

ირაკლი გუჯაბიძე

ქანების ფიზიკის საფუძვლები

საგამომცემლო სახლი  
„ტექნიკური უნივერსიტეტი“

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ირაკლი გუჯაბიძე

ქანების ფიზიკის საფუძვლები



დამტკიცებულია სალექციო კურსად  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს  
მიერ. 29.06.2018, ოქმი №2

თბილისი  
2019

შპს 631.425

სალექციო კურსში აღწერილია ქანების შედგენილობა და აღნაგობა, მათი კლასიფიკაციები და თვისებების განსაზღვრის მეთოდები. განსაზღვრულია ქანების ბაზური ფიზიკური და ტექნოლოგიური თვისებები: ფორიანობა, ბზარიანობა, ნაცრიანობა, არაერთგვაროვნება, ანიზოტროპიულობა, სიმკვრივე, მოცულობითი წონა, ხვედრითი წონა, სიმაგრე, სისაღე, აბრაზიულობა, ბურღვადობა, ფხვიერადობა, ყინვამედეგობა, ჯირჯევადობა, გამოფიტვა; ქანების მექანიკური, თბური, ელექტრული, მაგნიტური, რადიაციული, ჰიდრო- და აეროდინამიკური თვისებები. განხილულია ქანების შედგენილობისა და აღნაგობის გავლენა მათ თვისებებზე.

წიგნი განკუთვნილია სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტის „სამთო და გეოინჟინერიის“ სპეციალობის ბაკალავრიატის სტუდენტებისათვის.

რეცენზენტები: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი ზურაბ ლებანიძე,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი რუსუდან მანაგაძე

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2019

ISBN 978-9941-28-546-2 (PDF)

<http://www.gtu.ge>



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

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

წიგნში მოყვანილი ფაქტების სიზუსტეზე პასუხისმგებელია ავტორი/ავტორები.

ავტორის/ავტორთა პოზიციას შეიძლება არ ემთხვეოდეს საგამომცემლო სახლის პოზიციას.

# 1. მინერალები და ქანები

## 1.1. მინერალებისა და ქანების შედგენილობა და აღნაგობა

მინერალები მეტ-ნაკლებად ერთგვაროვანი ქიმიური შემადგენლობისა და ფიზიკური თვისებების მქონე ბუნებრივი წარმოშობის სხეულებია, ისინი დედამიწის ქერქში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების შედეგად წარმოიშვებიან. დღეს 3 000 მდე სხვადასხვა მინერალია ცნობილი. მათი დიდი ნაწილი მყარი, კრისტალური აღნაგობის ქიმიური შენაერთებია, ნაწილი კი ამორულ სხეულებს წარმოადგენენ.

მინერალის კრისტალური აგრეგატები ხასიათდებიან კრისტალების ფორმით, ზომებითა და ურთიერთგანლაგებით. კრისტალების შიგნით ნივთიერების განაწილების წესს სივრცითი მესერი (სინგონია) გვიჩვენებს. კრისტალური მესრის შვიდი ტიპია ცნობილი. მესერში მოთავსებული ნივთიერების ნაწილაკთაშორის კავშირი შეიძლება იყოს იონური, კოვალენტური, ლითონური ან მოლეკულური. ნებისმიერი ქიმიური ბმით შექმნილ, კრისტალურ მესერში, ატომების განლაგება ემორჩილება გარკვეულ პერიოდულობას ე.ი. კრისტალი მიიღბა გარკვეული ელემენტარული უჯრების განმეორებით სივრცეში. ამ უჯრებს მესრის ძირითადი (ელემენტარული) უჯრები ეწოდებათ. რა თქმა უნდა, შეუძლებელია რეალური ნივთიერების მთელ მოცულობაში ზუსტად იყოს დაცული ატომებისა და იონების განლაგების პერიოდულობა. მაგალითად, მესრის გარკვეულ უბნებში შეიძლება აკლდეს ან ზედმეტი იყოს ატომი. პერიოდულობის ასეთ დარღვევას წერტილოვან დეფექტს უწოდებენ. დეფექტის უფრო რთული სახე დისლოკაციაა. ამ დროს წანაცვლებას განიცდის არა ცალკეული ატომი, არამედ ატომთა ჯგუფები.

ცალკეული კრისტალის ფიზიკური თვისებები განისაზღვრება მისი შემადგენლობითა და სივრცულ მესერში შემავალ ნაწილაკთა ურთიერთკავშირის ძალებით.

ქიმიური შემადგენლობით მინერალები ექვს ძირითად ჯგუფად იყოფიან, ესენია: თვითნაბადი ელემენტები, სულფიდები, ჟანგეულები, სილიკატები, ჟანგბადის შემცველ მჟავათა მარილები და ჰალოგენიდები.

ყველა კრისტალი ანიზოტროპულია, მათი თვისებები სხვადასხვა მიმართულებაზე სხვადასხვაა. პოლიკრისტალურ აგრეგატებში კრისტალები არ არიან ორიენტირებულები, ისინი განლაგებულნი არიან ქაოტურად, ამიტომ მთლიანობაში, ასეთი აგრეგატები შეიძლება იზოტროპულად ჩაითვალოს.

ერთი ან რამდენიმე მინერალისაგან შემდგარ მდგრად აგრეგატებს, რომლებიც დამოუკიდებელ გეოლოგიურ სხეულებს ქმნიან **ქანები ეწოდებათ**. ქანის ტიპი და დასახელება მისი მინერალური შედგენილობითა და აღნაგობით განისაზღვრება.

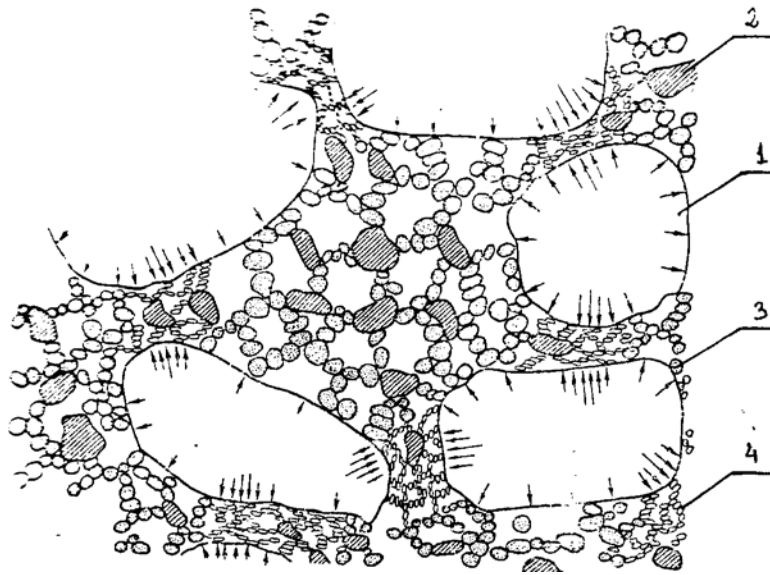
მარტივი ქანები ერთი მინერალური კომპონენტისაგან შედგებიან (მაგ.: კირქვა, გვანახშირი, ქვამარილი და სხვა), რთული ქანები კი რამდენიმე მინერალურ კომპონენტს შეიცავს (მაგ.: გრანიტი, დიაბაზი და სხვა).

ქანის აღნაგობა მისი სტრუქტურითა და ტექსტურით განისაზღვრება.

ქანის ნაწილაკების ზომები, ფორმა და ურთიერთგანლაგება განსაზღვრავს მის სტრუქტურასა და ტექსტურას.

სტრუქტურა ახასიათებს ქანის აღნაგობას, მცირე ზომის ნიმუშში; ტექსტურა გვიჩვენებს ქანის უფრო მსხვილი შემადგენელი ნაწილების, მინერალური აგრეგატების ურთიერთგანლაგებასა და ორიენტაციას (როგორცაა შრეულობა, ბზარიანობა, კლივაჟი და სხვა).

ქანების განმასხვავებელი თავისებურებაა მრავალფაზურობა. ბუნებრივ პირობებში ქანებში არსებული ფორები და ბზარები შევსებულია გაზებით, სითხეებით, სხვა მინერალებითა და ქანებით, რაც განაპირობებს მათში მრავალ ფიზიკურ პროცესს განსხვავებულს მყარი ტანის ფიზიკისკლასიკური კანონებისაგან. ნახ.1.1-ზე ნაჩვენებია თიხნარის ნიმუშის  $10^4$ -ჯერ გადიდებული სურათი. ქანში ქვიშის ნაწილაკები ერთმანეთთან შეკავშირებულია თიხის კოლოიდური ნაწილაკების ჯაჭვით, შუალედები კი შევსებულია წყლით და აირით. სისტემა მთლიანობაში წარმოადგენს ჰელიუმის სტრუქტურას.



ნახ.1.1. თიხნარის შედგენილობა:1-ქვიშის ნაწილაკები, 2-თიხის ნაწილაკები, 3-კოლოიდური აგრეგატი კონსოლიდაციის დაბალი ხარისხით, 4-კოლოიდური აგრეგატი კონსოლიდაციის მაღალი ხარისხით.

ცალკე შევხვით ქვანახშირის შედგენილობისა და აღნაგობის ზოგიერთ თავისებურებას. ითვლება, რომ მისი ნახშირბადოვანი მდგენელი ტექსტურირებული გარემოა, ხოლო არანახშირბადოვანი მდგენელები (კვარცი, თიხოვანი მინერალები, პირიტი, კალციტი და სხვა) ნახშირში მინერალური ჩანართებისა და ელემენტ-ნარეკების სახით არიან წარმოდგენილი.

მინერალური კომპონენტების საერთო რაოდენობა ახასიათებს ნახშირის ნაცრიანობას. ნახშირის, როგორც ენერგეტიკული საწვავის ხარისხი მცირდება მისი ნაცრიანობის ზრდასთან ერთად. ნახშირის დაკოქსვის დროს, ნაცრიანობასთან ერთად, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს გოგირდის შემცველობას.

ზოგიერთ საწარმოო პროცესში ( მაგ.: ალიუმინის წარმოება, ელექტროდების კოქსის წარმოება და სხვა) მნიშვნელოვანია ნაცრის ქიმიური შემადგენლობა და ალუმინის ნაერთები არ ითვლებიან მავნე ნაერთებად.

წვის პროცესში მყოფი ნახშირის მასაში ნახშირბადის შემცველობა მეტამორფიზმის ხარისხზეა დამოკიდებული. მაგ.: მეტამორფიზებული გრძელაღიანი ნახშირები შეიცავენ 76–79% ნახშირბადს, ანტრაციტები კი 93–95%.

ნახშირების ნაცრიანობა ძალიან დიდ დიაპაზონში იცვლება და არ არის დამოკიდებული მეტამორფიზმის ხარისხზე. დონბასის გრძელაღიანი ნახშირებისა და ანტრაციტებისათვის ნაცრიანობა 14–16%-ია. ზოგიერთი ნახშირების ნაცრიანობა ბევრად მაღალია, მაგ.: ტყვარჩელის საბადოზე მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა 38%-ს აღწევს (საშუალოდ 28–30%), ხოლო ტყიბული–შაორის საბადოებზე 45% –ს (საშუალოდ 35%).

გოგირდის საერთო შემცველობა ნახშირებში რამდენიმე მეათედიდან 5–6%-მდე იცვლება. ტყვარჩელის საბადოზე მისი მნიშვნელობა, საშუალოდ 0,1–10% –ია, ხოლო ტყიბული–შაორის საბადოზე კი 1,1–5%.

## 1.2 ქანების კლასიფიკაცია

დღეს ქანების რამდენიმე კლასიფიკაცია არის გავრცელებული, რომელშიც მათი თვისებების ან პარამეტრების მიხედვით, ქანები დაყოფილია ჯგუფებად. ქანების თვისებებს და პარამეტრებს, როგორც აღვნიშნეთ, შინაგანი და გარეგანი ფაქტორები განსაზღვრავენ. შინაგანი ფაქტორები, თავის მხრივ (მინერალური შედგენილობა და აღნაგობა), ბევრად არიან დამოკიდებული წარმოშობის პირობებზე. წარმოშობის მიხედვით ქანები სამ დიდ ჯგუფად იყოფა, ესენია: მაგმური (გრანიტი, ლიპარიტი, კვარცპორფირი, დიორიტი, მარმარილო, ქვიშაქვები, ქვანახშირი და სხვა) და მეტამორფული (კვარცი, მარმარილო ფიქლები, თაბაშირი და სხვა) ქანები.

ერთნაირი წარმოშობის ქანებს ხშირად შეიძლება განსხვავებული მექანიკური თვისებები გააჩნდეთ, ამიტომ, მექანიკურ ველში მათი თვისებების შესწავლის დროს უფრო მიზანშეწონილია, კლასიფიკაციას საფუძვლად დაედოს მექანიკური ფაქტორი, კერძოდ, ცალკეულ ნაწილაკთა მარცვალთა შორის სტრუქტურული კავშირების ხასიათი. ამ თვალსაზრისით, ქანები შეიძლება დაიყოს ოთხ ძირითად ჯგუფად:

1. მაგარი კლდოვანი ქანები (კავშირი მარცვლებს შორის ხისტი ან დრეკადია).
2. თიხოვანი ქანები (ნაწილაკები შეკავშირებულია თიხოვანი მინერალებით, ხასიათდებიან პლასტიურობით).
3. წყალქანები (ნაწილაკთა შორის სივრცე ამოვსებულია წყლით).
4. ფხვიერი ქანები (ნაწილაკთა შორის კავშირები არ არსებობენ).

მაღალი წნევისა და ტემპერატურის გავლენით, მაგარმა შეიძლება პლასტიური თვისებები შეიძინოს, დაბალი ტემპერატურის დროს კი წყალქანებმა მაგარი ქანების თვისებები გამოამჟღავნოს და ა.შ. ამრიგად, ყოველი არსებული კლასიფიკაცია კერძო ხასიათს ატარებს და ვარგისია მხოლოდ რაიმე კონკრეტულ პირობებში, ქანების თვისებების განხილვის დროს. კერძო ხასიათს სხვა კლასიფიკაციას ჩვენ გავეცნობით ქანებზე სხვადასხვა ფიზიკური ველის ან ტექნოლოგიური ზემოქმედების შესწავლის დროს.

### 1.3 ქანთა მასივი და ქანების ნიმუში

ფიზიკური პარამეტრები, ქანის სხვადასხვა მოცულობაში, განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, ამიტომ მათი შესწავლის დროს იყენებენ ცნებებს „ქანების მასივი“ და „ქანის ნიმუში“.

გარკვეულ გეოლოგიურ პროცესში ფორმირებულ ქანთა ერთობლიობას, მათთვის დამახასიათებელი ფიზიკური და გეოლოგიური თავისებურებებით ქანების მასივი ეწოდება.

ცხადია, ქანები მასივში თავიანთ ბუნებრივ მდგომარეობაში იმყოფებიან.

ქანების მასივის მცირე მოცულობის იზოლირებულ ნაწილს **ქანის ნიმუშს უწოდებენ.**

ქანების თვისებათა განსხვავება მასივისა და ნიმუშს შორის ძირითადად განპირობებულია: მათი შედგენილობის სხვადასხვაობით (მასივი შეიძლება შედგენილი იყოს რამდენიმე ტიპის ქანით, რის გამოც ნიმუშისა და მასივის შედგენილობა სხვადასხვა იქნება);

აგებულების სხვადასხვაობით, მაგალითად: ნიმუშს შეიძლება არ ჰქონდეს შრეულობა და ბზარიანობა, მაშინ როდესაც ქანების მასივი, როგორც წესი, შრეულია და ბზარიანია.

ქვემოთ მოცემულია ქანების ზოგიერთი ფიზიკური მახასიათებლები მასივში და ნიმუშში (ცხრილი 1.1)



ცხრილი 1.1

ქანი	სიმტკიცის ზღვარი ნიმუშში, ნ <sup>ჰ</sup> , მპა.	სიმტკიცის ზღვარი მასივში, ნ <sup>ჰ</sup> , მპა.	ნ <sup>ჰ</sup> / <sub>ნ<sup>ჰ</sup></sub>
ნახშირი (კუზბასი)	17,0	4,4	3,9
ნახშირი (ვოლინსკი)	12,5	8,2	2,1

ქანის ნიმუშის შესწავლა წარმოადგენს შეგვიქმნის მის სტრუქტურაზე, ხოლო ქანის ტექსტურის დასადგენად საჭიროა ქანის მასივის განხილვა.

### 1.4 ქანების ფიზიკური თვისებების კლასიფიკაცია

ქანის ფიზიკური თვისება ეწოდება, მის საპასუხო რეაქციას გარკვეული ფიზიკური ველის ან გარემოს (ნივთიერების) ზემოქმედებაზე (დრეკადობა, სითბოგამტარიანობა, დიალექტიკული შეღწევადობა და სხვა).

ქანის თითოეული ფიზიკური თვისების რაოდენობრივ მხარეს, ერთი ან რამდენიმე პარამეტრი გვიჩვენებს.

შინაგანი ფაქტორებია ქანის მინერალური შედგენილობა და აღნაგობა.

გარეგან ფაქტორებში იგულისხმება ქანზე სხვადასხვა ფიზიკური და ნივთიერი ზომების ზემოქმედება.

ფიზიკური ველებიდან დღეს კარგად არის შესწავლილი – ქანზე მექანიკური, სიბური, ელექტრული, მაგნიტური და რადიაციული ველების ზემოქმედება; ნივთიერი ველებიდან კი – სითბეებისა და გაზებისა; თითოეულ ველში ქანის თვისებები შესაბამისი, ფიზიკური–ტექნიკური პარამეტრებით ხასიათდებიან. დღეს ასზე მეტი პარამეტრია ცნობილი.

სხვადასხვა ქანის თვისებების, ანალიზისა და კლასიფიკაციისათვის გამოყოფენ ფიზიკური ან მის საფუძველზე მიღებული ტექნიკური პარამეტრებით მიღებულ ჯგუფს. ამ ჯგუფში შემავალი პარამეტრების მინიმალურად აუცილებელი და საკმარისია ქანების, როგორც ფიზიკურ სხეულებისა და ტექნიკური ზემოქმედების ობიექტების დახასიათებისთვის. ასეთ პარამეტრს **ბაზური ფიზიკური პარამეტრი ეწოდებათ.**

ქანების ბაზურ ფიზიკურ პარამეტრებს მიეკუთვნებათ<sup>12</sup> ელემენტარული დამოუკიდებელი პარამეტრი: მოცულობითი მასა, ფორიანობა, სიმტკიცის ზღვარი შეკუმშვის დროს, თბოგამტარობის კოეფიციენტი, წრფივი თბური გაფართოების კოეფიციენტი, ხვედრითი ელექტრული წინაღობა, ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა და მაგნიტური შეღწევადობა. ისინი საწყის პარამეტრებს წარმოადგენენ და ქმნიან საფუძველს სხვა თვისებების შესასწავლად, ამიტომ მათი განსაზღვრა აუცილებელია ყველა ქანისათვის.

### 1.5 შიგა ფაქტორების გავლენა ქანების თვისებებზე

ქანების შედგენილობა მეტ - ნაკლებად განაპირობებენ მათ ფიზიკურ თვისებებს.

ქანების გარკვეული ნაწილის (მცირეფორებიანი, მკვრივი და ტოლმარცვლოვანი) სკალარული პარამეტრები შეიძლება გამოისახოს, როგორც მინერალური შედგენილობისა და სხვა მაჩვენებლების საშუალოშეწონილი არითმეტიკული ფუნქცია:

$$x_0 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot V_i \quad (1.1)$$

სადაც  $x_0$  ქანის ფიზიკური პარამეტრია;

$V_i$  არის  $x_i$  თვისებების მქონე მინერალის ან ქანის ფარდობითი შემცველობა.

თუ ცნობილია შემადგენელი მინერალების თვისებები და მათი შემცველობა, (1.1) ფორმულის დახმარებით შეიძლება საკმაო სიზუსტით ვიანგარიშოთ ქანის სიმკვრივე, ხვედრითი თბოტევადობა და სხვა მნიშვნელოვანი პარამეტრები.

(1.1) ფორმულის ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თუ შემადგენელი მინერალები მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან, მაშინ მათი სხვადასხვაგვარი თანაფარდობა ქანის თვისებებზე მნიშვნელოვან გავლენას ვერ მოახდენს. თუ ერთ-ერთი შემადგენელი მინერალი დანარჩენებისაგან მკვეთრად განსხვავდება, მაშინ მისი შემცველობა საგრძნობ გავლენას ახდენს ქანის თვისებებზე.

ქანის ტენზორულ პარამეტრებზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ძირითადი (რაოდენობრივად ყველაზე მეტი, ან ქანის მინერალურ ჩონჩხის ამგები) მინერალი.

დანალექი ქანების თვისებები ბევრადაა დამოკიდებული ცალკეულ ნაწილაკთა დამაკავშირებელი ცემენტის თვისებებზე. ამ უკანასკნელის სიმტკიცის გაზრდით იზრდება ქანის სიმტკიცეც.

თიხოვანი მინერალები ზრდიან ქანების პლასტიურობას, სკალარულისგან განსხვავებით, ქანების ტენზორული ფიზიკურ-ტექნიკური პარამეტრები მინერალურ შემადგენლობასთან ცალსახად არ არიან დაკავშირებული. ამ შემთხვევაში არსებული მნიშვნელობა აქვს ქანის აღნაგობასაც (ცალკეული ნაწილაკების ფორმას, ზომებს, ურთიერთგანლაგებას და სხვა).

მარცვლების ზომა სხვადასხვა პარამეტრზე სხვადასხვაგვარად მოქმედებს, მაგალითად: ქანების სიმტკიცე მარცვლების ზომების შემცირებასთან ერთად მატულობს, თბოგამტარობა და ელექტროგამტარობა კი მცირდება.

მინერალური მარცვლების ფორმა და ზომები, როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ, გვიჩვენებენ ერთგვაროვანია თუ არა ქანი, მათი ურთიერთგანლაგება და ორიენტაცია კი განსაზღვრავს ქანის შრეულობას და, შესაბამისად, მის ანიზოტროპიულობას.

შრეული (ნაწილაკი და მეტამორფული) ქანებისათვის დამახასიათებელია ორთოტროპია, ანუ ანიზოტროპიის ორი სიბრტყე. ასეთი ქანები და ფენების პარალელურ და პერპენდიკულარულ მიმართულებაზე, როგორც წესი, საკმაოდ განსხვავებული თვისებებით ხასიათდებიან.

შრეული ქანის ანიზოტროპიულობას ახასიათებენ ანიზოტროპიულობის კოეფიციენტით, და გამოითვლიან შემდეგი ფორმულით:

$$k_s = \frac{X_{\parallel}}{X_{\perp}}, \quad (1.2)$$

სადაც  $X_{\parallel}$ - პარამეტრების მნიშვნელობაა დაფენების მიმართულებით.

$X_{\perp}$ - პარამეტრის მნიშვნელობა დაფენების პერპენდიკულარული მიმართულებით.

ცხადია, სხვადასხვა ფიზიკურ ველში სხვადასხვა პარამეტრისთვის  $k_s$ -ს მნიშვნელობა სხვადასხვა იქნება, მაგალითად, ქანის სიმტკიცისათვის  $k_s < 1$ , ხოლო თბოგამტარისათვის და ელექტროგამტარისათვის  $k_s > 1$ .

ქანების ფიზიკურ პარამეტრებზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ფორიანობა.

