold conditions for short cracks under tension/torsion loading // Multiaxial Fatigue and Facture / Ed. E. Macha et al. Oxford: Elsevier, 1999. P. 3-12;
83. Rice J. R. Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields // J. Mech. POhys. Solids. – 1969. – v. 17. – P. 201-217;
84. Irwin G. R. Wells A. A. A continuum mechanics view of crack propagation. // Metallurg. Revs, 1965, 10, 38, 223-270;
85. Callis P. P. Disclotion monitions and acoustic emission // Materials Res. Stand. 1972 v. 11, #3 p/ 11-13;
86. Weinger H., Klausen D. Ermudunge verhalten von beton. Auswirking einer Beanspruchung in Dauerfestigkeits-bereich // Betonwerk Ferigteil-Technik. H. U. 1989. S. 214-220;
87. Weinger H., Klausen D. Die Schallemissionsanalgye. Vefahen und anwendung bei Beton // Betonwerk Fertigteil-Texnic H12. 1990. S. 709-716.