მშრალი ფორიანი ქანი შედგება მინერალური ჩონჩხისგან და ფორებში მოთავსებული გაზებისგან. გაზები ცუდად ატარებენ ენერგიას (ელექტრულს, სითბურს, მექანიკურს) მაშინ როცა ნივთიერებისკარგი გამტარები არიან. ამიტომ, რომ ტენზორული პარამეტრების უმრავლესობა, ჰიდრავლიკურისა და გაზოდინამიკურის გამოკვლებით ფორიანობის გაზრდასთან ერთად მცირდებიან. ასეთ ტენზორულ პარამეტრებსა X და ფორიანობის P-ს დამოკიდებულება შეიძლება გამოისახოს შემდეგი ფორმულით:

$$X = X_0(1 - P)^2, \quad (1.3)$$

სადაც  $X_0$  - ქანის პარამეტრების მნიშვნელობაა, როცა  $P=0$ .

ფორმულა (1.3) გვიჩვენებს რომ, რაც უფრო მეტია  $X_0$ -ის მნიშვნელობა მით უფრო მეტად არის დამოკიდებული პარამეტრი ფორიანობაზე. ქანების პარამეტრების (1.1),(1.2),(1.3) სახით ჩაწერა და სხვა ანალოგიური დამოკიდებულებები, საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ სხვადასხვა ქანის ძირითადი თვისებები, თუ ცნობილია მისი შემადგენლობა და აღნაგობა.

## 1.6 გარე ფაქტორების გავლენა ქანის თვისებებზე

გარეგანი ფაქტორების ზემოქმედების დროს ქანებში სხვადასხვა ფიზიკური პროცესები მიმდინარეობენ. ქანისა და ფიზიკური ნივთიერი ველის ურთიერთქმედების შედეგად ქანის შედგენილობის, აღნაგობის ან მდგომარეობის ცვლილებას, ქანში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები ეწოდებათ.

ქანის ფიზიკური პარამეტრები, რომლებიც ამ პროცესებს ახასიათებენ, შეიძლება დავყოთ სამ ძირითად ჯგუფად:

- 1) პარამეტრები, რომლებიც ახასიათებენ შექცევად პროცესებს;
- 2) პარამეტრები, რომლებიც ახასიათებენ შეუქცევად პროცესებს;
- 3) პარამეტრები, რომელიც ახასიათებენ ენერგიის ან ნივთიერების გატარების პროცესს;

მექანიკური ველის (დატვირთვის, წნევის) ქანზე ზემოქმედების შედეგად, იცვლება ამ უკანასკნელის სიმკვრივე, ფორიანობა, მარცვალთა საკონტაქტო ფართობი და სხვა, რის შედეგად იცვლება ქანის ფიზიკური პარამეტრები. მაგალითად, ქანის ყოველმხრივი

შეკუმშვის შედეგად, იზრდება მისი სიმტკიცე, დრეკადობა და სითბოგამტარობა; მცირდება სითბო ტევადობა, სითხეებისა და ქანებისა და გაზების შეღწევადობა.

სითბური ველის ზემოქმედების შედეგად იცვლება ქანის ტემპერატურა და, შესაბამისად, კრისტალურ მესერში ნაწილაკთა რხევის ამპლიტუდა და ურთიერთკავშირის ძალები; მაგალითად, ტემპერატურის აწევა იწვევს ამ ძალების სიდიდის შემცირებას აადვილებს მესერის კვანძებიდან იონების მოწყვეტას. ცალკეული მინერალის განსხვავებული სითბური გაფართოების გამო ქანში რჩება შიგა თერმული ძალები ე.ი. აღიძვრება მექანიკური ველი.

ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად ხდება ქანის შემადგენელი მინერალთა ნაწილაკების ელექტრული და მაგნიტური ორიენტაცია: პოლარიზაცია და მაგნიტება. ყოველივე ეს იწვევს მისი სითბური და მექანიკური პარამეტრების ცვლილებას.

ქანის თვისებებზე ნივთიერი ველის გავლენა შეიძლება ორგვარი იყოს:

1. ქანში შეღწეული ნივთიერება შეიძლება გახდეს მისი შემადგენელი ნაწილი;
2. აქტიურმა ფიზიკურმა და ქიმიურმა ნივთიერებამ შეიძლება ზემოქმედება მოახდინოს მინერალურ ჩონჩხზე.

ორთავე შემთხვევაში ქანის ქანის თვისებები შეიძლება სხვადასხვა მიმართულებით შეიცვალოს.

ესეა თუ ის ფიზიკური ან ნივთიერი ველი შეიძლება იყოს ბუნებრივი და ხელოვნური წარმოშობის.

ბუნებრივი ველები - თანდაყოლილი ველებია, რომელთა ზემოქმედებასაც განიცდიან ქანების ფორმირების პროცესში. ასეთ ველებს მიეკუთვნებათ სიმძიმის ველი, სითბური ველი, რადიაციული ველი და სხვა.

ხელოვნური ველები - ადამიანის საქმიანობის შედეგად შექმნილი ველებია; ისინი შეიძლება გაჩნდნენ თავისთავად, სამთო სამუშაოების წარმოების დროს (მოხეტიალე ელექტრული დენი, ბურღვის დროს ჭაბურღილის სანგრევში ტემპერატურის აწევა, აფეთქების შედეგად ქანების მასივზე მოქმედი დინამიური დატვირთვები და სხვა) ან შექმნათ სპეციალურად ქანების თვისებებისა და მდგომარეობის მიზანდასახულად

შესაცვლელად (გვირაბის ირგვლივ ბზარიანი ქანიების ცემენტირება, მათი გაყინვა, გაყინვის სპეციალური ხერხის გამოყენების დროს, ქანის მასივში დრეკადი ტალღების ხელოვნურად აღძრა, მათი გამოკვლევების მიზნით და სხვა).

ხელოვნური ფიზიკური ან ნივთიერი ველის ზემოქმედებით ხშირად შეიძლება ისე ვმართოთ ქანების მდგომარეობა, მათი ფიზიკური თვისებები და პარამეტრები, რომ მნიშვნელოვნად გავზარდოთ სამთო წარმოების ეფექტურობა.

### 1.7. ქანების ფიზიკური მახასიათებლების განსაზღვრა

ქანების ფიზიკური პარამეტრების განსაზღვრის ცნობილი მეთოდები შეიძლება დაიყოს ორ ძირითად ჯგუფად: თეორიულ და ექსპერიმენტულ მეთოდად. თეორიული მეთოდები ემყარებიან ქანის თვისებების კანონზომიერებებს და სპეციალური ექსპერიმენტის ჩატარების გარეშე, იძლევიან ფიზიკური პარამეტრების ანგარიშით დადგენის საშუალებას.

ექსპერიმენტარული მეთოდი საშუალებას გვაძლევს, სპეციალური ექსპერიმენტის ჩატარების შედეგად, დავადგინოთ ამა თუ იმ პარამეტრების მნიშვნელობა. ისინი იყოფიან ლაბორატორიულ და ნატურალურ მეთოდებად. ლაბორატორიული მეთოდების დახმარებით, ფიზიკურ პარამეტრებს ადგენენ ლაბორატორულ პირობებში, ქანის ნიმუშების გამოცდის შედეგად. ზომების მიხედვით ნიმუშები შეიძლება იყოს: მცირე (1 სმ<sup>3</sup> - მოცულობით), საშუალო (1-200 სმ<sup>3</sup>. მოცულობით ) და დიდი (200-სმ<sup>3</sup>. მოცულობით). დამუშავების ხარისხის მიხედვით ნიმუშები შეიძლება იყოს: სწორი (პრიზმული, ცილინდრული და სხვა, როდესაც დამუშავებულია ნიმუშის ზედაპირის ნაწილი) და არასწორი (ქანის დამუშავებული ნატეხები) ფორმის.

ნატურალური მეთოდების დახმარებით, ქანების პარამეტრებს ადგენენ უშუალოდ ბუნებრივ პირობებში. ისინი, როგორც წესი, გამოიყენებიან ქანების მასივის შესასწავლად.

ქანის ნიმუშისა და მასივს შორის, თვისებათა განსხვავების გამომწვევი ფაქტორების შესწავლის საფუძველზე, დღეს შექმნილია მეთოდები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს ვიანგარიშოთ მასივის პარამეტრები, თუ ცნობილია მათი მნიშვნელობები

ნიმუშისათვის. ყოველივე ამის გამო ლაბორატორიულმა მეთოდებმა უფრო დიდი პრაქტიკული გავრცელება პოვეს.

ექსპერიმენტისათვის საჭირო ნიმუშების აღების ადგილი ისე უნდა შეირჩეს, რომ ქანის შემადგენლობა და აღნაგობა მოცემული მასისთვის ტიპური იყოს.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ქანების ფიზიკური პარამეტრების მნიშვნელობათა ზუსტად დადგენა შეუძლებელია. იმის გამო, რომ ყოველივე კონკრეტული ქანის შედგენილობა და აღნაგობა, გარკვეულ ფარგლებში, იცვლება, მათი პარამეტრების მნიშვნელობაც, შესაბამისად, ცვლილებას განიცდიან. ამ ცვლილებას ვარიაციული ხასიათი აქვს. ამიტომაც, რომ ქანის თითოეული პარამეტრის მნიშვნელობის დასადგენად საჭიროა რამდენიმე ნიმუშის ექსპერიმენტალური გამოცდა. მიღებული შედეგების დამუშავება ხდება მათემატიკური სტატისტიკისა და აღნაგობის თეორიის მეთოდებით.

თუ ქანის რომელიმე პარამეტრი განისაზღვრა ნიმუშზე, მაშინ, გაზომვის შედეგების ნორმალური განაწილების შემთხვევაში, პარამეტრების ქეშმარიტ მნიშვნელობასთან ყველაზე ახლოს იქნება  $X_1$ -ს საშუალო არითმეტიკული ე.ი. შეიძლება დავწეროთ:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (1.4)$$

ამის შემდეგ ანგარიშობენ შეცდომას, ერთეულოვანი შედეგის საშუალო კვადრატულ გადახრას:

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X - X_n)^2} \quad (1.5)$$

და ვარიაციის კოეფიციენტს, ანუ გაზომვის შედეგების საშუალო ფარდობითი გადახრას საშუალო არითმეტიკულისგან:

$$K = \frac{S_n}{X} \cdot 100\% . \quad (1.6)$$

გაზომვის შედეგების აბსოლუტური ცდომილების საზღვარი (სარწმუნო ინტერვალი),

$$\Delta X = t(a) \frac{S_n}{\sqrt{n}} , \quad (1.7)$$

სადაც  $t(a)$  კოეფიციენტია, რომელიც დამოკიდებულია საჭირო სარწმუნო ალბათობაზე  $a$ -ზე (თუ  $a = 0.95$  მაშინ  $t(a) = 1.96$ , თუ  $a = 0.99$  მაშინ  $t(a) = 2.58$ , თუ  $a = 0.999$  მაშინ  $t(a) = 3.29$ ).

(1.7) ფორმულიდან შეიძლება განვსაზღვროთ ნიმუშების საჭირო რაოდენობა ისე, რომ უზრუნველყოთ შეცდომა არაუმეტეს  $\xi = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%$ , თუ ცნობილია შესასწავლი პარამეტრის ვარიაციის კოეფიციენტის  $K$  -ს მნიშვნელობა:

$$n = \left( \frac{t(a) \cdot K}{\xi} \right)^2. \quad (1.8).$$

მაგალითად, გვსურს დავადგინოთ ქანის სიმტკიცის ზღვარი ღერძის კუმშვაზე  $[\sigma_3]$ . თუ ვარიაციის კოეფიციენტს ავიღებთ 20%, ხოლო  $\xi=15\%$  და  $a=0.95$ , მაშინ (1.8) ფორმულიდან მივიღებთ, ნიმუშების საჭირო რაოდენობას  $n=7$ , ვთქვათ, შვიდი გაზომვის საშუალო არითმეტიკული (1.4) ტოლია  $X=20$  მპა, მაშინ (1.7) ფორმულიდან სარწმუნო ინტერვალი  $\Delta X=3$ . ექსპლოატაციის საბოლოო შედეგი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

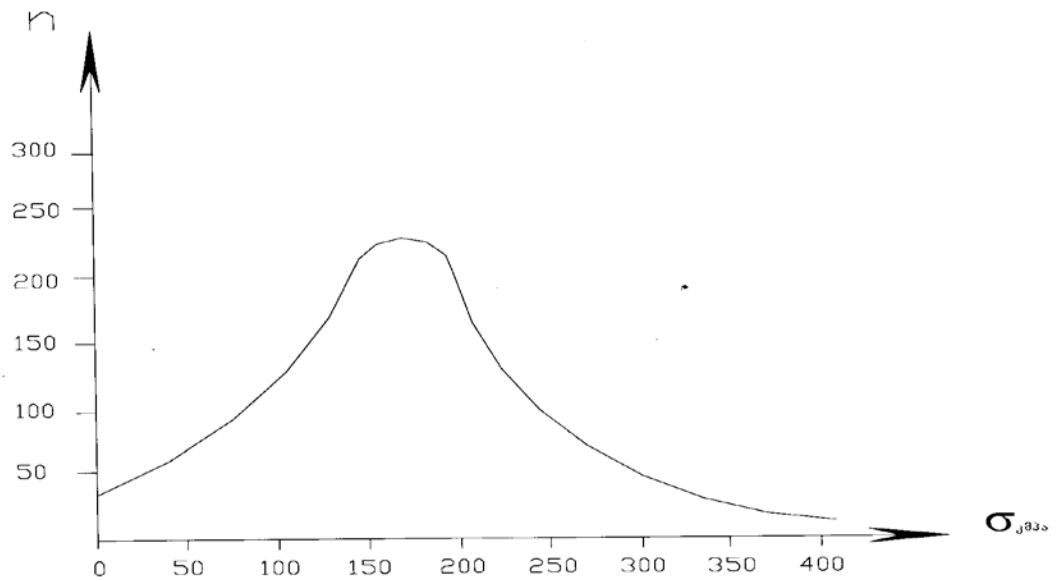
$$[\sigma_3] = (20 \pm 3) \text{ მპა, როცა } a=0.95.$$

ჩანაწერი გვიჩვენებს, რომ ჩვენ შემთხვევაში, სიმტკიცის ზღვრის მნიშვნელობა ტოლია 20-ის ( $[\sigma_3]=X$ ), ხოლო, მისი გადახრა საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობიდან შემთხვევათა 95% -ის დროს არ აჭარბებს 3-ს ( $\Delta X$ ).

პარამეტრების ცვალებადობას უფრო თვალსაჩინოდ გამოხატავენ ვარიაციული მრუდები.

ვარიაციული მრუდების მისაღებად საჭიროა აბცისთა ღერძზე გადავზომოთ ფიზიკური პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობები, ხოლო ორდინატთა ღერძზე ნიმუშის რაოდენობა. ნახ.1.2-ზე ნაჩვენებია ერთღერძა კუმშვაზე, სიმტკიცის ზღვრის ცვლილების ვარიაციული მრუდი, არგელიტისათვის





ნახ.1.2

## 2. ქანების სიმკვრივის თვისებები

### 2.1. ქანების ფორიანობა

ქანების მინერალურ ნაწილაკებს ან მათ აგრეგატებს შორის მოთავსებულ სიცარიელეთაერთიანობა ქმნის ფორიანობას. საერთოფორიანობის სიდიდე რიცხობრივად გამოისახება ქანების საერთო ფორიანობის მაჩვენებლით  $P$ . ის გვიჩვენებს ქანში ფორების ფარდობით შემცველობას და, როგორც წესი, გამოისახება პროცენტებში:

$$P = \frac{V_{\text{ფ}}}{(V_{\text{ფ}} + V_0)} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

სადაც  $V_{\text{ფ}}$ —ფორების ჯამური მოცულობაა, ხოლო  $V_0$ —მინერალური ჩონჩხის მოცულობა.

ფორების მოცულობის შეფარდებას მინერალური ჩონჩხის მოცულობასთან ფორიანობის კოეფიციენტი  $-K_{\text{ფ}}$  ეწოდება:

$$K_{\text{ფ}} = \frac{V_{\text{ფ}}}{V_0} \quad (2.2)$$

კავშირი ქანების ფორიანობასა და ფორიანობის კოეფიციენტს შორის გამოისახება ფორმულით:

$$P = \frac{K_{ფ}}{(1+K_{ფ})} \quad (2.3)$$

ქანებში არსებული ფორები წარმოშობით იყოფიან პირველად, ქანის ფორმირებისას გაჩენილ და მეორად, მეტამორფიზმის, გამოტუტვის, კრისტალიზაციის და სხვა პროცესების შედეგად.

ზომების მიხედვით ფორები იყოფიან სუბკაპილარულ (სიცარიელების დიამეტრი 0,2 მიკრომეტრზე ნაკლებია), კაპილარულ (0,2–100 მკმ) და ზეკაპილარულ (100 მკმ–ზე მეტი) ფორებად. ქანებში არსებულ ისეთ სიცარიელებს, როგორებიც არიან ბზარები და კავერნები განვიხილავთ ცალკე.

ფორმის მიხედვით განასხვავებენ სხვადასხვა ტიპის ფორებს: მარცვალთშორისი ფორები, არხისებური, ხველისებური, ბუმტისებრი, ტოტისებრი და სხვა.

ფორები ხშირად ქმნიან უწყვეტ დაკლაკნილ არხებს, უერთდებიან რა ერთმანეთს და გამოდიან ქანის ზედაპირზე. ქანში არსებული ყველა ასეთი ფორების საერთო მოცულობის შეფარდებას ქანის მოცულობასთან ღია (ეფექტური) ფორიანობა- $P_{ფ}$  ეწოდება. აღსანიშნავია, რომ  $P_{ფ} < P$ .

ქანების ფორიანობა დიდ დიაპაზონში იცვლება; არიან პრაქტიკულად უფორო ქანები და არიან ქანები რომელთა ფორიანობა 90%-ს აღწევს. მაღალი ფორიანობით ხასიათდებიან დანალექი ქანები; მაგმური ქანები კი უმნიშვნელო ფორიანობით გამოირჩევიან. გამონაკლისს წარმოადგენენ გამოფიტული მაგმური ქანები, ტუფოლავეები და ტრაქიტები (ამ უკანასკნელთათვის  $P = 55-60\%$ ).

დიდი დატვირთვის ზემოქმედების შედეგად, ქანებში ფორიანობა მცირდება. ხდება მყარი ჩონჩხის ნაწილების ურთიერთგადაადგილება, გაზების გამოწნევა და, საბოლოოდ, ქანის შემკვრივება. ამიტომ, რომ დიდ სიღმეებზე განლაგებული ქანები დაბალი ფორიანობით გამოირჩევიან.

ქანების მინერალურ შედგენილობასა და აღნაგობას განსაზღვრავს მათი გენეზისი და გარე ფაქტორების ზემოქმედება (დედამიწის ქერქის გადაადგილებები, ქარისა და წყლის ზემოქმედება, წნევა, ტემპერატურული ცვლილებები) მათი არსებობის მთელ პერიოდში. წარმოშობის მიხედვით ქანები სამ დიდ ჯგუფად იყოფა, ესენია: **მაგმური, დანალექი და მეტამორფული** ქანები.

მაგმური ქანები (გრანიტი, ლიპარიტი, კვარცპორფირი, დიორიტი, ანდეზიტი, გაბრო, დიაბაზი, ბაზალტი და სხვა) პირველადი ქანებია და მაგმის გაცივების შედეგად წარმოიშობილნი;

დანალექი ქანები (კირქვები, მარმარილო, ქვიშაქვები, ქვანახშირი და სხვა) მაგმური ან მეტამორფული ქანების რღვევის პროდუქტთა მექანიკური, ქიმიური ან ორგანული დალექვის შედეგად ჩამოყალიბდნენ;

მეტამორფული ქანები (კვარცი, კრისტალური ფიქალი, მარმარილო, გნეისი და სხვა) მაგმური და დანალექი ქანების გარდაქმნის შედეგად არიან წარმოშობილნი.

ქანების გენეზისი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მის მინერალურ შედგენილობაზე. მაგალითად, მაგმური ქანებისათვის დამახასიათებელია ლეიციტი, ნეფელინი, ანორთოკლაზი; დანალექი ქანებისათვის – კალციტი, თაბაშირი, დოლომიტი, ჰალოიდური ნაერთები, კაოლინიტი და სხვა; მეტამორფული ქანებისათვის – გრანატი, ტალკი, სერპენტინი და სხვა.

ქანების წარმოშობის პირობები, ასევე, ახდენს გავლენას მის ალნაგობაზე. მაგალითად, მაგმური ქანის კრისტალთა სიმსხო, მათი ფორმა, მინისებრი მასის არსებობა განპირობებულია მაგმის გამკვრივების სიჩქარითა და წნევით. დანალექ ქანებში დალექვის პირობები და შემდგომი ცვლილებები განსაზღვრავს შრეობრიობას (რაც პრაქტიკულად გამორიცხულია მაგმური ქანებისათვის), ფორიანობას, ნამტვრევი მასალის ცემენტაციის ხასიათსა და ხარისხს და სხვა. მეტამორფულ ქანებში ცხელი ხსნარების შედგენილობა – ტემპერატურა, წნევა, მისი სიდიდე და ზემოქმედების ხასიათი განსაზღვრავს ქანის მეტამორფიზმის ხარისხს, მისი გადაკრისტალებისა და ალნაგობის პარამეტრებს.

## 2.2. ქანების სიმკვრივე

ქანის მყარი ფაზის (მინერალური ჩონჩხის) ერთეული მოცულობის მასას სიმკვრივე  $\rho$  (კგ/მ<sup>3</sup>) ეწოდება:

$$\rho = m/V_0.$$

სადაც  $m$  – ქანის მასაა.

ქანების სიმკვრივეს მისი შემადგენელი მინერალების სიმკვრივე  $\rho$  განისაზღვრავს, მისი მნიშვნელობა შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i,$$

სადაც  $n$  – ქანის შემადგენელი მინერალების რაოდენობა,  $V_i$  – თითოეული მინერალის მიერ დაკავებული მოცულობის წილი.

მინერალების სიმკვრივე მათი ქიმიური შემადგენლობასა და სტრუქტურაზეა დამოკიდებული. სიმკვრივის მიხედვით განასხვავებენ მძიმე ( $\rho > 4 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>), საშუალო ( $\rho = (4-2,5) \cdot 10^3$  და მსუბუქ ( $\rho < 2,5 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>) მინერალებს.

ერთეული მოცულობა შევსებული ქანით (მისი მყარი ფაზით) და ბუნებრივ მდგომარეობაში არსებული ქანის ერთეული მოცულობა მასებით განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, რაც ქანის ფორიანობითაა გამოწვეული; ამიტომ სამთო საქმეში სიმკვრივესთან ერთად ფართოდ გამოიყენება მოცულობითი მასის მცნება. ბუნებრივ მდგომარეობაში, ერთეულ მოცულობაში არსებული ქანის მასას **მოცულობითი მასა**  $\rho^*$  (კგ/მ<sup>3</sup>) ეწოდება:

$$\rho^* = m / V.$$

სადაც  $V = V_0 + V_{\text{ფ}}$  – ქანის სრული მოცულობაა ბუნებრივ მდგომარეობაში.

ქანების სიმკვრივე ყოველთვის აღემატება მათ მოცულობით მასას.

მოცულობით მასასა და სიმკვრივეს შორის კავშირი გამოისახება ფორიანობის კოეფიციენტის დახმარებით :

$$\rho = \rho^* (1 + k_{\text{ფ}}).$$

ქანების დიდი ნაწილისათვის მოცულობითი მასა ( $1,5 \cdot 10^3 - 3,5 \cdot 10^3$ ) კგ/მ<sup>3</sup> – ის ფარგლებში იცვლება. დიდი მოცულობითი მასით გამოირჩევიან მადნები, რადგან მათ შემადგენლობაში დიდი რაოდენობით შედიან მძიმე მინერალები – გემატიტი,

მაგნეტიტი, სიდერიტი, კინოვარი. დაბალი მოცულობითი მასა აქვთ ჰიდროქსიდურ ნალექებს გიფსსა ( $2,3 \cdot 10^3 \text{კგ/მ}^3$ ) და ქვამარილს ( $2,1 \cdot 10^3 \text{კგ/მ}^3$ ). კიდევ უფრო დაბალია ნახშირისა და ტორფის მოცულობითი მასები ( $0,7-2,0 \text{კგ/მ}^3$ ). რაც მეტია მინერალური მინარევები და ნაცრიანობა მით მეტია ნახშირების მოცულობითი მასა.

ქანის მყარი ფაზის (მინერალური ჩონჩხის) ერთეული მოცულობის წონას **ხვედრითი წონა** ( $\gamma/\text{მ}^3$ ) ეწოდება:

$$\gamma = mg/V_0 = \rho g,$$

სადაც  $g$  – თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა.

ერთეული მოცულობის ქანის წონას, ბუნებრივ მდგომარეობაში, (მინერალური ჩონჩხის, ფორებისა და მათი შემავსებელი სითხეებისა და აირების ჩათვლით) **მოცულობითი წონა**  $\gamma^*$  ( $\text{კგ/მ}^3$ ) ეწოდება:

$$\gamma^* = mg/V = \rho g.$$

მინარალების კუთრი წონა, პრაქტიკულად, მათი მოცულობითი წონის ტოლია, რადგან მინარალთა ფორიანობა უმნიშვნელოა. ქანის კუთრი წონა ყოველთვის მეტია მის მოცულობით წონაზე.

### 2.3. ქანების ბზარიანობა

ფორების გარდა ქანში გვხვდება სიცარიელები ბზარების სახითაც. ქანის მთლიანობის რღვევის ადგილს, რომლის გახსნის სიდიდეც ერთი რიგით და მეტად აღემატება კრისტალურ მესერში ატომთა შორის მანძილს ( $10^{-10} \text{მ}$ ) **ბზარი** ეწოდება.

გახსნის სიდიდის მიხედვით გამოყოფენ სამი რიგის ბზარებს.

პირველი რიგის ბზარების გახსნის სიდიდე  $10^{-9} - 10^{-5} \text{მ}$ -ია. ისინი კრისტალის შიგა ბზარებს წარმოადგენენ და ცალკეული კრისტალების წარმოქმნისა და განვითარების პროცესებით არიან განპირობებულნი. თავისი ზომებით ისინი ახლოს არიან მინერალების კრისტალური მესრების დეფექტებთან.

მეორე რიგის ბზარების გახსნის სიდიდე  $0,1 \text{მმ}$  და მეტია. ისინი კრისტალებს შორის და მათ შემაკავშირებელ ცემენტში განლაგებული ბზარებია. მათი ზომები კრისტალების ზომების რიგისაა.

პიველი და მეორე რიგის ბზარები, ძირითადად, ნალექების დიაგენეზისა და მაგმის კრისტალიზაციის პროცესში იხსნებიან. მათთვის დამახასიათებელია ქაოტური ორიენტაცია. ისინი (განსაკუთრებით მეორე რიგის ბზარები) განსაზღვრავენ ქანის წინააღმდეგობას ბურღვის, ექსკავატორებითა და კომბაინებით ქანის მონგრევისა და სამსხვრეველში მისი დაქუცმაცების პროცესებს.

მესამე რიგის ბზარები ქანების მეტამორფიზმის პროცესში არიან წარმოშობილი, წყლისა აქროლადი ნივთიერებების დაკარგვის, გაცივებისა და მოცულობის შემცირების შედეგად. კლივაჟის ბზარები და ტექტონიკური ძალების ზემოქმედების შედეგად გამოწვეული ბზარები, ასევე, განეკუთვნებიან მესამე რიგის ბზარებს. ტექტონიკური ზარები ჩვეულებრივ წარმოადგენენ მკვეთრად გამოხატულ, ორ ურთიერთპერპენდიკულარულ, ციცაბოდმვარდნ ბზართა სისტემას. ამავე რიგის ბზარებს განეკუთვნებიან სამთო სამუშაოებით გამოწვეული ხელოვნური ბზარები. აღნიშნულ ბზარებს ქანთა გაშიშვლებისას ემატებათ გამოფიტვის ბზარები, ისინი 2-დან 5 მეტრამდე სიღრმეზე ვრცელდებიან.

მესამე რიგის ბზარებს სხვადასხვა სიგრძე აქვთ. ეს უკანასკნელი ხშირად სანტიმეტრობით, მეტრობით და კილომეტრობითაც კი იზომება.

გამოვლენის ხასიათის მიხედვით, აღნიშნული ბზარები იყოფიან ღია, დახურულ და ფარულ ბზარებად. ისინი, ფორების ანალოგიურად, შეიძლება იყვნენ ცარიელნი ან შევსებულნი სხვა ქანებით, გამოფიტვის პროდუქტებით, წყლით და ნავთობით.

მესამე რიგის ბზარების თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ ურთიერთგადაკვეთისას ყოფენ ქანებს მეტნაკლებად სწორი ფორმის ნაწილებად. ცალკეული ნაწილების ფორმა და ზომები, დიდ ფარგლებში, იცვლება და დამოკიდებულია ბზართა სისტემების რაოდენობაზე, ბზარების მიმართულებებსა და ფენების ჩაწოლის პარამეტრებზე. ეს ბზარები არსებით გავლენას ახდენენ ქანის მონგრევის, გაფხვიერების, დაძვრის, დამეწყვრის და ჩამოქცევის პროცესებზე.

### 3. ქანების ჰიდრო და აეროდინამიკური თვისებები

როგორც ზემოთ ავლინებით, ქანები ჰეტეროგენული, მრავალკომპონენტური სხეულები არიან. მათში ფორებისა და ბზარების სახით არსებული სიცარიელები, როგორც წესი, სხვადასხვა აირებითა და სითხეებითაა შევსებული. ეს უკანასკნელნი სხვა მინერალურ კომპონენტებთან ერთად განსაზღვრავენ ქანის თვისებებს. ამ თვისებების ფორმირებაში კი წყალს მნიშვნელოვანი როლი აკისრია.

#### 3.1. სითხეები და გაზები ქანებში

ქანში ყოველთვის მოიპოვება გარკვეული რაოდენობის წყალი. ქანში არსებული წყალი შეიძლება დავყოთ—ქიმიურად ბმულ, ფიზიკურად ბმულ და თავისუფალ წყლად.

**ქიმიურად ბმული წყალი**, მინერალების სხვა მოლეკულებთან და იონებთან ერთად, ქმნის კრისტალურ მესერს. ასეთი წყლის მოშორება მხოლოდ მაღალ ტემპერატურაზე ქანის გახურებითაა შესაძლებელი. წყლის მოშორება, როგორც წესი, იწვევს მინერალის კრისტალური მესრის დაშლას, რის შედეგადაც ქანი სუსტდება და ირღვევა.

თუ ქიმიურად ბმული წყალი კრისტალურ მესერში მოლეკულების სახითაა მას **კრისტალიზაციის** წყალს უწოდებენ. ასეთი წყალი გვხვდება თაბაშირში ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ოპალში ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), კარნალიტში ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) და მრავალ სხვა მინერალში. კრისტალიზაციის წყლის მოცილება ქანიდან, როგორც წესი,  $200\text{--}600^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე ხდება. გახურების დროს კრისტალური მესრის ჰიდროქსილური იონებისაგან ( $\text{OH}^-$  და  $\text{OH}^+$ ) წარმოქმნილ წყალს **კონსტიტუციურ** წყალს უწოდებენ. იგი დამახასიათებელია ტალკის ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_2 \cdot \text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), მალაქიტის ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ), კაოლინიტისა ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4 \cdot \text{Si}_2\text{O}_5$ ) და სხვა მინერალებისათვის. კონსტიტუციური წყლის მოცილების ტემპერატურა უფრო მაღალია ვიდრე კრისტალიზაციის და  $1\ 300^\circ\text{C}$  – მდე აღწევს.

**ფიზიკურად ბმული წყალი** აფსკის სახითაა შემოვლებული ქანის მყარ ნაწილაკებზე და მიზიდულობის მოლეკულური ძალებითაა მათთან დაკავშირებული. წყლის რაოდენობა დამოკიდებულია ქანის დასველების უნარზე – სველებადობაზე.

ქანის სველებადობა მისი თხიერი აბსკით დაფარვის უნარია და წვეთის მიმართ, მისი ქანთან შეხების წერტილიდან გავლებული მხების ქანის სიბრტყესთან, შედგენილი კუთხის ზღვრული მნიშვნელობით ხასიათდება.

ქანის სველებადობა განპირობებულია ელექტროსტატიკური მიზიდულობის ან ქიმიური ბუნების ძალებით ზედაპირზე სითხის მოლეკულების კონცენტრაციის – ადსორბციულობის უნარით.

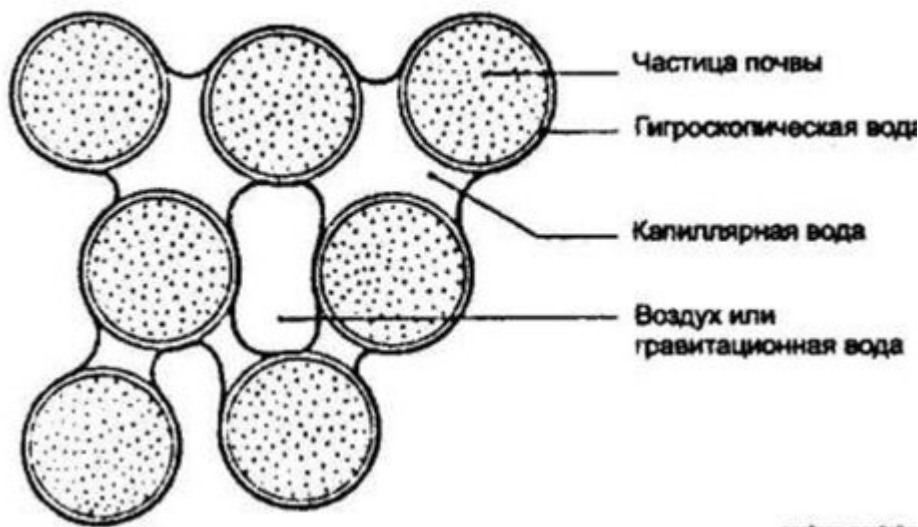
ქანების უმრავლესობა კარგი სველებადობით ხასიათდება. მათ ჰიდროფილურ ქანებს უწოდებენ. ნაწილობრივ ან სრულიად არასველებადია გოგირდი, ქვანახშირები, ბითუმოვანი ქვიშაქვები და ზოგიერთი სხვა ქანი. მათ ჰიდროფობურ ქანებს უწოდებენ.

ქანების ადსორბციულობის უნარი მატულობს ხსნადი მარილებისა და თიხოვანი მინერალების შემცველობის მომატებით, აგრეთვე, მყარი ფაზის კუთრი ზედაპირის გადიდებით. ფხვიერი ქანების შემთხვევაში რაც ნაკლებია ნაწილაკების ზომა და მეტია მათი კუთხოვანება – მეტია ადსორბციულობის უნარი.

ატმოსფეროს გარკვეული ტენიანობის დროს, როდესაც წყლის ორთქლის დრეკადობა მცირეა, მისი მოლეკულები ადსორბირდება ქანის მყარი ნაწილაკების ზედაპირზე და იქმნება წყლის აპკის ერთი ფენა. ტენიანობის მატება, რამდენიმე ათეულ პროცენტამდე, იწვევს პოლიმერულ ადსორბციას – წყლის მოლეკულები უერთდება პირველი ფენის მოლეკულებს ე.წ. წყალბადური ბმით. ამ პოლიმერულ აპკს, რომელსაც მჭიდროდ ბმულ წყალს უწოდებენ, ჩვეულებრივ წყალთან შედარებით განსხვავებული თვისებები ახასიათებს. მჭიდროდ ბმული წყალი მყარი სხეულებისათვის დამახასიათებელ ზოგიერთ თვისებას ამჟღავნებს. მას აქვს გარკვეული დრეკადობა (ძვრის მოდული), ის არ ხსნის ელექტროლიტებს, ამიტომ, მისი ელექტროგამტარობა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ჩვეულებრივი წყლისა, ასემცირებულია დიელექტრიკული შეღწევადობა და შეცვლილია სითბოგამტარობაც. მისი სიმკვრივე 1,74გ/სმ<sup>3</sup>-მდე აღწევს. ხასიათდება გაყინვისუფრო დაბალი ტემპერატურით (-78° C). ის არ ითვლება გამხსნელად. ამ წყალის ქანიდან მოცილება მხოლოდ 105 –110°C –მდე გახურებითაა შესაძლებელი.



ტენიანობის ზრდა, დაახლოებით 80%-მდე, იწვევს სუსტად ბმული წყლის „სამაჯურების“ გაჩენას, მარცვლების შეხების წერტილების ირგვლივ. ამ წერტილების მახლობლად წყლის აბსკის სიმრუდის რადიუსი მცირეა, რაც იწვევს ამ უბანში წყლის ორთქლის დრეკადობის ზრდას გაჯერებამდე და სუსტად ბმული წყლის გამოყოფას. სუსტად ბმული წყალი თავისი თვისებებით არ განსხვავდება ჩვეულებრივი წყლისაგან. მის მოძრაობას კაპილარული ძალები ზღუდავენ. ამგვარი ტენიანობის პირობებში სითხე ფორებში არ გადასცემს ჰიდროსტატიკურ წნევას, ვინაიდან წყლის „სამაჯურები“ ერთმანეთისაგან დაშორებულია (ნახ.2.1.).



ნახ.2.1.

ტენიანობის ზრდისას სითხის განცალკევებული სამაჯურები ერთდებიან, ფორის შუაგულში კი რჩება ჰაერის ბუშტულა.

ქანში ფიზიკურად ბმული წყლის რაოდენობას განსაზღვრავენ მაქსიმალური ჰიგროსკოპიულობისა და მაქსიმალური მოლეკულური ტენტევადობის მაჩვენებლებით. მაქსიმალური ჰიგროსკოპიულობა  $w_{\text{ამიილწევა}}$  ატმოსფეროს ტენიანობის 94%-მდე გაზრდის შემთხვევაში. ამ დროს თავისუფალი კაპილარული წყალი (სითხე) გადასცემს ჰიდრავლიკურ წნევას, მაგრამ, სიმძიმის ძალის ზემოქმედება მას ვერ ამოძრავებს, ვინაიდან ჰარბობენ კაპილარული ძალები (სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის

ძალები). მაქსიმალური ჰიგროსკოპიულობა ქანის ადსორბციულ უნარს ახასიათებს, და ამიტომ, იმავე ფაქტორებზეა დამოკიდებული.

მოლეკულური, ანუ აფსკური ტენტივადობა გვიჩვენებს ტენის იმ რაოდენობას, რასაც მოლეკულური მიზიდულობის ძალები ქანის ნაწილაკთა ზედაპირზე აჩერებს, და განისაზღვრება ფორმულით:

$$w_a = (m_a - m_b) / m_b$$

სადაც  $m_a$  - ქანის ტენიანი ნიმუშის წონაა;  $m_b$  - 105 - 110° C გამომშრალი ნიმუშის მასაა.

$w_a > w_b$  - რადგან ქანში არსებული სუსტად ბმულ აპკურ წყალს, მჭიდროდ ბმული წყლისაგან განსხვავებით, გააჩნია, მოლეკულარული ძალების ზემოქმედებით, გადაადგილების უნარი.

კვარცის ნაწილაკებისათვის, ზომებით 0,1 - 0,05 მმ  $w_a = 0,02\%$ , ზომებით 0,001მმ 0,86%. მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ქანის მინერალური შედგენილობაც. მარცვლების იგივე ზომების ( 1 მკრ-ზე ნაკლები) შემთხვევაში, ალბიტისათვის  $w_a=8,1\%$ , ლიმონიტისათვის - 23% და ბიოტიტისათვის - 48%. იგივე მიზეზით, კვარცის ქვიშები შეიცავენ ბმული წყლის ნაკლებ რაოდენობას - 24%, მაშინ როცა ლიოსები შეიცავენ - 5,2%, თიხები კი - 10 - 30%.

ტენიან ქანებს ახასიათებთ იონოსორბციული უნარი - ხსნარიდან წყალთან ერთად იონების შერჩევითი შთანთქმის უნარი. ამ თვისებას დიდი მნიშვნელობა აქვს ქანებსა და მასივებში ელექტროქიმიური რეაქციების, ელექტროგამტარობისა და ელექტრული ველების შეაწავლის დროს. იონოსორბციული უნარის ცოდნა საჭიროა, აგრეთვე, დამუშავების გეოტექნოლოგიური მეთოდების გამოყენების დროს, რომლებიც დაფუძნებულია ელექტროქიმიის გამოყენებაზე, ქანის ცემენტაციის პროცესებში და სხვა.

ატმოსფეროს ტენიანობის 94%-ზე ზემოთ გაზრდის შემთხვევაში, კაპილარებში ჩნდება თავისუფალი გრავიტაციული წყალი (ნახ.1,გ), რომელიც თავისუფლად მოძრაობს სიმძიმის ძალების ზემოქმედებით.

ქანებში კაპილარული წყლის რაოდენობა კაპილარული ტენტევადობით ფასდება. ეს უკანასკნელი კი დამოკიდებულია გრუნტის წყლების სარკის პერპენდიკულარული ფოროვანი არხების საშუალო ზომებზე.

ქანის მინერალური და გრანულომეტრული შედგენილობა განსაზღვრავს მასში წყლის სახეობათა რაოდენობრივ თანაფარდობას. მაგალითად, ქვიშები ძირითადად, შეიცავენ გრავიტაციულ წყალს (10%), თიხები, ლიოსები, თიხნარები – მოლეკულურ და კაპილარულ წყალს. თიხებში მისი შემცველობა 18–50% აღწევს.

ქანის თვისებებზე დიდ გავლენას ახდენს წყლის სახეობა. თუ კაპილარული წყალი გრუნტის წყლის სარკისაგან მოწყვეტილია, მაშინ იგი ხელს უწყობს ქანის შეკვრივებას, ადიდებს როგორც დასაშვებ დატვირთვებს, ისე ნაყარის ფედოს კუთხეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, გახდება დაწნევიითი და ფერდობის მდგრადობას შეამცირებს. წყლის სახეობა განსაზღვრავს, აგრეთვე, საბადოთა ამოშრობის მეთოდებს. ყველაზე უფრო ადვილად დრენაჟს ემორჩილება გრავიტაციული წყალი, გაცილებით ძნელად (ელექტროდრენაჟით, გამოწურვით) – კაპილარული წყლები.

ზოგიერთი ქანის შერყევისას, ფიზიკურად ბმული წყალი თავისუფალ წყლად გარდაიქმნება. აღნიშნულ მოვლენას **ტიქსოტროპია** ეწოდება.

ტიქსოტროპიას განიცდიან ტენიანი თიხოვანი გრუნტები (განსაკუთრებით მონტმორილონიტიანი), რომლებსაც დენადობის საკმაოდ მაღალი ზღვარი აქვთ, 2%-ზე მეტს 0,002მმ–მდე ნაწილაკებს შეიცავენ. ტიქსოტროპიის მოვლენა შეიძლება გამოვიწვიოთ შენჯღრევით, ვიბრაციით, უტრაბგერით, ელექტრული დენით. ზემოქმედების დამთავრების შემდეგ, წყალი კვლავ ბმულად გარდაიქმნება და გრუნტის საწყის სტრუქტურას აღადგენს.

კაპილარული, გრავიტაციული და ბმული წყლის მაქსიმალურ რაოდენობას, რომელსაც ქანი იტევს, **სრული ტენტევადობა** ეწოდება. მასში გამოსახული სრული ტენტევადობა გამოითვლება ფორმულით:

$$w_s = (m_{\text{წ}} - m_{\text{გ}}) / m_{\text{გ}}$$

სრული მოცულობითი ტენტევადობა :

$$w_{s,a} = V_{\text{წ}} / V$$

სადაც  $m_{\Phi}$  წყლით მაქსიმალურად გაჯერებული ქანის მასაა  $V_{\Phi}$  ქანის შემვსები წყლის მოცულობაა ( $V_{\Phi}=(m_{\Phi}-m_{\delta})/\rho_{\Phi}$ . მასაში და მოცულობაში გამოსახული ტენტევადობები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან ფორმულით:

$$w_{s,\delta} = w_s \cdot \rho_{\Phi} / \rho$$

სადაც  $\rho_{\Phi}$  წყლის სიმკვრივეა.

სრული ტენტევადობის რაოდენობრივი მნიშვნელობა ქანის ფორიანობას უტოლდება. თუ ქანში არსებულ ფორების ნაწილს არა აქვთ ერთმანეთთან დამაკავშირებელი თავისუფალი გასასვლელელები, მაშინ, მათი წყლით სრული გაჟღენთვა ვერ ხერხდება, რადგან ფორების ეს ნაწილი წყლისათვის შეუღწეველი რჩება, აქედან წყლის მიერ გაზებისა და აირების გამოდევნა ვერ ხერხდება. ასეთ შემთხვევებში:

$$w_{s,\delta} < P$$

ხდება, რომ წყალიკრისტალური მესრის პაკეტებს შორის აღწევს (მაგ.: მონტმორილონიტი, ვერმიკულიტი, ალუაზიტი). მაშინ:

$$w_{s,\delta} > P$$

ბუნებრივ პირობებში ქანის მდგომარეობის დასახასიათებლად სარგებლობენ **ბუნებრივი ტენიანობის** პარამეტრით  $w_{\delta}$ , რომელიც, ბუნებრივ პირობებში, ქანში არსებული წყლის ფარდობითი რაოდენობის ტოლია. ქანის წყლით გაჯერების ხარისხის შესაფასებლად ხშირად იყენებენ **წყალნაჯერობის** კოეფიციენტის  $k_{\Phi}$  მცნებას:

$$k_{\Phi} = w_{\delta} / w_s$$

თუ აქ  $w_{\delta}$ -ს შევცვლით  $w_{s,\delta}$ -თი, ხოლო  $w_s$ -ს  $P$ -თი, მივიღებთ წყალნაჯერობის კოეფიციენტის მნიშვნელობას, რომელიც ახასიათებს ქანის წყლით მაქსიმალურად შევსების შესაძლებლობას.

ტენიანი ქანების სრული გაუწყლოება მექანიკური საშუალებებით შეუძლებელია, რადგან მათში ყოველთვის რჩება ფიზიკურად ბმული წყალი. ტენიანი ლიოსები, თიხები და ძალიან წვრილი ქვიშაქვები (მცურავი ქანები) ძალიან ძნელად გასცემენ წყალს, რადგან მათში დიდია ფიზიკურად ბმული წყლის პროცენტული შემცველობა. ქანების თვისებას მექანიკური ზემოქმედების შედეგად გასცეს წყალი, ახასიათებს **წყალგაცემის** კოეფიციენტი  $\xi$ :

$$\xi = w_b - w_a.$$

ამრიგად, რაც მეტია ქანის მოლეკულარული ტენტევადობა, მით ნაკლებია მისი წყალგაცემის კოეფიციენტის მნიშვნელობა. წყალგაცემის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ქანისამგები ნაწილაკების ზომებზე, ფორების ზომებზე და მათ ურთიერთგანლაგებაზე. ქანის სუსტი წყალგაცემის უნარი ამცირებს მისი მექანიკური და ჰიდრავლიკური დამუშავების მწარმოებლობას, აძნელებს საბადოების ამოშრობას, სასარგებლო წიაღისეულის გადაზიდვასა და მსხვრევას.

ბუნებრივ პირობებში ქანებში წყლის გარდა გვხვდება, ასევე, ნავთობი და გაზები. ქანებში წყლის, ნავთობისა და გაზების განაწილების ხასიათი მათ მრავალ ფიზიკურ თვისებას გაბსაზღვრავს. ზოგადად ნავთობგაზწყალნაჯერი ქანის ნავთობის  $V_n$ , გაზებისა  $V_g$  და წლის  $V_f$  მოცულობების ჯამი, ფორების ჯამური მოცულობის ტოლია. შესაბამისად:

$$V_n / V_g + V_g / V_g + V_f / V_g = 1$$

სადაც:  $V_n / V_g$ ,  $V_g / V_g$ ,  $V_f / V_g$  ფარდობებს, შესაბამისად, ფარდობითი ნავთობნაჯერობის  $k_n$ , ფარდობითი გაზნაჯერობისა  $k_g$  და ფარდობითი წყალნაჯერობის  $k_f$  კოეფიციენტი ეწოდება.

### 3.2. სითხეებისა და გაზების გადაადგილება ქანებში

ჩვენ განვიხილეთ ქანებში სტატიკურად არსებული სითხეები და გაზები. ისინი გარკვეულ პირობებში შეიძლება გადაადგილდებოდნენ ქანში არსებულ ფორებში, არხებსა და ბზარებში. ქანის თვისებას გაატაროს სითხეები და გაზები მისი **შელწევადობა** ეწოდება.

შელწევადობა შეიძლება იყოს ფიზიკური (აბსოლუტური) და ფაზური (ეფექტური).

**ფიზიკური შელწევადობა** არის ფილტრაციის შედეგად ქანში ერთგვაროვანი სითხეებისა და გაზების გადაადგილება.

**ფაზური შელწევადობა** არის ქანის თვისება გაატაროს არაერთგვაროვანი სითხის ცალკეული ფაზები.

ქანის შეღწევადობის სიდიდე შეღწევადობის კოეფიციენტით  $k_{\text{ფ}}$  განისაზღვრება. ქანის ნიმუშში გასული წყლის რაოდენობა  $Q$  განისაზღვრება დარსის ფორმულით:

$$Q = \left( \frac{\Delta P S t}{\Delta l \eta} \right) k_{\text{ფ}} \quad (3.1)$$

სადაც  $S$  ნიმუშის განივი კვეთის ფართობია,  $\text{მ}^2$ ,  $t$  ფილტრაციის დროა, წმ,  $\Delta P$  ფილტრაციის  $\Delta l$  გზაზე წნევათა სხვაობაა, პა,  $\eta$  სითხის სიბლანტეა, პა. (3.1) ფორმულიდან:

$$k_{\text{ფ}} = \frac{Q \Delta l \eta}{S \Delta P t}$$

შეღწევადობის კოეფიციენტის განზომილება  $\text{მ}^2$ -ია.

შეღწევადობის გაზომვის პრაქტიკული ერთეულია დარსი. დარსი  $1\text{მ}^2$  ფართობისა და  $1\text{სმ}$  სიგრძის ქანის ნიმუშის შეღწევადობის სიდიდეა, რომელშიც  $9,8 \cdot 10^4$  პა წნევით  $1\text{წმ}$ -ში გადის  $10^{-3}$  პაწმ სიბლანტის  $1\text{სმ}^3$  სითხე.

სამთო წარმოების პრაქტიკაში ფართო გავრცელება პოვა ფილტრაციის კოეფიციენტმა  $k_{\text{ფლ}}$ . ის გვიჩვენებს ქანებში სითხეებისა და გაზების ფილტრაციის სიჩქარეს:

$$k_{\text{ფლ}} = \frac{Q}{S t}$$

ფილტრაციის კოეფიციენტი არ ითვალისწინებს სითხის წნევისა და სიბლანტის გავლენას ფილტრირებული წყლის რაოდენობაზე.

ფილტრაციის კოეფიციენტის სიდიდის მიხედვით ქანები იყოფიან შეუღწევად ( $k_{\text{ფლ}} < 0,1$  მ/დღე-ღამე), ძნელადშეღწევად ( $0,1 \leq k_{\text{ფლ}} \leq 10$ ), საშუალოდშეღწევად ( $10 \leq k_{\text{ფლ}} \leq 500$ ) და ადვილადშეღწევად ქანებად ( $k_{\text{ფლ}} > 1000$ ).

ქანის წყალშეღწევადობა, ძირითადად, მასში არსებული ფორების კონფიგურაციას, მოცულობასა და მათ დამაკავშირებელ არხებზეა დამოკიდებული. ეს პარამეტრები განსაზღვრავენ გატარებული სითხის მოცულობას, მოძრაობის ტრაექტორიასა და მოძრაობის შემაფერხებელ ხახუნის ძალების სიდიდეს. როგორც წესი რაც მეტია ქანების ფორიანობა, მით მეტია წყალშეღწევადობა. ფორების საშუალო დიამეტრის გაზრდა წყალშეღწევადობის სწრაფ ზრდას იწვევს. ეს დამოკიდებულება კარგად ჩანს პუაზელის კანონიდან გამომდინარე განტოლებიდან:

$$k_{\text{ფ}} = d^2 P / 32T^2_{\text{ჰ}}$$

სადაც  $T_3$  ფორების კონფიგურაციის გავლენის მაჩვენებელია; რაც უფრო დაკლავნილია ფორი მით მეტია მისი მნიშვნელობა;  $T_3=1/l_0$  – სადაც  $l$  და  $l_0$  შესაბამისად ფოროვანი არხისა და ნიმუშის სიგრძეა.

კაპილარულ ფორებში სითხის გადაადგილება მოხდება მაშინ, როცა სითხეზე მოქმედი წნევა გადააჭარბებს მოლეკულური მიზიდულობის ძალებს. სუბკაპილარული ფორებში თითქმის მთელი წყალი ბმულ მდგომარეობაშია. ბმის მოლეკულური ძალები ეწინააღმდეგებიან გრავიტაციული წყლის გადაადგილებას. ამიტომ, რომ ასეთი ფორები სითხეს პრაქტიკულად არ ატარებენ. მაგალითად, მიუხედავად იმისა, რომ თიხების ფორიანობა 50% აღწევს, ისინი წყალგაუმტარ ქანებს მიეკუთვნებიან. კლდოვანი ქანები კი პირიქით, დაბალი ფორიანობითა და დიდი წყალშელწევადობით ხასიათდებიან, რადგან მათი მარცვალთშორისი და, განსაკუთრებით, ბზარისებრი ფორები ხელს უწყობენ თავისუფალი წყლის მოძრაობას. რაც მეტია ქანებში თიხოვანი ფრაქციის რაოდენობა, მით ნაკლებია შელწევადობა. წყალს უკეთ ატარებენ მინერალები, რომლებიც კარგად სველდებიან.

შრეულ ქანებს ახასიათებთ წყალშელწევადობის ანიზოტროპია—შელწევადობა დაფენების მიმართულებით მეტია, ვიდრე დაფენების მართობულობა.

ქანებში სხვადასხვა თხევადი ნივთიერებების ან გაზების კონცენტრაციისა და გადაადგილების პროცესები შესაბამისი მაჩვენებლებით ხასიათდებიან, მაგალითად, ნავთობისა და მეთანის შემცველობის შემთხვევაში გამოიყენება ტერმინები: ნავთტევადობა, მეთანშემცველობა, ნავთშელწევადობა, მეთანშელწევადობა და სხვა.

### 3.3. სითხეებისა და გაზების ზემოქმედება ქანებზე

სითხეებისა და გაზების ქანებზე ზემოქმედება სტატიკური (გაჯირჯვება, დარბილება, გამოფიტვა) ან დინამიკური (მექანიკური რღვევა, გადაადგილება) ხასიათისაა.

წყლით გაჯერებისას ქანის მოცულობის გაზრდის უნარს **გაჯირჯვება** ეწოდება. ის გაჯირჯვების კოეფიციენტით  $k_3$  ხასიათდება, რომელიც გაზრდილი  $V_3$  და საწყისი  $V_0$  მოცულობების შეფარდებით გამოისახება:

$$k_3 = \frac{V_3}{V_0} \geq 1 .$$

გაჯირჯვებას მინერალის კრისტალური მესრის პაკეტებს შორის წყლის შეღწევა, იწვევს. ის ძირითადად თიხებსა და თიხოვან ქანებს ახასიათებთ. გაჯირჯვების ტენიანობად მიღებულია ტენიანობის ის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომლის გაზრდითაც ქანის მოცულობის შემდეგი მატება აღარ ხდება. ქანის გაჯირჯვების ხარისხი მასში არსებული სითხის წნევის მომატებით მატულობს, ტემპერატურის აწევით კი კლებულობს. თიხების გაჯირჯვების კოეფიციენტი 2–დან 1,5–მდე მერყეობს, ქვიშნარის 1,5–დან 1,05–მდე, ქვიშებისათვის კი 1–ის ტოლია. ქანების გაჯირჯვება იწვევს მათ დეფორმირებას, რაც უარყოფითად მოქმედებს ტექნოლოგიურ პროცესებზე: იზრდება გვირაბის სამაგრზე მოსული დატვირთვები, რაც იწვევს მის რღვევას; იზრდება რკინიგზის ვაკისი და დეფორმირდება ლიანდაგები და სხვა.

თიხიანი ქანების გამოშრობის პროცესში მათი მოცულობის შემცირებას **შეკლებას** უწოდებენ. ქანის შეკლების ტენიანობად მიღებულია ტენიანობის ის მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის შემცირებითაც ქანის მოცულობის შემდეგი კლება აღარ ხდება. შეკლების შედეგად თიხიანი ქანები, როგორც წესი, იზარებიან, სკდებად და თანაბარი ზომის პრიზმებს ქმნიან. ქანის შეკლების უნარს ახასიათებს შეკლების კოეფიციენტი  $k_{\text{შ}}$ . ის ქანის შემცირებული  $V_{\text{შ}}$  და საწყისი  $V_{\text{ს}}$  მოცულობის ფარდობით გამოისახება:

$$k_{\text{შ}} = \frac{V_{\text{შ}}}{V_{\text{ს}}} \leq 1.$$

გაჯირჯვება და შეკლება თიხიანი ქანების ტენიანობის ცვლილებით გამოწვეული მოცულობის ცვალებადობის ერთიანი პროცესია.

ქანებში ტენიანობის გაზრდა ამცირებს მათ სიმტკიცეს და იწვევს მის დარბილებას. წყალი ხვდება უწვრილეს ბზარებში, რომელთა რაოდენობაც მექანიკური ზემოქმედების შედეგად მკვეთრად იზრდება, ხელს უშლის მათ დახურვას და ამით ამცირებს მზიდუნარიანობას.

ზოგიერთი ქანის სტრუქტურა დასველების შედეგად იშლება და ხდება, ფორიანობის შემცირების ხარჯზე, მისი შემკვრივება. ამ მოვლენას **ჯდომადობას** უწოდებენ. ჯდომადობით ლიოსები ხასიათდებიან. ჯდომადობის დასახასიათებლად ფარდობითი ჯდომადობის კოეფიციენტს  $\alpha_{\text{ჯ}}$ :



$$a_{\text{ფკ}} = \frac{(h_1 - h_2)}{h_0}$$

სადაც  $h_1$ ,  $h_2$  და  $h_0$  ბუნებრივი აღნაგობის და ტენიანობის მქონე ლიოსური ქანის შემკვრივებული ნიმუშის სიმაღლეებია, კომპრესიულ ხელსაწყოში გვერდითი გაფართოების გარეშე:  $h_1$  – ზემდებარე ნაგებობებისა და ქანების წონის შესაბამისი დატვირთვის დროს;  $h_2$ –იგივე დატვირთვისას დასველების შემდეგ;  $h_0$ –მხოლოდ ზემდებარე ქანების წონის შესაბამისი დატვირთვის შემთხვევაში.

ლიოსი ჯდომადია, თუ  $a_{\text{ფკ}} \geq 0,02$ , თუ  $a_{\text{ფკ}} \leq 0,02$  არ არის ჯდომადი.

ზოგიერთი ქანი წყლით გაჯერების შემთხვევაში, ბლანტი სითხის მსგავს, მასად გადაიქცევა, ასეთ ქანებს, სამთო და სამშენებლო პრაქტიკაში, **მცურავ ქანებს** უწოდებენ. ტიპურ მცურავ ქანებს წარმოადგენენ წყლით გაჯერებული წმინდა, წვრილმარცვლოვანი ქვიშები. მცურავი ქანების მოძრაობის მთავარ ფაქტორად ითვლება წნევათა სხვაობა, ანუ გრადიენტი. გრადიენტის კრიტიკული მნიშვნელობა  $I_{3\sigma}$ , როდესაც იწყება მცურავი ქანის მოძრაობა გამოითვლება ფორმულით:

$$I_{3\sigma} = (\gamma - 1)(1 - k),$$

სადაც  $\gamma$  და  $k$  შესაბამისად მოცულობითი წონა და ფორიანობის კოეფიციენტი.

ქანებში მიმდინარე ჰიდროდინამიკურ მოვლენებს მიეკუთვნება **კავიტაცია** – ენერგეტიკული ზემოქმედებისას სითხეში ორთქლის ბუშტულების გაჩენა და გასკდომა. გასკდომისას ბუშტულები არღვევენ ქანის მყარ ნაწილებს.

კავიტაციის მოვლენა წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც სითხის რომელიმე უბანზე შიგა წნევა მის ჰიდროსტატიკურ წნევაზე დაბალი აღმოჩნდება. ამ დროს სითხე წყდება და იწყებს აორთქლებას, რის გამოც ჩნდებიან და სკდებიან კავიტაციური ბუშტულები.

კავიტაციის მოვლენას განსაკუთრებით ხელს უწყობენ სითხეში არსებული უცხო სხეულები და ბუშტულები. ისინი, როგორც წესი, კავიტაციის ინიცირების ცენტრებად იქცევიან. ამ ცენტრების მახლობლად სითხის მოლეკულათა ურთიერთმიზიდულობის ძალები მნიშვნელოვნადაა შემცირებული.

კავიტაციის გამოწვევა სხვადასხვა გზითაა შესაძლებელი: მექანიკური ზემოქმედებით, ჰიდრავლიკური დარტყმით, ულტრაბგერით, ელექტრული ზემოქმედებით (ელექტრული განმუხტვით) და სხვა.

გარე ფაქტორები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ქანების თვისებებზე.

წნევისა და ტემპერატურის ცვლილება, გარკვეულწილად, ცვლის ქანის აღნაგობას (შემჭიდროება, სტრუქტურის დარღვევა, ფორების ფორმისა და ზომების შეცვლა და ამის გამო თვით ფორიანობის შეცვლა და სხვა), რაც მათ თვისებებზე აისახება. ტემპერატურის აწევა ამცირებს სითხეების სიბლანტეს, ქანის შეღწევადობას კი ზრდის. ტემპერატურის აწევით წყალი აიროვან მდგომარეობაში გადადის, დაწვეით კი მყარში, ამის გამო ქანის ყველა თვისება იცვლება.

ქანები მრავალკომპონენტური, რთული აგებულების სხეულები არიან. მათში მიმდინარე ქიმიური პროცესები ხშირად რადიკალურად ცვლიან მათ აგებულებასა და თვისებებს.

განსაკუთრებულია ქანებზე ორგანული პროცესების გავლენა. დედამიწის ქერქის მნიშვნელოვანი ნაწილი ბიოსფეროს განეკუთვნება და სხვადასხვა სახის ორგანიზმების (მათ შორის ბაქტერიებისა და სხვა მიკროორგანიზმების, რომელთა ჯამური ბიომასა მრავალჯერდიანი ორგანიზმების ბიომასას მნიშვნელოვნად აღემატება) აქტიური ცხოვრების არეალს წარმოადგენს. დედამიწაზე სხვადასხვა დროს ფუნქციონირებადი ცოცხალი ორგანიზმების მიერ გადამუშავებული ნივთიერებების მასა ბევრად აღემატება დედამიწის ქერქის მასას. ამიტომ ითვლება, რომ დედამიწის ქერქის დღეს უსიცოცხლო შრეები ცოცხალი ორგანიზმების მიერაა გადამუშავებული, განვილილ გეოლოგიურ ეპოქებში.

ზემოთაღნიშნული პროცესები, როგორც წესი, დედამიწის ქერქის ზედაპირულ შრეებში ვითარდება და მჭიდროდაა დაკავშირებული ატმოსფერულ მოვლენებთან.

დედამიწის ზედაპირთან განვითარებული ფიზიკური, ქიმიური და ორგანული პროცესების ერთობლიობას, რომლებიც ქანების აგებულებაში მნიშვნელოვან ცვლილებებს იწვევენ გამოფიტვას უწოდებენ.

როგორც განმარტებიდან ჩანს, მისი გამომწვევი პროცესების ხასიათის მიხედვით, გამოფიტვა შეიძლება იყოს ფიზიკური, ქიმიური და ორგანული.

ფიზიკური გამოფიტვა იწვევს ქანის მექანიკურ რღვევას. ის შეიძლება გამოწვეული იყოს ტემპერატურის მკვეთრი ცვალებადობით. ამ დროს ხდება ქანის შემადგენელი მინერალების გაფართოება და შეკუმშვა. ცალკეული მინერალების გაფართოების კოეფიციენტის სხვადასხვაობის გამო მათი მოცულობაში მატება ან კლება არათანაბარია, რის გამოც კრისტალებს შორის არსებული ბზარები ფართოვდება ან ჩნდება ახალი. ბზარების გაფართოებას იწვევს, აგრეთვე, ბზარებში არსებული წყლის გაყინვა.

ქანის მექანიკურ გამოფიტვას ხელს უწყობს, აგრეთვე, მისი პერიოდული დასველება და გაშრობა. ასეთ ქანებს მიეკუთვნებიან, მაგალითად, მერგელები და ზოგიერთი სხვა თიხოვანი ქანი.

ქანის მექანიკური დაშლა შეიძლება მოხდეს ბზარებში, ფორებსა და სიცარიელებში, ტენის ინტენსიური აორთქლებისა, მარილების გამოლექვისა და კრისტალიზაციის შედეგად. კრისტალიზაციის წნევა ამ დროს იმდენად მაღალია, რომ შეუძლია დაარღვიოს მტკიცე ქანის მთლიანობა. თუ ქანს გავაჯერებთ რომელიმე მარილის ხსნარით, გამოვაშრობთ და ამ პროცედურას რამდენჯერმე გავიმეორებთ, მისი სიმტკიცე მნიშვნელოვნად შემცირდება.

ქანების მექანიკურ დაშლას მცენარის ფესვები (ბზარების კედლებზე მაღალი წნევის განვთარების შედეგად) და მიკროორგანიზმებიც (ცალკეული აგრეგატების გადამუშავების შედეგად) იწვევენ.

ქანები ქარის ზეგავლენითაც იშლებიან, განსაკუთრებით, თუ ჰაერის ნაკადთან ერთად მოძრაობს ატაცებული ქვიშის მარცვლები.

ქიმიური გამოფიტვა იწვევს ქანის შემადგენელი კომპონენტების ქიმიური შემადგენლობის ცვლილებას—ჰიდროლიზის, ჰიდრატაციის, კარბონიზაციის, გახსნისა და დაჟანგვის შედეგად.

ქიმიური გამოფიტვისადმი ყველაზე ნაკლებად მდგრადია მაგმური ქანები, განსაკუთრებით მათი ინტრუზიული სახესხვაობანი, წარმოქმნილნი მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში.

ქიმიური გამოფიტვის პროცესებში მთავარ როლს წყალი ასრულებს. ის, როგორც წესი, შეიცავს ნახშირორჟანგს, ჟანგბადს, ორგანულ და არაორგანულ მჟავებს, რომლებიც წარმოიქმნებიან სხვადასხვა მინერალის, მცენარეული ნაშთების დაშლისა და ორგანიზმების ცხოველქმედების პროცესების შედეგად.

ქანის შემადგენელი მინერალების წყალში გახსნა ქიმიური გამოფიტვის უმარტივესი სახეა. ქანების ხსნადობა განისაზღვრება ნიმუშის წონის დაკარგვის მიხედვით, რომელმაც წყლის ან ხსნარის ხანგრძლივი ზემოქმედება განიცადა.

ნახშირორჟანგის შემცველ წყალში იხსნებიან: კალციუმის, მაგნიუმის, ნატრიუმისა და კალიუმის ბიკარბონატები. ნახშირორჟანგი ხელს უწყობს, აგრეთვე, მაგმურ ქანებში მინდვრის შპატების გარდაქმნას თიხოვან მინერალებად.

წყალში გახსნა ახასიათებთ—ქვამარილს, თაბაშირს, კირქვებს, დოლომიტებს და სხვა მრავალ ქანს.

ზოგიერთი ქანი და მინერალი აქტიური ხსნადობით გამოირჩევა. მაგალითად: ჰალოიდები, უფრო სუსტად ანჰიდრიდები და თაბაშირი. დოლომიტები და კირქვები ასევე სუსტი ხსნადობით ხასიათდებიან. მათში თიხოვან მინერალთა რაოდენობის გაზრდისას ხსნადობა მცირდება. რაც მეტია ტემპერატურა მით მაღალი ხსნადობით ხასიათდებიან ქანები. კვარციტები, ფიქლები, გრანიტები და სხვა მაგმური თუ მეტამორფული ქანები პრაქტიკულად უხსნადია.

სხვადასხვა მჟავის ხსნარების ცირკულაცია, ქანების ქიმიური დაშლის რეაქცია იწვევს და მნიშვნელოვნად ზრდის ხსნადობას. კარბონატების ხსნადობაზე გავლენას ახდენს წყალში ნახშირორჟანგის შემცველობა. მისი შემცველობის გაზრდით ხსნადობა იზრდება.

მინერალთა უმრავლესობა, რომელიც შეიცავს რკინას, მაგნიუმსა და ნიკელს, წყალთან შეხებისას ჟანგვის პროცესებს განიცდიან.

პირიტის შემცველი ქანების წყალთან ურთიერთქმედებით, პირიტი გარდაიქმნება რკინის ჟანგეულის ჰიდრატად. ამ დროს წარმოიქმნება გოგირდმჟავა, რომელიც, თავის მხრივ, აქტიურად ზემოქმედებს სხვა მინერალებზე.

ქიმიური გამოფიტვის შედეგად წარმოიქმნებიან ახალი, გამოფიტვისადმი უფრო მედეგი მინერალები.

მიწისქვეშა წყლების მექანიკური და ქიმიური ზემოქმედებით, ქანების დაშლის ერთ-ერთი სახეა სუფოზია. **სუფოზია** მიწისქვეშა წყლების ფილტრაციული ნაკადის მიერ ნამტვრევი და ხსნადი ქანებიდან (ქვიშებიდან, ხრეშიდან, რიყნარიდან, თაბაშირით სუსტად შეკავშირებული ქვიშაქვებიდან და სხვა), აგრეთვე, ნაპრალების შემავსებელი მასალიდან მყარი ნაწილაკების გამოტანა და გამოტუტვაა.

სუფოზიური პროცესების შედეგად ქანთა მასივებში ხშირად ფორმირდება სიცარიელები, რომელთაც **კარსტებს** უწოდებენ. კარსტული პროცესები, ძირითადად, კირქვებში ვითარდება. წყალში არსებული ნახშირორჟანგი ხელს უწყობს ხსნადი კალციუმის ჰიდროკარბონატის წარმოქმნას. კარსტული პროცესის შინაარსი შემდეგი ქიმიური რეაქციით აისახება:



რეაქცია შექცევადია—ჰიდროკარბონატით გაჯერებული წყლიდან გამოილექება კალციტი. კარსტულ მღვიმეებში არსებული ნადენი ფორმები – სტალაქტიტები და სტალაგმიტები, სწორედ ასეთი გზითაა წარმოშობილი.

ორგანული გამოფიტვა ცოცხალი ორგანიზმების ცხოველქმედების შედეგია. ის საბოლოოდ მექანიკური და ქიმიური გამოფიტვის პროცესებზე დადის. გარდა მცენარეთა ფესვების მექანიკური ზემოქმედებისა, ისინი ორგანული მჟავების გამოყოფით, აჩქარებენ ქანების ქიმიური გარდაქმნის პროცესებს. ბევრი ცოცხალი ორგანიზმი, განსაკუთრებით მიწისმთხრელთა რიცხვიდან, მრავალრიცხოვანი ხვრელებითა და ორმოებით აფხვიერებენ და შლიან ქანებს. მნიშვნელოვანია, აგრეთვე, ბაქტერიებისა და სხვა მიკროორგანიზმების როლი, რომელთა ცხოველქმედების დროს შთაინთქმება და გამოიყოფა გარკვეული ჯგუფის ნივთიერებანი. ისინი მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ნიადაგწარმოქმნის პროცესში.

### 3.4. ქანების ჰიდრო და აეროდინამიკური თვისებების

#### გამოყენება სამთო საქმეში

ქანებში არსებული სითხეები და გაზები დიდ გავლენას ახდენენ სამთო წარმოების მრავალ ტექნოლოგიურ პროცესზე: საბურღი, მომნგრევი, სატვირთო და სატრანსპორტო მექანიზმების მწარმოებლობაზე; გვირაბების, წმენდითი სანგრევეების, ნაყარების, კარიერის საფეხურების და სხვა მდგრადობაზე.

ქანების წყალნაჯერობა, უმეტეს შემთხვევაში, ართულებს მუშაობის პირობებს და ამცირებს შრომის ნაყოფიერებას. საბადოთა ამოშრობისა და წყალქცევის, კარიერის გვერდებისა და ნაყარის ფერდოთა მდგრადობის გაანგარიშება დაფუძნებულია ქანების ტენიანობაზე, მათი ფილტრაციის, წყალგაცემის, ტენტევადობის და სხვა კოეფიციენტებზე. ქანების დიდი მოლექულური ტენტევადობა და მცირე წყალგაცემის (თიხები მცურავი ქანები) შემთხვევაში, მიზანშეწონილია ამოშრობის ელექტრული მეთოდების გამოყენება. აირშელწევადობისა და აირგაცემის ცოდნა აუცილებელია ქვანახშირის, გაზით საშიში საბადოების დამუშავების დროს, გაზის გამოყოფასა და ქვანახშირის უეცარ გამოტყორცნასთან ბრძოლის ღონისძიებათა შესამუშავებლად.

თხევადი და აიროვანი სასარგებლო წიაღისულების შესწავლისა და დამუშავების საკითხებში, ქანების ჰიდრავლიკურ და აეროდინამიკურ თვისებებს გადამწყვეტი როლი ენიჭებათ.

ნავთობისა და გაზის ჭაბურღილების მწარმოებლობა დამოკიდებულია კოლექტორთა ტევადობაზე, მათ წყალ, ნავთობ და აირ შელწევადობაზე; წყალ, ნავთობ და აირ-გაცემასა ადსორბციულობაზე.

ქანების ჰიდრო და აეროდინამიკურ თვისებებზეა დამოკიდებული სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვებისა და გადამუშავების მრავალი გეოტექნოლოგიური მეთოდი. ზოგიერთი ქანის დაბალი შელწევადობა აფერხებს ამ მეთოდების გამოყენებას.

ქანების ჰიდრავლიკურ თვისებათა შორის განსხვავებას მათი სელექციის პროცესში იყენებენ. მაგალითად, ამჟამად მადნეულთა გამდიდრების ფართოდ გავრცელებული ფლოტაციის მეთოდი დაფუძნებულია მინერალების განსხვავებულ სველებადობაზე.

წყალზე ჰიდრავლიკური ზემოქმედებით შეიძლება დავასუსტოთ ან დავარღვიოთ ქანი. შახტებში ფართედ გამოიყენება ქვანახშირის შესუსტების მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს ფენში მაღალი წნევით წყლის დაჭირხვნას. ამ შემთხვევაში, წინასწარ გაბურღულ ჭაბურღილებში წყალს დაწნებავენ, რაც დაფენების სიბრტყეებში, ბზარებში და ფორებში გავრცელების შედეგად ასუსტებს კონტაქტებს და მნიშვნელოვნად ამცირებს ქვანახშირის სიმტკიცეს. ასეთი წინასწარ მომზადების შემდეგ, ქვანახშირის ამოღება საგრძნობლად ადვილდება.

ჰიდრავლიკური ხერხით ქანებში შეიძლება უკუეფექტის მიღწევა, ანუ მათი განმტკიცება. ამას ქანებში სხვადასხვა შემაკავშირებელი ხსნარების: ცემენტის, ბითუმის, სილიციუმჟავას, ჰიდროგელისა და სხვა, დაჭირხვნით აღწევენ. ამ ნივთიერებათა ნაწილაკები ბზარებისა და ფორების შიგა ზედაპირზე ადსორბციის შედეგად ამოავსებენ სიცარიელებს, შეაცემენტებენ მარცვლებს და ამით ზრდიან ქანის საერთო სიმტკიცეს, წყალშელწევადობას კი ამცირებენ.

ქვანახშირის შახტებში აირთან ბრძოლის დროს ახდენენ ფენების დეგაზაციას, მეთოდის ეფექტურობა მით უფრო მაღალია, რაც მაღალია ფენების აირშელწევადობა. ამ შემთხვევაშიც აირშელწევადობის გაზრდისათვის მიზანშეწონილია ქვანახშირის ფენებში წყლის დაჭირხვნა.

#### **4. ქანების მექანიკური თვისებები**

ქანების თვისებებს, რომლებიც განსაზღვრავენ მათ ქცევას გარე ძალების ზემოქმედებისას და მჟღავნდება რღვევის მიმართ წინააღმდეგობის უნარში დეფორმაციისა და რღვევის მიმართ, მექანიკური თვისებები ეწოდებათ.

მექანიკური თვისებები იყოფიან—დრეკად, პლასტიკურ, სიტკიცის, რღვევის და რეოლოგიუ თვისებებად.

დრეკადი თვისებები— როდესაც ქანის ქცევის დრეკადობის ზონის ფარგლებში ე.ი დატვირთვის იმ დიაპაზონში, რომლებიც დატვირთვის მოხსნით აღდგება მისი ფორმა და ზომები.

პლასტიკური თვისებები— როგორც წესი, ვლინდებიან დრეკადი დეფორმაციების რეალიზაციის შემდეგ. ძალების სიდიდეთა ამ დიაპაზონში მათი მოხსნა არ იწვევს ქანის ფორმისა და ზომის აღდგენას, ე.ი ადგილი აქვს ნარჩენ დეფორმაციას.

ქანების მექანიკურ თვისებას, გარე ძალების ზემოქმედებისას წინააღმდეგობა გაუწიოს რღვევასა და პლასტიკური დეფორმაციების წარმოქმნას, **სიმტკიცე ეწოდება.**

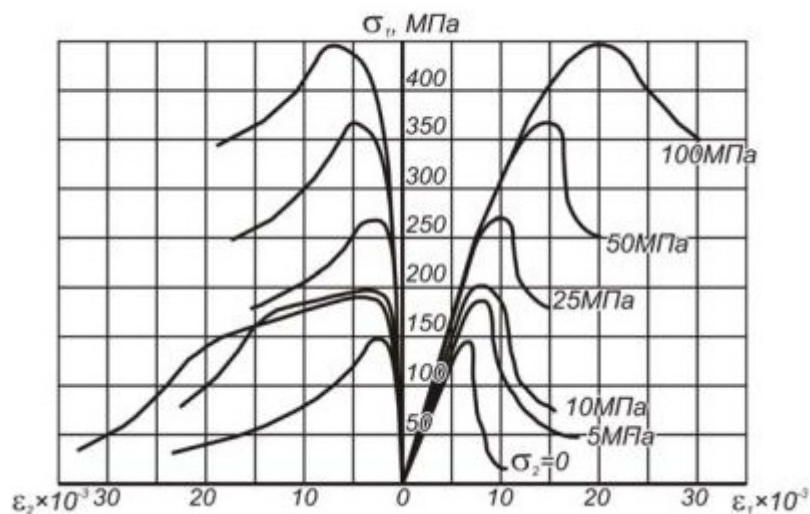
ქანების სიმტკიცის ბუნება გამოირჩევა მნიშვნელოვანი სირთულით და მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული. მასზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც ქანების შემადგენლობა და აღნაგობა, ასევე გარეგანი დატვირთვის ხასიათი და მიმართულება.

დამაბული მდგომარეობის მიხედვით ანსხვავებენ სიმტკიცის ერთლერძა და სამლერძა დატვირთვის დროს. მრღვევი დეფორმაციების განვითარების ხასიათის მიხედვით კი განიხილავენ— სიმტკიცის კუმშვაზე, ჭიმვაზე, ზვრაზე, ხლეჩვაზე და ლუნვაზე.

სიმტკიცის ზღვრის მიღწევის შემდეგ, ქანთა დეფორმაციების შემთხვევაში, როგორც წესი, ქანებში იწყება რღვევის პროცესი.

ქანის თვისებას, მრღვევი ძალების ზემოქმედებისას განიცადოს უმნიშვნელო დეფორმაციები სიმყიფე ეწოდება.

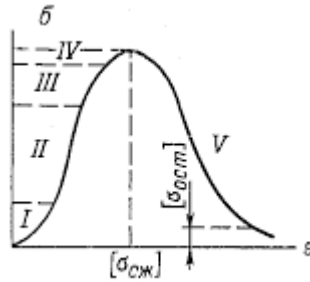
**ნახ 4.1 -ზე** ნაჩვენებია ქვიშაქვების, ლაბორატორიულ პირობებში, მოცულობით კუმშვაზე გამოცდის შედეგები.



**ნახ.4.1.**



ზოგადად, მუდმივი გვერდითი დატვირთვის ( $\sigma = \text{const}$ ) პირობებში ქანების დეფორმირების მთელი პროცესი კუმშვის დროს, შეიძლება დაიყოს ხუთ მახასიათებელ უბნად (ნახ.4.2).



ნახ.4.2.

I. ძაბვები იზრდებიან არა წრფივად. ნიმუშში ძალის მოქმედების მიმართულებით არსებული ბზარები და ფორები იხურება.  $\sigma = f(\epsilon_1)$  დამოკიდებულების მრუდი ხასიათდება მზარდი კუთხური კოეფიციენტით, დეფორმაციის მოდული და განივი დეფორმაციები იზრდებიან. ნიმუშის მოცულობა იკლებს.

II. დრეკადი დეფორმაციები. ბევრ შემთხვევაში ადგილი აქვს წრფივ დრეკადობას. პუასონის კოეფიციენტი ( $\mu$ ) და დრეკადობის მოდული ( $E$ ) მუდმივი სიდიდეებია. ნიმუშის მოცულობა იკლებს, მეორე წერტილის შესაბამის ძაბვას ( $\sigma_1^e$ ) პროპორციულობის ზღვარი ეწოდება.

III. დამოკიდებულება  $\sigma = f(\epsilon_1)$  რჩება წრფივი  $\sigma_1$  პროპორციულია  $\epsilon_1$  -ის დეფორმაციები არადრეკადია, რის გამოც იზრდება განივი დეფორმაციების კოეფიციენტი. მე-3 წერტილის შესაბამის ძაბვას ( $\sigma_1^e$ ) პროპორციულობის ზღვარი ეწოდება.

IV. დამოკიდებულება  $\sigma = f(\epsilon_1)$  არაწრფივი ხდება, ფუნქციის ზრდის ტიპი იკლებს. ნიმუშში ნაჩვენებია მიკრობზარები. განივი დეფორმაციების კოეფიციენტი იზრდება. ნიმუშის მოცულობა იწყებს ზრდას. უბნის ბოლოს ნიმუშის წინაღობა აღწევს მაქსიმუმს. ა წერტილის შესაბამის ძაბვას  $\sigma_1^e$  სიმტკიცის ზღვარი ეწოდება.

V. იწყება რღვევის პროცესი. თანდათან ირღვევა შინაგანი კავშირები და ნიმუშში ჩნდება ლოკალური რღვევის უბნები. მაგრამ, მათი გაჩენა არ იწვევს მთელი ნიმუშის მზიდუნარიანობის დარღვას, რადგან ნიმუშის ცალკეულ ნაწილებს შორის ჯერ კიდევ მოქმედებს შეჭიდულობის ძალები. ეს ძალები დეფორმაციების განვითარებასთან

ერთად მცირდებიან. დამოკიდებულება  $\sigma=f(\epsilon_1)$  ახლოა წრფივთან  $\sigma_1$ -სა და  $\epsilon_1$ -ს შორის განსაზღვრავს რღვევის დეფორმაციის მოდული-M და განივი დეფორმაციების კოეფიციენტი  $-\beta$ . მთელ უბანში ისინი ინარჩუნებენ მუდმივ მნიშვნელობებს.  $\beta > 0.5$  პროცესი ხასიათდება ნიმუშის მოცულობის შემდგომი ზრდით. c- წერტილის შესაბამის ძაბვას **ნარჩენი სიმტკიცე ეწოდება**. ამ წერტილში მთავრდება შეჭიდულობის სიმტკიცის განადგურება.

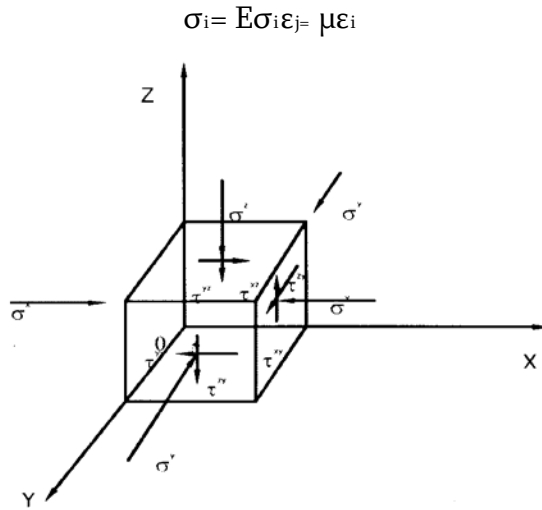
VI უბნის ბოლოს, ნიმუშების ცალკეულ ნაწილებს შორის, შეჭიდულობის ძალები აღარ მოქმედებენ. ნიმუში დანაწევრებულია ცალკეულ ფრაქციებად. ფრაქციათა ურთიერთსრიალი განსაზღვრავს დეფორმაციათა პროცესს. ცალკეულ ფრაქციებზე, მათი რთული ფორმების გამო, მოქმედებენ ურთიერთ ჩაჭიდების ძალები, რისი წყალობითაც ნიმუში ჯერ კიდევ ინარჩუნებს მდგომარეობას და გარკვეულ წინააღმდეგობას უწევს მოქმედ დატვირთვებს. ბოლო წერტილში ნიმუში კარგავს მდგრადობას და იშლება.

ქანების ნაწილს ახასიათებთ პლასტიკურობა (მაგ. მარმარილოს). ასეთი ქანების გამოცდის დროს, ფუნქცია  $\sigma=f(\epsilon_1)$  ხდება ღერძის პარალელური. ძაბვები  $\sigma_1$  ინარჩუნებენ IV უბნის ბოლოს მიღწეულ მაქსიმალურ მნიშვნელობას. მუდმივი ძალის პირობებში ნიმუში აგრძელებს დეფორმაციებს მისი ცალკეული ნაწილების ურთიერთგასრილების ხარჯზე. ამავე დროს ნიმუში ინარჩუნებს მთლიანობას. განივი დეფორმაციები დაახლოებით გრძივის 50%-ს შეადგენს.

ამგვარად, ქანების დეფორმირების პროცესი საკმაოდ რთულია, მაგალითად, თუ მარმარილოსთვის დამახასიათებელია ყველა ზემოთმოყვანილი უბანი, კლდოვან მყიფე ქანებში დრეკადობის უბანი საკმაოდ დიდია, პლასტიკური კი საერთოდ არ გვაქვს. ქანების ნაწილისთვის, დრეკადობის უბანი მცირეა ან საერთოდ არ ხასიათდებიან დრეკადი თვისებებით. ასეთ ქანებს თიხოვანი ქანები განეკუთვნებიან. ისინი მნიშვნელოვანი პლასტიკურობით ხასიათდებიან და მათ მახასიათებელ დიაგრამებში პლასტიკურობის უბანი ჭარბობს. ძალიან დაბზარული, დაშლითი ქანებისთვის დამახასიათებელია ბოლოუბანი და ა.შ.

## 4.1 ქანების დრეკადობა

დრეკადი ქანებისთვის როდესაც II უბანი საკმაოდ დიდია. ამიტომ, ექსპერემენტულ მრუდებს ამარტივებენ და თვლიან რომ I და II უბნებზე მთლიანად დრეკადი დეფორმაციები გვაქვს. კავშირი ძაბვასა და დეფორმაციებს შორის განისაზღვრება ჰუკის კანონით, რომლებსაც ხაზოვანი დამაბული მდგომარეობის დროს აქვს სახე :



ნახ.4.3.

აქ  $i$  და  $j$  ორი ურთიერთპერპენდიკულარული მიმართულებაა. დრეკად ქანთა მასივში, აზრობრივად, გამოვყოფთ ერთეულოვან კუბის, (ნახ.4.3) რომლის წახნაგებზეც მოქმედებენ  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , ნორმალური და  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ , მძვრელი ძაბვა. ცხადია, ეს ძაბვები დრეკად  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ , ნორმალურ და  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  ძვრის დეფორმაციებს გამოიწვევენ (აქ გათვალისწინებულია რომ  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  და ა.შ.) განვიხილოთ ნორმალური დეფორმაციები  $x$  ღერძის გასწვრივ.  $\sigma_x$  -ის მოქმედება გამოიწვევს დეფორმაციებს:

$$\varepsilon_x^{III} = \frac{\sigma_x}{E} \quad (4.1).$$

$\sigma_y$ - ის მიერ აღძრული დეფორმაცია ამ ღერძზე იქნება:

$$\varepsilon_x^I = -\mu \cdot \varepsilon_z = -\mu \frac{\sigma_z}{E} \quad (4.2).$$

$\sigma_z$ -ის მიერ აღძრული დეფორმაცია:

$$\varepsilon_x^{II} = -\mu \varepsilon_y = -\mu \frac{\sigma_y}{E} \quad (4.3).$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  გამოწვეული ჯამური დეფორმაციები  $x$  - ღერძის გასწვრივ ტოლი იქნება (4.1),(4.2),(4.3)- ის ჯამისა:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^{III} + \varepsilon_x^I + \varepsilon_x^{II} = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_z}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.4)$$

ანალოგიურად მივიღებთ:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4.6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (4.7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad (4.8)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz} \quad (4.9)$$

სადაც  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$  და მას **პერის მოდული ეწოდება**.

(4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) და (4.9) განტოლებები ჰუკის განზოგადოებულ კანონს გამოსახვენ.

## 4.2 ქანების სიმტკიცე

ქანების მაქსიმალური წინააღმდეგობა და პლასტიკურობის პირობა განისაზღვრება მორი-კულონის განტოლებით:

$$|\tau_n| = \sigma_n t_{g\varphi} + k \quad (4.10),$$

სადაც  $\tau_n$  და  $\sigma_n$  შესაბამისად განსახილველი სიბრტყის მხებად და ნორმალურად მოქმედი ძაბვების ვექტორებია.

$\varphi$  და  $k$  შესაბამისად ქანის შინაგანი ხახუნის კუთხე და შეჭიდულობის კოეფიციენტია.

ფორმულა (4.10) გვიჩვენებს, რომ ქანის წინააღმდეგობის უნარს ხახუნის ძალებისა ( $\sigma_n t_{g\varphi}$  - ნორმალური ძალის და კოეფიციენტის ნამრავლს) და შეჭიდულობის ძალების ჯამი განსაზღვრავს. (4.10) შეიძლება გამოვსახოთ მთავარ ძაბვებშიც. გავითვალისწინოთ რომ :

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; \quad (4.11)$$

სადაც  $\sigma_1$  და  $\sigma_3$  მაქსიმალური და მინიმალური ნორმალური ძაბვაა.

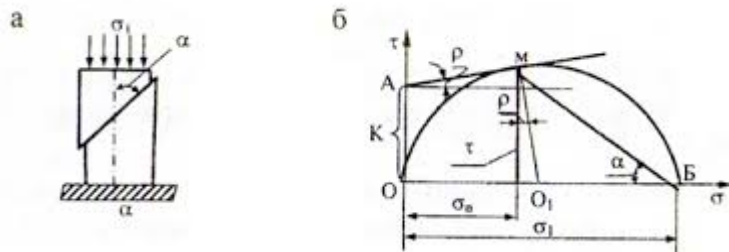
მაშინ, მორი - კულონის (4.10) პირობიდან მივიღებთ:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left[ \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + kctg\varphi \right] \sin\varphi \quad (4.12)$$

ამრიგად, ქანების სიმტკიცე საშუალო ნორმალურ ძაბვაზე  $\sigma_2$  -ზე არ არის დამოკიდებული.

მორი - კულონის სიმტკიცის პირობის გრაფიკული ინტერპრეტაციისათვის ავიღოთ კოორდინატა  $\tau_n$  და  $\sigma_n$  ღერძები (ნახ.4.3).

გადავზომოთ ღერძები  $\sigma_n$  და  $\sigma_3$  მღვევი ძალების წყვილი და ავაგოთ  $\sigma_1$  და  $\sigma_2$  დიამეტრის მქონე წრე. ამ წრეს **მორის წრე ეწოდება**. (4.11) ფორმულის გათვალისწინებით ადვილად დავადგენთ, რომ A წერტილი კოორდინატებით  $\tau_n; \sigma_n$  შეესაბამება სიმტკიცის პირობას. კუთხე  $\varphi$  კი განსახილველი სიბრტყის დახრის კუთხეა  $\sigma_1$  -თან, ე.ი.  $\alpha$ - განსაზღვრავს სიბრტყეს, რომელშიც ხდება სიმტკიცის პირობის დარღვევა (ნახ.4.4).



ნახ.4.4.

ანალოგიურად, ავიღოთ მრღვევი ძაბვების ახალი წყვილები  $\sigma_3^I, \sigma_3^{II}, \sigma_1^I, \sigma_1^{II}$  და ა.შ. და ვიპოვოთ ახალი სიმტკიცის პირობების შესაბამისი წერტილები A, A<sup>II</sup>, და A, A<sup>I</sup>, A<sup>II</sup> და ა.შ. წერტილების შემაერთებელ მრუდს მორის **შემომღველები** ეწოდება და (4.12) და (4.10) სიმტკიცის პირობის გრაფიკულ ინტერპრეტაციას წარმოადგენს. მისი გადაკვეთა  $\tau_n$  ღერძთან შეჭიდულობის ძალების სიდიდეს გვიჩვენებს, ხოლო ამ წერტილში მისი  $\sigma_n$  ღერძთან დახრის კუთხე -  $\varphi$  ქანის შინაგანი ხახუნის კუთხის ტოლია.

ფხვიერი ქანებისათვის შეჭიდულობის ძალები ნულის ტოლია ( $k=0$ ). ამის გათვალისწინებით ფხვიერი ქანის სიმტკიცის პირობა ადვილად მიიღება (2.10) ფორმულიდან:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi . \quad (4.13)$$

პლასტიკურ ქანებში ხახუნის უმნიშვნელოა, ამიტომ სიმტკიცის პირობას აქვს სახე:

$$\tau_n = k.$$

ქანების სიმტკიცე გაჭიმვაზე რამდენჯერმე ნაკლებია სიმტკიცეზე კუმშვასთან შედარებით, საშუალოდ:  $\sigma_g = (0.1 \div 0.2)\sigma_3$ .

ამაში ადვილად დავრწმუნდებით თუ (4.12) ფორმულიდან მივიღებთ ერთ ღერძა კუმშვისა და ერთ ღერძა გაჭიმვის კერძო შემთხვევებს. ერთ ღერძა კუმშვის დროს  $\sigma_1 = \sigma_3$  და  $\sigma_2 = 0$ , მაშინ (4.12) ფორმულიდან:

$$\sigma_3 = \frac{2k \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} . \quad (4.14)$$

ხოლო ერთღერძა გაჭიმვის დროს  $\sigma_1=0$  და  $\sigma_2 = -\sigma_3$  და (4.14) ფორმულიდან :

$$\sigma_3 = \frac{2k \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (4.15)$$

მაშინ (4.14) ფორმულისა და (4.15) ფორმულის საფუძველზე მივიღებთ:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_3} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} . \quad (4.16)$$

ქანების უმრავლესობისათვის შინაგანი ხახუნის კუთხე იცვლება დიაპაზონში  $20^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ$  და საშუალოდ  $\varphi \approx 30^\circ$  მაშინ მივიღებთ, რომ

$$\sigma_g = 0,333\sigma_3 \quad (4.16^1)$$

მნიშვნელოვანი განსხვავება  $\sigma_g$  -ს თეორიული და რეალური მნიშვნელობებს შორის გამოწვეულია იმით, რომ მორი-კულონის სიმტკიცის პირობა ქანებისათვის არასწორად ასახავს გაჭიმვაზე სიმტკიცის პირობას. (4.16) და (4.16)<sup>1</sup> ფორმულების შედარება გვიჩვენებს, რომ გაჭიმვის დროს ხახუნის ძალები ამცირებენ სიმტკიცეს  $\sigma$ -ს, ეს მაშინ, როცა რეალურად გაჭიმვის დროს ხახუნის ძალები პრაქტიკულად არ მოქმედებენ.

ლითონებში შეჭიდულობის ძალებთან შედარებით ხახუნის ძალები უმნიშვნელოა, ამიტომ, თუ (4.14) და (4.15) ფორმულებში ჩავთვლით რომ  $\varphi=0$  მაშინ მივიღებთ

$$\sigma_g = \sigma_3 = 2k,$$

რაც ახლოსაა პრაქტიკულ მონაცემებთან ლითონებისათვის.

ამრიგად, მორი - კულონის სიმტკიცის ზღვრის დაბალი მნიშვნელობები გამოწვეულია ქანების არასწორი ფორმებით, კრისტალური მესრის მრავალრიცხოვანი დეფექტებითა და ბზარებით, რომელთა გავლენაც გაჭიმვის დროს უფრო მნიშვნელოვანია ვიდრე კუმშვისას. გაჭიმვის დროს ქანების რღვევას მყიფე ხასიათი აქვს, ამიტომ ღვევის პროცესი შეიძლება აღვწეროთ ა.გრიფისტის შემუშავებული მყიფე რღვევის თეორიის საფუძველზე, რომლის თანახმად:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_5} = 4 \left[ \sqrt{(1 + tg^2\varphi)} - tg\varphi \right]$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ქანების უმრავლესობისათვის  $tg\varphi=0.2 \div 2$  მივიღებთ:

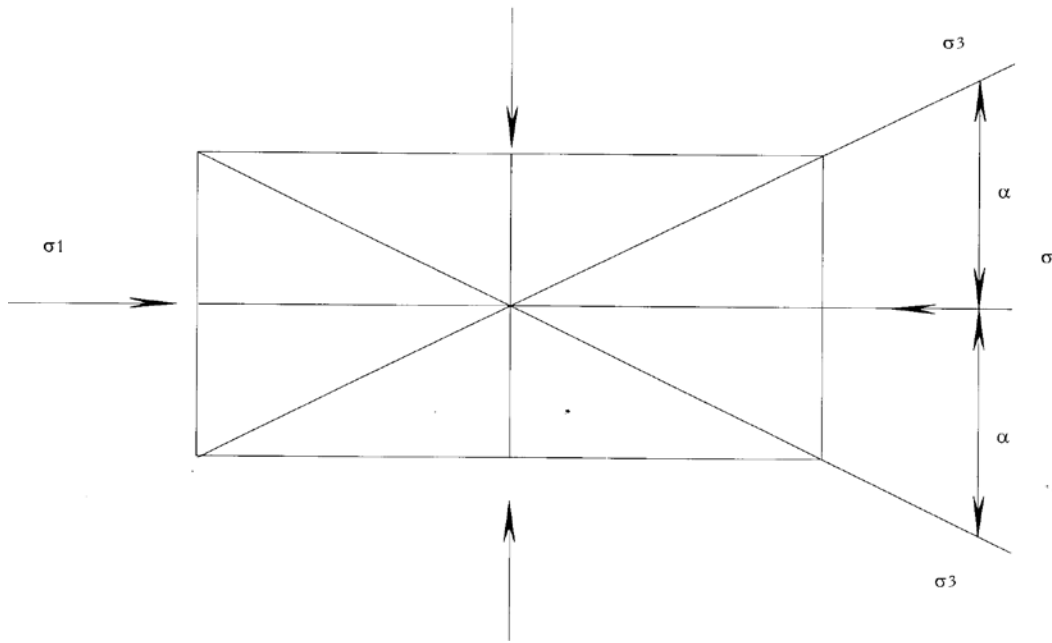
$$\sigma_3 = (0.2 \div 2)\sigma_5,$$

რაც კარგად ეთანადება პრაქტიკის მონაცემებს. ეს დამოკიდებულება ვერ აისახება მორი-კულონის სიმტკიცის თეორიით.

### 4.3 ქანების პლასტიკურობა

ქანები პლასტიკურ თვისებებს, ძირითადად, სიმტკიცის ზღვარზე ამჟღავნებენ და პლასტიკური დეფორმაციების მიმდინარეობის სრულ პროცესში სრულდება სიმტკიცის პირობა. ამიტომ, სიმტკიცის (4.12)(4.13)(4.14) პირობები, ამავე დროს, პლასტიკურობის განტოლებასაც წარმოადგენენ. ამ შემთხვევაში პლასტიკური დეფორმაციები ვითარდება მაქსიმალური მთავარი ძაბვის  $\sigma_1$  -ის მიმართ,  $\alpha$ -ს კუთხის დახრით (ნახ.4.5.), ზედაპირზე ქანების დაშლის ურთიერთ სრიალის შედეგად. ამ უბნებს სრიალის მოედნებს უწოდებენ. როგორც ნახ 4.5 ნახაზიდან ჩანს  $2\alpha=90^\circ$  – ფ ანუ:

$$\alpha = \pm \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$



ნახ.4.5.

აქ ნიშანი გვიჩვენებს, რომ სრიალს ადგილი აქვს ორთავე მიმართულებაზე. დაძაბულ მდგომარეობაში მყოფი ქანის ყოველი წერტილისთვის შეგვიძლია ვიპოვოთ სრიალის მოედნები. სრიალის მომენტის თანახმად თითოეულ წერტილში, მის მხებდად გატარებული ზედაპირი წარმოადგენს სრიალის ზედაპირს. სრიალის **ზედაპირის გადაკვეთას რაიმე სიბრტყესთან სრიალის ხაზი ეწოდება**. ჩვეულებრივ, სრიალის ზედაპირებს რთული მოხაზულობა აქვს. მათი კონფიგურაცია დამოკიდებულია მთავარი ძალების ორიენტაციაზე, სივრცის ყოველ წერტილში. ქანებისთვის, ძირითადად, ორი სახის პლასტიკურობაა დამახასიათებელი. პლასტიკურობის ერთ შემთხვევაში ადგილი აქვს ქანების ცალკეული წერტილების ურთიერთგადაადგილების სრიალს, სრიალში დამატებითი დრეკადი დეფორმაციების გარეშე. ურთიერთგადაადგილებისთვის საჭიროა გადაილახოს ამ ნაწილებს შორის მოქმედი შეჭიდულობისა და ხახუნის ძლა. პროცესი მიმდინარეობს რღვევის გარეშე, ე.ი პლასტიკური დეფორმაციების მთელ პროცესში  $K=const$ . ამ სახის პლასტიკური დეფორმაციების მოდელი ნაჩვენებია ნახ. 4.6-ზე.

ნახაზიდან ჩანს, რომ ამ სახის პლასტიკური დეფორმაციების დროს შეიძლება ძაბვებისა და დეფორმაციებს შორის ისეთი ცალსახა დამოკიდებულების დადგენა,



როგორც ეს დრეკადობის შემთხვევაში ხდება. რადგან ძაბვების ერთ მნიშვნელობას დეფორმაციების უამრავი მნიშვნელობა შეესაბამება, ამ სახის პლასტიკურობას **იდეალურ პლასტიკურობას** უწოდებენ. დეფორმაციების პროცესში ქანი უკუმშვადია და მისი მოცემულობით დეფორმაცია ნულის ტოლია,  $\epsilon_v=0$ . ასეთი სხეულის მოდელირებისთვის იყენებენ სენ-ვენანის მოდულის ელემენტს. (ნახ. 4.6<sup>ა</sup>)

პლასტიკურობის მეორე შემთხვევაში, პლასტიკურ დეფორმაციებთან ერთად, ვითარდება დრეკადი დეფორმაციები, ე.ი ენერგია იხარჯება დრეკად დეფორმირებაზე. ასეთ პლასტიკურობას ხშირად უწოდებენ პლასტიკურობას განმტკიცებით. მისი მოდებისთვის სენ-ვენანის ელემენტს უმატებენ დრეკადი სხეულის მოდულს-ჰუკის ელემენტს, რომელიც დრეკად ზამზარას წარმოადგენს. (ნახ.4.6<sup>ბ</sup>)



ნახ.4.6

ქანებში პლასტიკური დეფორმაციების თეორიულად შესწავლის დროს, გამოიყენება პლასტიკურობის დეფორმატული თეორია ან პლასტიკურობის დენადობის თეორია. ქანებში პლასტიკური დეფორმაციები არ შეიძლება რღვევის გარეშე უსასრულოდ გაგრძელდეს, ამ თვალსაზრისით მათ პლასტიკურ თვისებას, პლასტიკური დეფორმაციების ზღვრული მნიშვნელობები, პლასტიკური მაჩვენებელი  $\Pi_\epsilon$ - განისაზღვრება შემდეგი ფარდობითობიდან:

$$\Pi_\epsilon = \frac{\epsilon_1^a}{\epsilon_1^b},$$

ხოლო პლასტიკური ქანების სიმტკიცის პირობა შეიძლება ასეც ჩაიწეროს:

$$\epsilon_1^b = \epsilon_1^a \cdot \Pi_\epsilon .$$

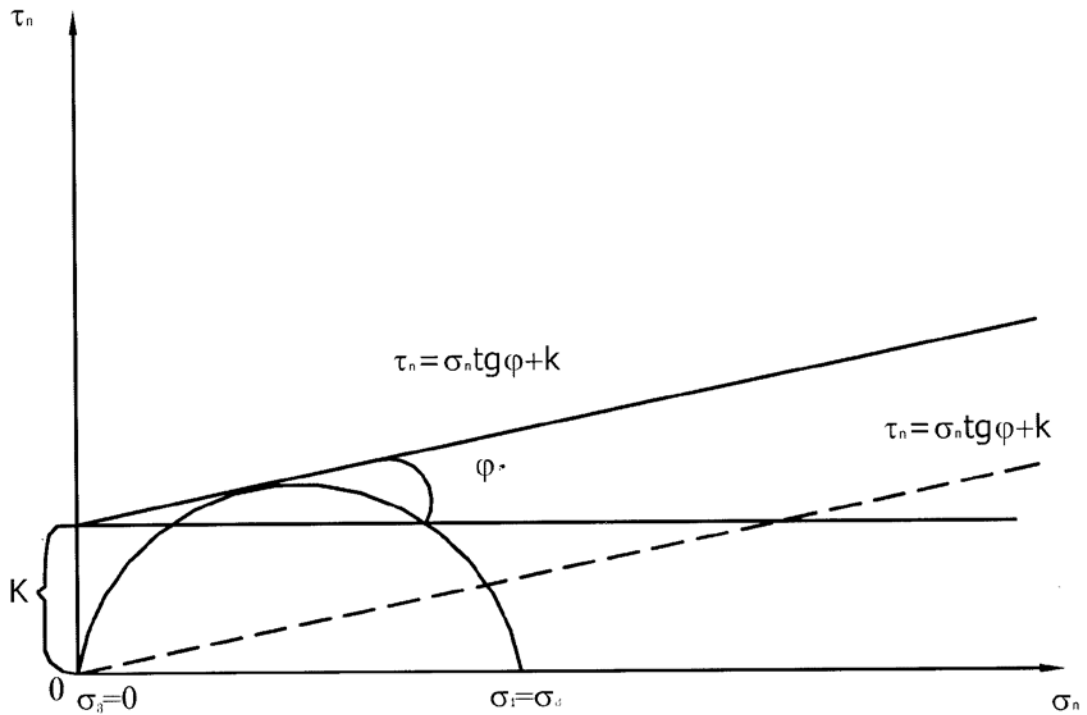
თიხოვანი ქანების პლასტიკურობა დამოკიდებულია მის კონსისტენციაზე დენადობის ზღვარზე  $W_{ფ}$ , პლასტიკურობის ზღვარზე  $W_{ჰ}$ , და პლასტიკურობის რიცხვზე  $W$ , ამასთანავე:

$$W = W_{ფ} - W_{ჰ} .$$

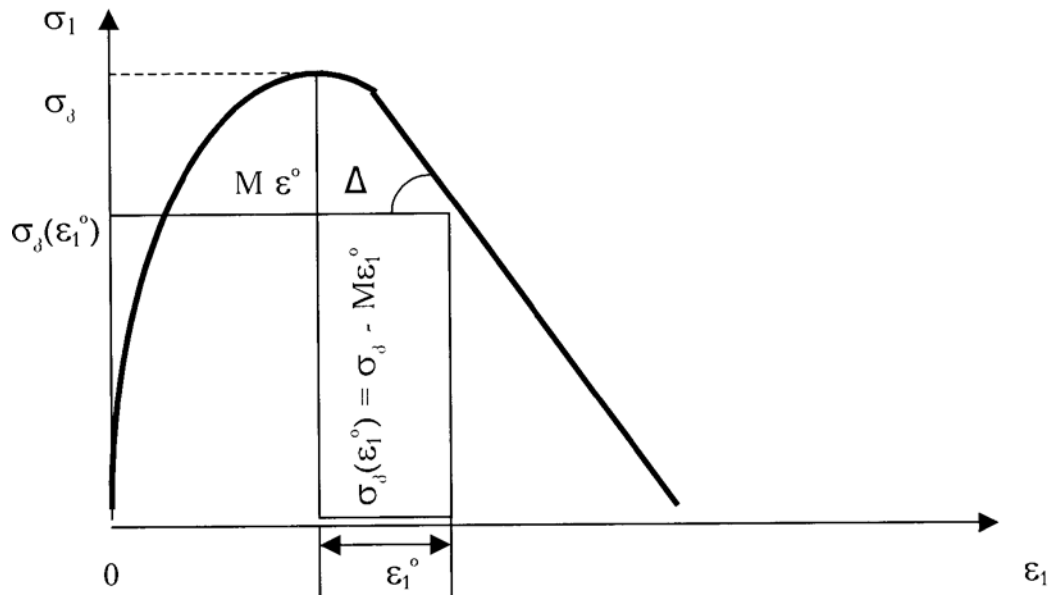
#### 4.4 ქანების რღვევა

როგორც ზემოთ აღინიშნა, რღვევის პროცესში ხდება შეჭიდულობის ძალების შემცირება. რღვევის პროცესის ამსახველი განტოლება ადვილად შეიძლება მივიღოთ (4.12) ფორმულიდან, ამისთვის შევცვალოთ მასში პარამეტრი  $k$  უფრო მარტივად განსასაზღვრავი პარამეტრით  $\sigma_3$  (4.14) ფორმულიდან მივიღეთ:

$$k = \frac{\sigma_3(1-\sin\varphi)}{2\cos\varphi} \quad (4.16)$$



ნახ.4.7



ნახ.4.8

(4.15)ფორმულის (4.12)ფორმულაში შეტანით ადვილად მივიღებთ სიმტკიცის პირობის ახალ ფორმულას:

$$\sigma_1 = a\sigma_3 + \sigma_3(4.17)$$

სადაც 
$$a = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$$

Z რღვევის პროცესში რღვევის დეფორმაციები იწვევენ შეჭიდულობის ძალებს და, შესაბამისად,  $\sigma_3$  შეამცირებს, ე.ი რღვევის დეფორმაციების ფუნქციას. ამის გათვალისწინებით 4.17 ფორმულა მიიღებს სახეს:

$$\sigma_1 = a \cdot \sigma_1(\epsilon_1^n) \quad (4.18)$$

რღვევის დეფორმაციით გამოწვეული სიმტკიცის ზღვრის შემცირება (ნახ 4.8)ტოლი იქნება:  $M\epsilon_1^n$ , სადაც  $M=\text{tga}$  ხოლო სიმტკიცის ზღვრის მნიშვნელობა

$$\sigma_1(\epsilon_1^n) = \sigma_5 - M\epsilon_1^n \quad (4.19)$$

(4.14)ფორმულის გათვალისწინებით სიმტკიცის პირობას (4.18) რღვევის პროცესისთვის ექნება სახე:

$$\sigma_1^n = a \cdot \sigma_2^n + \sigma_5 - M\epsilon_1^n \quad (4.20)$$

მონოლითური, ჯერ კიდევ დაურღვეველი ქანებისთვის,  $\epsilon_1^n = 0$  და (4.21)-დან მიიღება (4.18) ხოლო დარღვეული, დაშლილი ქანებისთვის  $\sigma_5 - M\epsilon_1^n = 0$  და (4.21) იღებს სახეს:

$$\sigma_1 = a\sigma_2 \quad (4.21),$$

რაც (4.13) ფორმულის პირობის ეკვივალენტურია.

რღვევის პროცესში კავშირი განივ  $\varepsilon_3^n$  და გრძივ  $\varepsilon_1^n$  დეფორმაციებს შორის მყარდება განივი დეფორმაციების კოეფიციენტის  $\beta$ -ს მეშვეობით:

$$\varepsilon_3^n = -\beta \varepsilon_1^n \quad (4.21).$$

აღსანიშნავია, რომ სამთო ქანებისთვის როგორც წესი  $\beta > 0$  ე.ი. რღვევის პროცესში ადგილი აქვს მოცულობის მატებას.

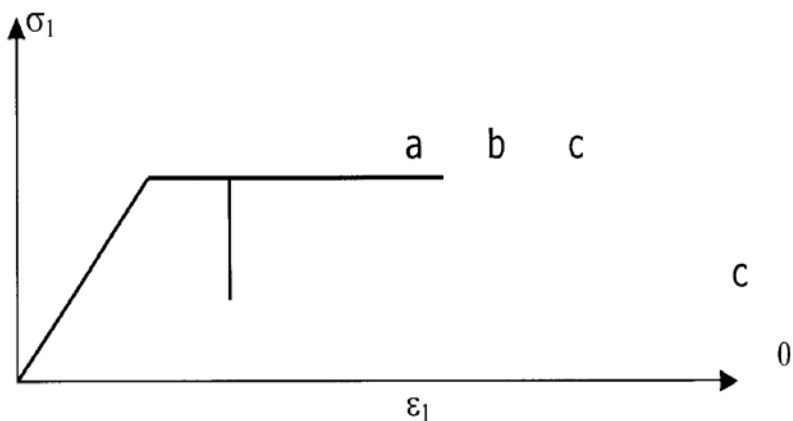
მორის სიმტკიცის დიაგრამაზე რღვევის პროცესის ილუსტრირების მიზნით ჩავწერთ (4.15) ფორმულას რღვევის (4.19) განტოლების გათვალისწინებით.

$$K(\varepsilon_1) = \frac{1-tg\varphi}{2} (\sigma_5 - M\varepsilon_1^n) \quad (4.22)$$

რაც იმის მანიშნებელია, რომ რღვევის დეფორმაციის განვითარებასთან ერთად, მორის წრის შემომვლელი გადაადგილება ქვემოთ, საწყისი მდგომარეობის პარალელურად. (რადგან რღვევის პროცესში ხახუნის კუთხე არ იცვლება  $\varphi = \text{const}$ ) სრული რღვევის მომენტისთვის (როცა  $\sigma_5 - M\varepsilon_1^n = 0$  ანუ  $K(\varepsilon_3) = 0$ ) დაიჭერს (ნახ4.7) პუნქტინით ნაჩვენ მდგომარეობას, რაც ფხვიერი ქანის წრის შემოვლებას შეესაბამება.

რაც უფრო მყიფეა ქანი, მით უფრო დიდია დეფორმაციის მოდულის მნიშვნელობა. იდეალურად მყიფე ქანებისთვის  $M \rightarrow \infty$  ე.ი.  $a = 90^\circ, \sigma_1 - \varepsilon_3$  დიაგრამაზე ასეთი ქანებისთვის bc უბანი მიმართულია ვერტიკალურად ქვემოთ, ე.ი ასეთ ქანებში რღვევა მიმდინარეობს მყისიერად. ასეთი ქანების დიაგრამაზე პლასტიკურობის უბანი, როგორც წესი, არ გვაქვს.

რაც უფრო პლასტიკურია ქანი, მით უფრო მცირდება M მოდულის მნიშვნელობა და იდეალურად პლასტიკური ქანებისთვის  $M=0$  (ნახ4.9).

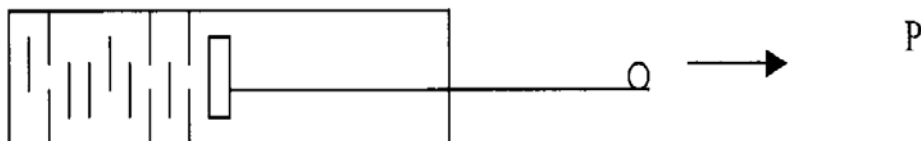


ქანების დრეკადობის, სიმტკიცის, პლასტიკურობისა და რღვევის ზემოთ მოყვანილი თვისებები, სამართლიანია მხოლოდ მათი კუმშვის შემთხვევისთვის. გაჭიმვის დროს, ქანებში სწრაფად ვითარდება რღვევის პროცესები და დეფორმაციების გამოყოფა  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  დიაგრამაზე ვერ ხერხდება.

#### 4.5 ქანების რეოლოგიური თვისებები.

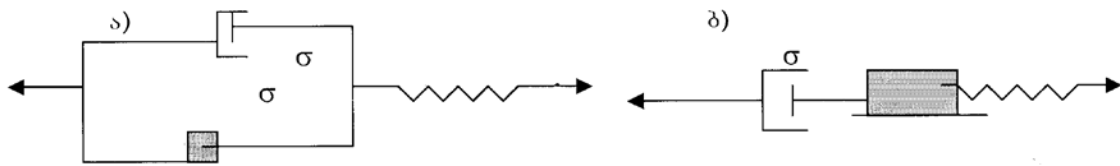
რეოლოგია არის მეცნიერება ნივთიერებათ დრეკადობისა და დენადობის შესახებ. დატვირთვის ხანგრძლივი მოქმედება იწვევს დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლილებას. სწორედ ამ ცვლილების კანონზომიერებებს შეისწავლის რეოლოგია.

რეოლოგიური პროცესების თეორიული მოდელი პირველად კელვინმა შექმნა, ის ქანის ჩონჩხს განიხილავდა, როგორც ფორიან დრეკად სხეულს, რომლის ფორები შევსებულია ბლანტი სითხით. ასეთი სისტემის დატვირთვის დროს, დრეკადი დეფორმირდება მისი ჩონჩხი, ჩონჩხის ნაწილაკების ურთიერთგადაადგილების დროს, მათ შესახებ ზედაპირზე ადგილი ექნება ხახუნს და, გარდა ამისა, ენერჯის ნაწილი დაიხარჯება ბლანტი სითხის მოძრაობაზე. ასეთი სისტემის დრეკადი მოდელებისთვის იყენებენ დრეკად მოდულად ჰუკის ელემენტს, პლასტიკურ მოდულად სენ-ვენანის ელემენტს, ხოლო ბლანტი სითხის მოძრაობის გავლენით – ნიუტონის ელემენტს, (ნახ.4.9) რომელიც



ნახ.4.10.ნიუტონის სახელის მოდულის ელემენტი.

სხვადასხვა ქანის რეოლოგიური მოდელის მოდულის ასაგებად ჰუკის, სენ-ვენანის და ნიუტონის მოდელების შეერთების სხვადასხვა კომბინაციებს იყენებენ. (ნახ.4.10) ნაჩვენებია შვედობისა(4.11<sup>ა</sup>) და მაქსველის(ნახ.4.11<sup>ბ</sup>)მოდელები:



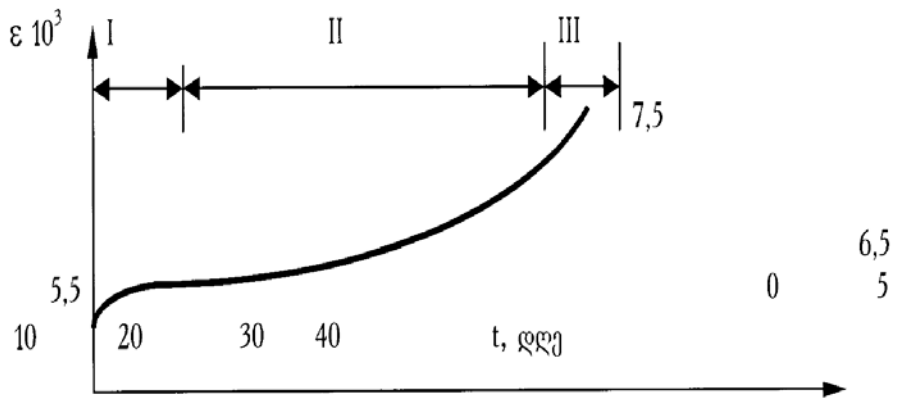
ნახ.4.11.ქანების რეოლოგიური თვისებებია ცოცვადობა და რელაქსაცია.

უცვლელი დატვირთვის ქვეშ მყოფი ქანების მინერალური ჩონჩხის დეფორმაციებს დროში-ცოცვადობა ეწოდება.

ცოცვადობა პლასტიკური დეფორმაციაა, რომელთა რეალიზაციაც დროში ხდება. ისინი შიძლება განვითარდნენ დრეკადობის ზღვარზე, ნაკლები დატვირთვის დროსაც კი.

ცოცვადობის მრუდი სამი უბნისაგან შედგება, რომლებიც დეფორმირების სამ სტადიას შეესაბამება(ნახ. 4.12).

1. ქანების დაუმყარებელი ცოცვადობა.
2. დამყარებული პლასტიკური დენადობის მდგომარეობა მუდმივი დატვირთვის დროს.
3. დეფორმაციის სიჩქარის ზრდა და ქანის რღევვის მომენტის დადგომა.



ნახ. 4.12.

ქანის დეფორმაციის სიჩქარე ტოლია  $\epsilon_e$  და პლასტიკური  $\epsilon_3$  დეფორმაციის სიჩქარის ჯამის.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\epsilon_e}{dt} + \frac{d\epsilon_3}{dt} \quad (4.23)$$

პლასტიკური დენადობის დეფორმაციათა სიჩქარე მიღებული ძაბვების პირდაპირპროპორციულია.

$$\frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon_5}{dt} \quad (4.24)$$

სადაც  $\eta$  სიბლანტის კოეფიციენტია მაშინ, თუ გავითვალისწინებთ  $\varepsilon_{\infty} = \frac{\sigma}{E}$  (4.23) ფორმულიდან დან:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\sigma}{E dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (4.25)$$

(4.25) განტოლებას ცოცვადობის განტოლება ეწოდება.

თუ დავუშვებთ, რომ  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$  ე.ი დროში ძაბვების ცვლილება არ ხდება, მივიღებთ :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (4.26)$$

ამ პირობებში, მუდმივი ძაბვის მოქმედების პროცესში ხდება ქანების უწყვეტი დეფორმირება.

დროის ნებისმიერ  $t$  მომენტში ცოცვადობის დეფორმაცია დამოკიდებულია დატვირთვის წინა ისტორიაზე დროის  $t$  მომენტიდან; ამ თვისებას **მემკვიდრეობითობას უწოდებენ**, ხოლო ფუნქციას რომელიც ფუნქციის, დეფორმირებას ასახავს, **ცოცვადობის ბირთვი ეწოდება**.

მნიშვნელოვანი ცოცვადობა ახასიათებს თიხებს, არგელიტებს, თიხაფიქლებს, კვარცის ფრიციტულ ფიქლებს, ქვიშებს და სხვა ქანებს. მათი ცოცვადობა საშუალოდ პირველადი მყისიერი დრეკადი დეფორმაციების 20÷35%-ს შეადგენს. ამ დეფორმაციების ძირითადი ნაწილის რეალიზაცია პირველი 1,2÷2 დღე-ღამის განმავლობასი ხდება.

მუდმივი დეფორმაციების დროს, ქანებში დაძაბულობის თანდათან შემცირებას **რელაქცია ეწოდება**. ამრიგად, ის ცოცვადობის შებრუნებულ მოვლენას წარმოადგენს.

თუ რეოლოგიური პროცესის დროს დავაფიქსირებთ დეფორმაციებს, ე.ი  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$  მაშინ  $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$  მაშინ (4.25)-დან მივიღებთ:

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0 \quad \text{საიდანაც: } \sigma = \sigma_0 \frac{t}{t_0}, \quad (4.27)$$

სადაც  $t_0$  - რელაქციის დროა, რომლის განმავლობაშიც ძაბვების მნიშვნელობები 1-ჯერ მცირდება, რელაქციის დრო ქანების უმრავლესობისთვის ძალიან დიდია; კლდოვანი ქანებისთვის ის 100-1000 წელია, მიწისთვის 100 წელია, წყლისთვის კი  $10^{-11}$  წამი.

## 4.6 ქანების სიმაგრე

დატვირთვების მიმართ ქანების სიმტკიცის განსაზღვრა საკმაოდ რთული საკითხია, ამიტომ, ქანების წინააღმდეგობის უნარის წინასწარი შეფასების მიზნით, სამთო საქმეში ხშირად გამოიყენება სიმაგრის კოეფიციენტის ცნება. ის პროფ. პროტოლიაკონოვმა საუკუნის დასაწყისში შემოიტანა და ქანების სიმტკიცის პირობის გამარტივებულ შინაარსს აგებული. კერძოდ, თუ სიმტკიცის პირობის (4.10) განტოლების ორთავე მხარეს გავყოფთ  $\sigma_n$ -ზე მივიღებთ:

$$f = \frac{\tau_n}{\sigma_n} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{k}{\sigma_n} = \operatorname{tg} \varphi_1$$

სადაც  $f$  - პროფ. პროტოლიაკონოვის განმარტებით, შინაგანი ხახუნის მოჩვენებითი კოეფიციენტია,  $\varphi_1$ -მოჩვენებითი ხახუნის კუთხეა,

მოგვიანებით, პროფ. პროტოლიაკონოვმა  $f$ -ს სიმაგრის კოეფიციენტი უწოდა და მისი გაანგარიშების გამარტივების მიზნით შემოიტანა სიმაგრის ემპირიული ფორმულა:

$$f = \frac{\sigma_3}{100}, \quad (4.28)$$

სადაც  $\sigma_3$  სიმტკიცის ზღვარია ერთღერძა კუმშვაზე, მპა.

სიმაგრის კოეფიციენტის მნიშვნელობათა მიხედვით, პროფ. პროტოლიაკონოვმა ქანების კლასიფიკაცია დაჰყო 10 კატეგორიად. სიმაგრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა 20-ის ტოლია.

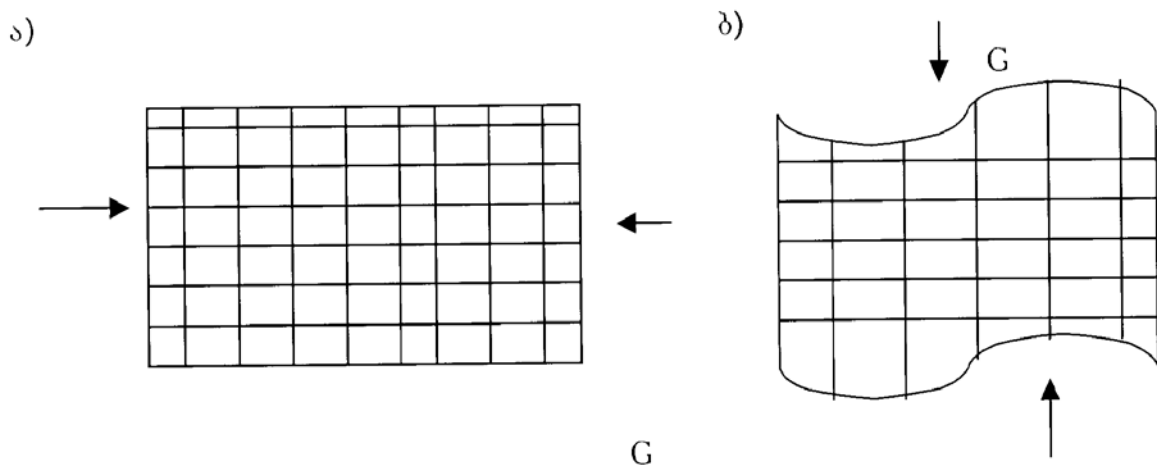
## 5. ქანების აკუსტიკური თვისებები

თუ ქანის ზედაპირზე მყისიერად ვიმოქმედებთ ნიშანცვლადი დატვირთვით, მასში გავრცელდება დრეკადი რხევები (ტალღები).

ქანებში დრეკადი რხევების გავრცელების კანონზომიერებას აკუსტიკური თვისებები განსაზღვრავს.

დრეკადი დეფორმაციის სახის მიხედვით ქანებში აღძრული ტალღები შეიძლება იყოს გრძივი და განივი. (ნახ.5.1)





ნახ.5.1.

ა) გრძივი ტალღები

ბ) განივი ტალღები

გრძივი ტალღების წარმოშობა ხდება კუმშვისა და ჭიმვის დეფორმაციათა მორიგეობით გავრცელების დროს.

გრძივი ტალღები შეიძლება გავრცელდეს როგორც მყარ სხეულებში, ასევე სითხეებსა და გაზებში. განივი ტალღების გავრცელება კი შესაძლებელია მხოლოდ მყარ სხეულებში.

განივი და გრძივი ტალღები ქანის მთელ მოცულობაში ვრცელდება, ამიტომ, მათ მოცულობით ტალღებს უწოდებენ.

ქანის ზედაპირზე განლაგებული ნაწილაკები განსაკუთრებულ მდგომარეობაში იმყოფებიან, რადგან თავისუფალი ზედაპირის გადაადგილების დროს ნაკლებ წინააღმდეგობას აწყდებიან. ამის გამო თავისუფალ ზედაპირზე ბრტყელი ზედაპირული ტალღები, რომლებიც ქანის ნაწილაკთა ელიფსოიდურ ტრაექტორიებზე რხევით ხასიათდებიან. ზედაპირული ტალღები მხოლოდ მყარ სხეულებში წარმოიქმნებიან.

დრეკადი ტალღები, რხევის სიხშირის მიხედვით, იყოფიან სამ ჯგუფად:

- ინფრაბგერული ტალღები-(20ჰც-მდე სიხშირით),
- ბგერული (20-20000 ჰც მდე სიხშირით),
- ჰიპერბგერული (1000 მჰც-ზე მეტი სიხშირით).

ქანების ძირითადი აკუსტიკური მახასიათებელია – დრეკადი ტალღების გავრცელების სიჩქარე, შთანთქმის კოეფიციენტი და ტალღური წინააღმდეგობა.

სხვადასხვა ქანთა საკონტაქტო ზედაპირზე ადგილი აქვს ტალღების არეკვლისა და გარდატეხის მოვლენებს. ეს მოვლენები შესაბამისად ირეკლება და გარდატეხის კოეფიციენტით ხასიათდებიან.

დრეკადი ტალღის სიჩქარედ მისი ფრონტის გავრცელების სიჩქარე მიიღება.

ტალღის ფრონტი–ეს გარემოს წერტილთა გეომეტრიული ადგილია, რომელშიც დროის მოცემულ მომენტში ტალღის ფაზის ერთი და იგივე მნიშვნელობა აქვს. გრძივი დრეკადი ტალღის გავრცელების სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$V_{გრძ} = \sqrt{\frac{E(1-\eta)}{p(1+\eta)(1-2\eta)}} \quad (5.1)$$

ხოლო, განივი ტალღები ფორმულით

$$V_{გრძ} \sqrt{\frac{E}{2p(1+\eta)}} = \sqrt{\frac{G}{p}} \quad (5.2)$$

ზედაპირული ტალღების გავრცელების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$V_{გრძ} = \frac{(0.87+1.12\eta) \cdot \sqrt{G}}{1+\eta} \quad (5.3)$$

განივი ტალღების გავრცელების სიჩქარე კი ტოლია :

$$V_{გრძ} = \sqrt{\frac{E}{p(1-\eta)^2}} \quad (5.4)$$

## 6. ქანების თბური თვისებები

### 6.1 ქანებში სითბოს დაგროვებისა და გავრცელების კანონები.

ქანების მიერ სითბოს შთანთქმით იცვლება მოლეკულათა და ატომების რხევის სიხშირე და ამპლიტუდა, ე.ი იცვლება მათი კინეტიკური ენერგია. რაც ქანში ტემპერატურის ცვლილებით აღინიშნება. თუ dQ-თი ავლნიშნავთ სითბოს რაოდენობას, რომელიც ქანის შიდა ენერგიაში გადადის, ხოლო dT-თი ტემპერატურის ცვლილებას, მაშინ :

$$dQ=CdT \quad (6.1)$$

სადაც  $C$  ქანის თბოტევადობაა და ახასიათებს, ტემპერატურის ერთი გრადუსით ცვლილების შედეგად, თბური ენერჯის შეცვლა.

თუ ქანის თბოტევადობას გახურებული ქანის მასაზე გავყოფთ, მივიღებთ კუთრი სითბოტევადობის მნიშვნელობას:

$$C = \frac{c}{m} \quad (6.2)$$

(6.1) ფორმულის გათვალისწინებით, ეს უკანასკნელი შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$C = \frac{dQ}{m \Delta T} \quad (6.3)$$

ამრიგად, კუთრი სითბოტევადობა გვიჩვენებს სითბოს რა რაოდენობაა საჭირო ქანის ერთეული მასის ერთი გრადუსით გასათბობად.

ერთგვაროვან მყარ სხეულებში სითბო ვრცელდება ანელექტრონული ღრუბელის გადაადგილებით ან კრისტალური მესრის რხევათა ერთი ნაწილაკიდან მეორეზე გადაცემით.

თბოგამტარობის პირველ ტიპს ელექტრონული ეწოდება, იგი დამახასიათებელია, უპირატესად, დენგამტარი გარემოსთვის, ლითონებისა და ნახევარგამტარებისთვის.

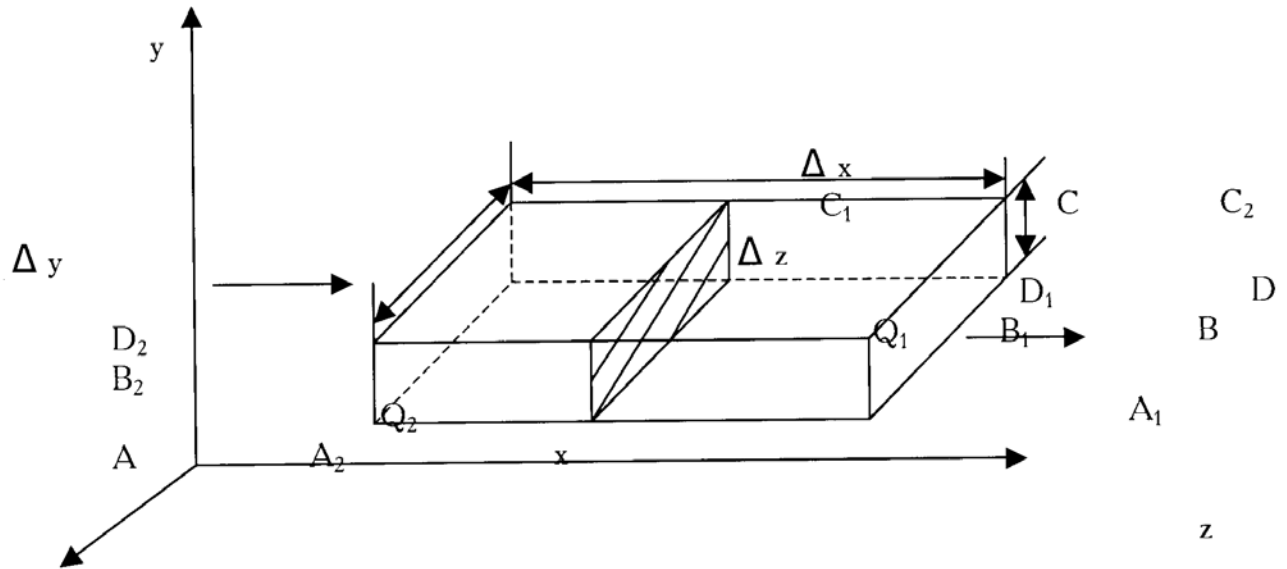
ელექტრომაგნიტური ველის თეორიაში მიღებული ცნების–ფონის მსგავსად, მესრული თბოგამტარობის შემთხვევაში, იყენებენ კვაზინაწილაკის–ფინონის ცნებას. ფინონი ენერჯის მატარებელია, ამიტომ, თბოგამტარობის მეორე ტიპს, ხშირად, ფინოფურს უწოდებენ. თითოეულ ფინონს, ფიტონის მსგავსად საკუთარი ენერჯია აქვს, რომელიც შეიძლება ვიანგარიშოთ შემდეგი ფორმულით. :

$$\varepsilon = h \cdot f ,$$

სადაც  $h$  პლანკის მუდმივია, ( $h=1,0546 \cdot 10^{-34}$  ჯ წმ), ხოლო  $f$  თბური რხევათა სიხშირეა ჰც. ქანებში სითბოს გატარება, ძირითადად, ფონურია, თუმცა, ლითონშემცველ ქანებში თბოგამტარობის ელექტრონულ მდგენელსაც არსებითი მნიშვნელობა ენიჭება.

თბოგამტარობის შესამოწმებლად განვიხილოთ ქანის მართკუთხა პრიზმის მოდელი სითბურ ველში (ნახ.6.1) ნიმუშის განაკვეთის ფართობი  $\Delta S = \Delta y \cdot \Delta z$ , ვთქვათ ნიმუში  $X$  ღერძის გასწვრივ, მარცხნიდან მარჯვნივ. გადის სითბოს ნაკადი  $A_1, B_1, C_1, D_1$ , ხნაგში -

$Q_1, A_2, B_2, C_2, D_2$  - ში კი -  $Q_2$  პრიზმის დანარჩენი ნაწილები კი თბომიმოცვლაში არ მონაწილეობენ.



ნახ.6.1

ნახ.6.1-ქანის ფორმის ნიშნულ სითბურ ველში  $A_1, B_1, C_1, D_1$ , სიბრტყეში ნიშნულის ტემპერატურა ავლნიშნოთ  $T_1$ -ით, ხოლო  $A_2, B_2, C_2, D_2$  - ში  $T_2$  -ით ( $T_1 > T_2$ ) სითბოს რაოდენობა  $dQ$ , რომელიც ერთი სიბრტყიდან მეორეში  $\Delta S$  ფართობით გადასვლის დროს  $\Delta x$  მანძილს  $dt$  დროში გადის, ტოლია :

$$dQ = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \Delta S dt \quad , \quad (6.5)$$

სადაც  $\lambda$  მოცემული ქანის კუთრი თბოგამტარობის კოეფიციენტი,  $\Delta T = T_1 - T_2$  ფარდობა:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = gradT \quad (6.6)$$

და გვიჩვენებს ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარეს.

დროის ერთეულში ფარდობის ერთეულში გავლილ სითბოს რაოდენობას  $q$ -ს კუთრი თბური ნაკადი ეწოდება:

$$q = \frac{dQ}{\Delta S dt} \quad (6.7)$$

(6.6) და (6.7)-ს გათვალისწინებით, (6.5)-დან მივიღებთ :

$$\lambda = \frac{q}{gradT} \quad (6.8)$$

ამრიგად, თბოგამტარობის კოეფიციენტი გვიჩვენებს სითბოს რა რაოდენობის გატარება შეუძლია მოცემულ ქანს, ფართობის ერთეულში, ტემპერატურის 1°C -ით ცვლილების დროს.

ახლა, ვთქვათ ნიმუშის ცენტრში (ABCD სიბრტყეში) ქანის ტემპერატურა T-ს ტოლია, მაშინ ტემპერატურა ნებისმიერ კვეთში შეგვიძლია გამოვსახოთ  $\frac{DT}{Dx}$  გრადიენტის საშუალებით, მაგალითად:

$$\begin{aligned} T_1 &= T + \frac{1}{2} \frac{DT}{Dx} \Delta x \\ T_2 &= T - \frac{1}{2} \frac{DT}{Dx} \Delta x \end{aligned} \quad (6.9)$$

ამის გათვალისწინებით

$$\begin{aligned} Q_1 &= \lambda \Delta y \Delta z \frac{D}{Dx} \left( t + \frac{1}{2} \frac{DT}{Dx} \Delta x \right) dt \\ Q_2 &= \lambda \Delta y \Delta z \frac{D}{Dx} \left( t - \frac{1}{2} \frac{DT}{Dx} \Delta x \right) dt \end{aligned} \quad (6.10)$$

ჩვენ შემთხვევაში სხვაობა  $Q_1 - Q_2$  გვიჩვენებს ქანის მიერ შთანთქმულ სითბოს რაოდენობას, ის შეიძლება გამოისახოს თბოტევადობის მეშვეობით. (თუ გავითვალისწინებთ რომ  $m = \rho V = \Delta x \Delta y \Delta z DT$ )

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = c \rho \Delta x \Delta y \Delta z DT \quad (6.11)$$

ანალოგიურად (6.10) ფორმულიდან

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \lambda \Delta x \Delta y \Delta z \frac{D^2 T}{Dx^2} dt \quad (6.12)$$

(6.11-სა და 6.12)-ს ერთმანეთთან გატოლებით კი ვღებულობთ თბოგამტარობის დიფერენციალურ განტოლებას ერთგანზომილებიანი თბური ნაკადისთვის:

$$\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{D^2 T}{Dx^2} - \frac{DT}{Dt} = 0. \quad (6.13)$$

(6.13)-ს ფურიეს განტოლება ეწოდება და მოცულობითი სითბური ნაკადების შემთხვევაში ასე ჩაიწერება:

$$a \nabla^2 - \frac{DT}{Dt} = 0, \quad (6.14)$$

სადაც  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  ქანის ტემპერატურა გამტარობა, მ<sup>2</sup>/წმ;  $\nabla^2$  ლაპლასის ოპერატორია.

ტემპერატურა გამტარობა გვაჩვენებს ქანში იზოთერმული სიბრტყის გავრცელების სიჩქარეს.

თუ ქანში სითბოს შთანთქვა არ ხდება, (6.14) ფორმულიდან ვღებულობთ ლაპლასის განტოლებას:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (6.15)$$

რომელიც ერთგანზომილებიანი სითბური ნაკადისთვის ღებლობს ასეთ სახეს:

$$\frac{D^2 T}{Dx^2} = 0. \quad (6.16)$$

ამ შემთხვევაში სითბური ნაკადი არ არის დამოკიდებული დონეზე, ასეთ ნაკადებს **სტაციონალურ ნაკადებს** უწოდებენ. ქანებში სითბური ნაკადი, როგორც წესი, არასტაციონალურია.

ზემოთ მოყვანილი დიფერენციალურ განტოლებათა ამოხსნა შესაძლებელია, თუ ცნობილია საწყისი და სასაზღვრო პირობები (ე.ი ტემპერატურა პროცესის დასაწყისში გარკვეულ სასაზღვრო ზედაპირებზე); მათი ამოხსნა საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ ქანში მიმდინარე სითბური პროცესები.

თბოგამტარობის კერძო შემთხვევას, როდესაც სითბო სასაზღვრო ზედაპირის გავლით ერთი ქანიდან მეორეში გადადის, **თბოგადაცემა ეწოდება**. ის განისაზღვრება (6.5) ფორმულის ანალოგიური ფორმულით:

$$\Delta Q = k_a \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t, \quad (6.17)$$

სადაც  $K_a$  თბოგადაცემის კოეფიციენტია და დამოკიდებულია შემხები ზედაპირის ორთავე მხარეს განლაგებული ქანების თვისებებზე. თბოგადაცემას არამარტო ქანებს შორის, არამედ ქანსა და სითხის ან აირს შორისაც აქვს ადგილი.

შთანთქმული სითბო მთლიანად ქანის გახურებას როდი ხმარდება, როგორც თერმოდინამიკიდანაა ცნობილი, სითბოს ნაწილი იხარჯება გარე მუშაობაზე. რაც ძირითადად სითბურ გაფართოებასთანაა დაკავშირებული. სითბური გაფართოება, გამოწვეული გახურების შედეგად კრისტალურ მესერმიატომთა რხევის ამპლიტუდის გაზრდის შედეგია მერხევი ატომების წონასწორობის ცენტრების ურთიერთსაწინააღმდეგო გადაადგილების გამო. ზემოთ განხილული მაგალითისთვის ე.ი ერთგანზომილებიანი სითბური ნაკადის ცვლილების შემთხვევაში, ტემპერატურის ცვლილებას  $dT$ -სა და ნიმუშის წაგრძელებას  $dl$ -ს შორის კავშირი შემდეგნაირად გამოისახება:

$$dl = a_l dT, \quad (6.18)$$

სადაც  $a_l$  თბური ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტი, 1-ქანის ნიმუშის საწყისის სიგრძეა.

მოცულობითი გაფართოების შემთხვევაში:

$$dv = a_v V dT. \quad (6.19)$$

აქ  $a_v$  თბური გაფართოების კოეფიციენტი,

არათანაბარი გახურების დროს ან განსხვავებული თბური კოეფიციენტების და სხვა დრეკადი თვისებების შემთხვევაში ქანებში, თერმული ძალები აღიძვრებიან.

თუ გახურების დროს  $l$  სიგრძის ქანის ღეროს  $\Delta l$  წაგრძელების საშუალება არ აქვს, მასში აღიძვრება თერმული ძაბვა:

$$\sigma = E_3 \frac{\Delta l}{l} = E_3 a_b \Delta T, \quad (6.20)$$

სადაც,  $E_3$  გახურებული ქანის დრეკადობის მოდულია.

ანალოგიურად, მოცულობითი გაფართოების შემთხვევაში:

$$\sigma_{ov} = K_b a_v \Delta T, \quad (6.21)$$

სადაც  $K_b$  - გახურებული ქანის მოცულობითი კუმშვის მოდულია.

არათანაბარი გახურების პირობებში ქანის გახურებული უბნები ფართოვდებიან და გახურებული უბნების დეფორმაციას იწვევენ. ამ შემთხვევაში ერთგანზომილებიანი ამოცანისთვის თერმული ძაბვა ტოლი იქნება :

$$\sigma_{ov} = E_b (a_b \Delta T - \varepsilon), \quad (6.22)$$

სადაც  $\varepsilon$  გახურებული ქანის ფარდობითი დეფორმაციაა:

$$\varepsilon \approx \frac{\sigma}{E_0}. \quad (6.23)$$

აქ  $E_0$  ქანის დრეკადობის მოდულია გახურებაზე, (6.23) ფორმულის და (6.22) ფორმულაში გათვალისწინებით მივიღებთ :

$$\sigma = \frac{a_b \Delta T E_0 E_3}{E_0 + E_3}. \quad (6.24)$$

ანალოგიურად, მოცულობითი გაფართოების დროს:

$$\sigma = \frac{a_3 \Delta T K_0 K_3}{K_0 + K_3}. \quad (6.25)$$

## 6.2. ქანების შედგენილობისა და აღნაგობის გავლენა თბურ პარამეტრებზე

რაც უფრო ნაკლებია სხეულის სიმტკიცე, მით უფრო მეტია მისი თბოტევადობა. ამიტომაც რომ ქანების კუთრი თბოტევადობა ლითონებისას ტოლია 0,4-0,2 კჯ/კგ.კელვ.

მკვრივი ქანის კუთრი თბოტევადობა მხოლოდ მის მინერალურ შემადგენლობაზეა დამოკიდებული და შეიძლება ვიანგარიშით შემდეგი ფორმულით, რომელიც ამ შემთხვევაში შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i m_i \quad , \quad (6.26)$$

სადაც  $m_i$  არის  $c_i$  კუთრი თბოტევადობის მქონე მინერალის მასის ფარდობითი შემცველობა ქანში.

თბოტევადობა არ არის დამოკიდებული ქანის აღნაგობაზე, ე.ი იმაზე, შრეულია თუ არა ქანი, კრისტალურია თუ ამორფული მისი სტრუქტურა. მაგალითად, კრისტალური და გამდნარი კვარცის თბოტევადობა ერთნაირია და ტოლია 0.85 კჯ/კგ.კელვ.

თბოტევადობაზე, ხშირად, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ქანის ფორიანობა და ბზარიანობა, რაც გამოწვეულია ქანისა და ჰაერის კუთრი თბოტევადობათა შორის არსებული განსხვავებით.

ქანის მოცულობითი თბოტევადობა:

$$C_V = C\rho$$

ქანის მინერალური შედგენილობის ცოდნის შემთხვევაში შეიძლება ვიანგარიშით ამ ფორმულით.

იმის გამო, რომ ჰაერისათვის  $C_V = 1.29$  კჯ/მ<sup>3</sup>. კელვ. ფორიანი ქანებისთვის შეიძლება დავწეროთ:

$$C_V = C\rho \approx C_0\rho_0(1 - p), \quad (6.27)$$

სადაც  $C_0$  და  $\rho_0$ , შესაბამისად, მინერალური ფაზის თბოტევადობა და სიმკვრივეა.

მინერალები და ქანები, როგორც წესი, სითბოს ცუდი გამტარები არიან. მათი უმრავლესობისთვის 0.1÷7 ვტ./მ.კელვ. შედარებით დიდი თბოგამტარობის უნარით ხასიათდებიან მადნეული მინერალები 30-40 ვტ./მ.კელვ. განსაკუთრებით დიდი თბოგამტარობა ახასიათებს ალმასს 200 ეტ./მკვკ?? რაც კრისტალურ მესერში არსებული



დეფექტების სიმცირით აიხსნება. ქანმაშენი მინერალებიდან ყველაზე დიდი თბოგამტარობა ახასიათებს კვარცს  $7 \div 12$  ვტ./მ.კელვ.

შედარებით მაღალი თბოგამტარობა ახასიათებს გიდროქიმიურ ნალექებს ქვამარილს, სილვინს და ანჰიდრიტს. დაბალი თბოგამტარობა აქვთ ქვანახშირს და აზბესტს.

ქანის თბოგამტარობას შემადგენელი მინერალების სითბოს გატარების უნარი განსაზღვრავს. ქანების დიდი ნაწილისთვის, (რომელიც მინერალების სტატისტიკურ ნარევს წარმოადგენენ) თბოგამტარობა შეიძლება ვიანგარიშოთ ( $C_V = C\rho$ ) ფორმულით.

შრეული ქანებისთვის კუთრი თბოტევადობა შრეულების პარალელურ და პერპენდიკულარულ სიბრტყეში სხვადასხვაა.  $\lambda_{\parallel} \neq \lambda_{\perp}$  მათი მნიშვნელობა შეიძლება ვიანგარიშოთ ( $C_V = C\rho$ ) და  $C_V = C\rho \approx C_0\rho_0(1 - p)$  ფორმულით. შრეული ქანების ანიზოტროპიის კოეფიციენტი იცვლება 1.1-1.5-ის ფარგლებში.

ჰაერის თბოგამტარობა ძალიან მცირეა  $\lambda=0.023$  ვტ./მ.კელვ. ამიტომ, რომ მშრალი ქანების ფორიანობის ზრდასთან ერთად ფორიანობა მცირდება. დიდი მნიშვნელობა აქვს სიცარიელების (ბზარებისა და ფორების) ფორმას და მათ ორიენტაციას. წაგრძელებული ფორების (ე.წ ბზარების) შემთხვევაში თბოგამტარობა მნიშვნელოვნად მცირდება და ისინი განლაგებულნი არიან თბური ნაკადის პერპენდიკულარულად. ამ შემთხვევაში:

$$\lambda^{\perp} = \frac{\lambda_0}{1-p+43,5p\lambda_0}, \quad (6.28)$$

სადაც  $\lambda_0$  მინერალური ფაზის კუთრი თბოგამტარობაა.

თუ თბური ნაკადი ბზარების გასწვრივ არის მიმართული:

$$\lambda^{\perp} = \lambda_0(1-p). \quad (6.29)$$

ამ ფორმულაში უგულებელყოფილია ჰაერის თბოგამტარობა, რადგან მისი მნიშვნელობა ბევრად ნაკლებია  $\lambda_0$ -ზე

(6.28) და (6.29) ფორმულის ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია დავწეროთ, რომ  $\lambda_{\parallel} < \lambda_{\perp}$ .

ფორიანი ქანების თბოგამტარობაზე დიდ გავლენას ახდენს ფორების შემავსებელი გაზებისა და სითხეების თვისებებიც. ქანის დატენიანება იწვევს თბოგამტარობის გაზრდას.

მინერალური მარცვლების ზომა  $d_{საშ}$  მნიშვნელოვნად მოქმედებს თბოგამტარობაზე, როცა  $d_{საშ} \approx l_{ფ}$ , სადაც  $l_{ფ}$  - ფონონის თავისუფალი გარბენის სიგრძეა. ამ შემთხვევაში, რაც უფრო ნაკლებია მარცვლების ზომები, მით მეტია თბოგამტარობა. როცა  $d_{საშ} \gg l_{ფ}$ , თბოგამტარობა არ არის დამოკიდებული მარცვლების ზომაზე. კრისტალური და ამორფული მარცვლების თბოგამტარობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება. როგორც წესი  $\lambda_{კრისტ} < \lambda_{ამორფ}$ .

ქანების ტემპერატურგამტარობა იცვლება საზღვრებში  $10^{-6} - 10^{-7}$  მ<sup>2</sup>/წმ, სიმკვრივის გაზრდით, მისი მნიშვნელობა უმნიშვნელოდ მცირდება.

შრეულება იწვევს ტემპერატურგამტარიანობის ანიზოტროპიას, ამასთანავე  $a_{\parallel} > a_{\perp}$  ფორიანობა და ბზარიანობა ამცირებს ქანის ტემპერატურგამტარიანობას, თბური ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტი  $a_0$  მცირე დიაპაზონში ცვალებადობს ( $10^{-6} \div 10^{-5}$  კელვ<sup>-1</sup>) მისი მნიშვნელობა მით უფრო მეტია, რაც ნაკლებია ქანების ან მინერალების სიმკვრივე. დიდი ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტით ხასიათდებიან: ქვამარილი ( $a_0 = 4 \cdot 10^{-5}$  კელვ<sup>-1</sup>) ქარსები, ფულუორიტი, კვარცი ( $1.3 \cdot 10^{-5}$  კელვ<sup>-1</sup>)

თბური მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობა პოლიმინერალური ქანებისთვის შეიძლება ვიანგარიშოთ ( $C_V = C_p$ ) ფორმულით, თუ ცნობილია მინერალური შედგენილობა:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i K_i V_i}{\sum_{i=1}^n K_i V_i} \quad (6.30)$$

ანალოგიურად

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i K_i V_i}{\sum_{i=1}^n K_i V_i} \quad (6.31)$$

უმრავლეს შემთხვევაში  $a_{\theta} \approx 3a_p$ .

ამრიგად, თბური გაფართოების კოეფიციენტსა და ქანის მინერალურ შემადგენლობას შორის აისახება  $a_i$ ,  $a_0$ ,  $K_i$  და  $V_i$  პარამეტრების მეშვეობით.  $a_i$  და  $V_i$  -ს დიდი მნიშვნელობებით ხასიათდებიან, მაგ. კვარცი, გრანიტი, ქვამარილი, ქარსები?, ფლურიტი და სხვ.

კრისტალებსა და შრეულ ქანებს სხვადასხვა მიმართულებით, სხვადასხვა სითბური გაფართოება ახასიათებთ. მაგალითად, კვარციტის მონოკრისტალი ერთი გრძელდება, სხვადასხვა მიმართულებით კი მოკლდება.

ფორიანობა, ბზარიანობა და კრისტალობა იწვევს ქანის სითბური გაფართოების კოეფიციენტის შემცირებას.

მინერალური შედგენილობის არაერთგვაროვნების გამო, ქანის გახურების დროს, მასში აღიძვრებიან თერმული ძაბვები, რაც იმით აიხსნება, რომ სხვადასხვა მინერალისთვის  $a_i$ ,  $a_0$ ,  $K$  და  $V$  პარამეტრები სხვადასხვა მნიშვნელობას ღებულობენ. თუ სხვადასხვა მინერალის ორი შემხები კრისტალის დრეკადობის მოდელებია  $E_1$  და  $E_2$ , ხოლო, თბური ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტები შესაბამისად  $a_i$  და  $a_0$ -ია, მაშინ ამ კრისტალების გახურების შედეგად მასში აღიძვრება ძაბვა:

$$\sigma_{\sigma} \approx \frac{(a_{b1}-a_{b2})\Delta T \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1+E_2}. \quad (6.32)$$

თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ მატრიცისა და ჩანართის ტემპერატურა შეიძლება სხვადასხვა იყოს, მასში მოცულობის გაფართოების შემთხვევაში რადიალური თბური ძაბვის მნიშვნელობა შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{3E_1E_2[a_1(T_1-T_2)+T_1(a_1-a_2)]}{3E_2(1+\mu_1)+2E_1(1-2\mu_2)}. \quad (6.33)$$

(6.33) ფორმულაში ინდექსი 1 მინიჭებული აქვთ ჩანართის პარამეტრებს, ხოლო 2 მატრიცას.

### 6.3 თბური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები

ქანების სითბური პარამეტრების განსაზღვრის ცნობილი მეთოდები შეიძლება დაიყოს ორ ძირითად ჯგუფად:

1. სტაციონალური სითბური ნაკადის მეთოდი.
2. არასტაციონალური სითბური ნაკადის მეთოდი.

ორივე ჯგუფის მეთოდები ქანების ფიზიკურ ტექნიკური პარამეტრების განსაზღვრის ლაბორატორიულ მეთოდებს მიეკუთვნებიან. ისინი საშუალებას იძლევიან ქანის

ნიმუშში გამავალი სითბოს ნაკადისა და ტემპერატურის გრადიენტის დადგენის საფუძველზე, განვსაზღვროთ სხვა სითბური პარამეტრები.

სტაციონარული სითბური ნაკადის მეთოდები ითვალისწინებენ გამოსაკვლევი ქანის ნიმუშის ერთი ნაწილიდან მეორეში, სითბოს გადაცემის სტაციონალური რეჟიმის შექმნას. ექსპერიმენტისთვის ამზადებენ ფირუიტის ფორმის ნიმუშებს. სპეციალური მოწყობილობის დახმარებით, ნიმუშის ერთ ზედაპირს ახურებენ, მეორეს კი აციებენ. ძალიან მნიშვნელოვანია, რომ ცდის მსვლელობის დროს, გახურებული და გაციებული ზედაპირების ტემპერატურები და, შესაბამისად, სხვაობა, მუდმივი იყოს. სითბოს დანაკარგების მინიმუმამდე შესამცირებლად გამოიყენება სხვადასხვა კონსტრუქციის დამცავი მოწყობილობა.

ამგვარად, ნიმუშში გამავალი სითბოს ნაკადი სტაბილურია, მიმართულია მისი ზედაპირის პერპენდიკულარულად და არ განიბნევა. თბოგამტარობის განტოლება (6.5) ამ შემთხვევაში, მიიღებს ასეთ სახეს :

$$Q = \lambda \cdot S \frac{\Delta T}{\Delta} \Delta t. \quad (6.34)$$

ცდის მსვლელობის პროცესში  $Q$ ,  $S$  და  $\frac{\Delta T}{\Delta}$  პარამეტრების მნიშვნელობები მუდმივია. ნიმუშის ზომები და ფართობი წინასწარაა ცნობილი, ტემპერატურა იზომება თერმოწყველების მეშვეობით, ფიქსირდება ცდის მსვლელობის დრო, ხოლო სითბური ნაკადი გამხურებლის სიმძლავრის ტოლია  $Q=UI$  და, ასევე, წინასწარაა ცნობილი.

ამგვარად, ცდის ჩატარების შემდეგ, (6.34) ფორმულის დახმარებით, შეგვიძლია განვსაზღვროთ ქანის კუთრი თბოგამტარობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა.

$$\lambda = \frac{Q \cdot \Delta}{\Delta T \cdot S \cdot \Delta t}. \quad (6.35)$$

სტაციონალური სითბური ნაკადის რამდენიმე მეთოდი არსებობს, ისინი საშუალებას იძლევიან განვსაზღვროთ თბური პარამეტრები რამდენიმე ნიმუშზე ერთად. შევისწავლოთ ქანების თბური თვისებები მაღალი ტემპერატურის დროს და სხვ.

არასტაციონარული თბური მეთოდების გამოყენების დროს, ქანის ნიმუშების სხვადასხვა ნაწილის ტემპერატურა, ცდის პროცესში, სხვადასხვაა. ეს უკანასკნელი იცვლება თავისთავად ან ექსპერიმენტატორის წინასწარ განსაზღვრული წესით.

მართალია, ამ შემთხვევაში თბოგამტარობის (6.13) განტოლების სირთულის გამო ანგარიში გართულებულია, სამაგიეროდ მნიშვნელოვნად მარტივდება ცდის მსვლელობა. არასტაციონალური თბური ნაკადის მეთოდები, თავის მხრივ, ორ ქვეჯგუფად იყოფა. ესენი არიან, რეგულარული თბური რეჟიმის და არარეგულარული თბური რეჟიმის მეთოდები.

რეგულარული თბური რეჟიმის თეორიის თანახმად, გახურებული სხეულის გაციების პროცესში, მუდმივტემპერატურიან გარემოში, სამ სტადიად მიმდინარეობს. პირველ სტადიაზე სხეულში ტემპერატურა არათანაბრად, ქაოსურად ნაწილდება, მეორე სტადიაში ტემპერატურული ველის ანომალიები ქრება და მყარდება რეგულარული რეჟიმი. ამ სტადიაში ქანის ნიმუშის ტემპერატურა იცვლება ექსპონენციალური კანონით:

$$\Delta t = AU^{-m\tau}, \quad (6.36)$$

სადაც  $A$  მუდმივია, რომელიც საწყისის პირობებით განისაზღვრება.

$U$  სისტემის კოორდინატთა ფუნქციაა,  $m$ - გაციების ტემპია და დამოკიდებულია ქანის ნიმუშის ფორმაზე, მის ზომებზე და თბურ პარამეტრებზე  $t$ -გაციების დროა.

მესამე სტადია-თბური წონასწორობის სტადია. ამ ეტაპზე ნიმუშის ტემპერატურა ეტოლება გარემოს ტემპერატურას, რის გამოც თბოგაცემის პროცესიც წყდება.

თუ, გაციების მეორე სტადიის დროს გავზომავთ ნიმუშის ტემპერატურას, მაშინ (6.35) ფორმულის დახმარებით, ადვილად დავადგენთ გაციების ტემპის ცვლილებას.

ნიმუშის ინტენსიური გაციების შემთხვევაში, თბოგადაცემის კოეფიციენტის მნიშვნელობა შეიძლება ავიღოთ უსასრულოდ დიდი. მაშინ, ქანის ტემპერატურაგამტარობა შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით :

$$a = m_{\infty}K, \quad (6.37)$$

სადაც  $m_{\infty}$  - გაციების ტემპია, როცა  $a \rightarrow \infty$ ;  $K$  - კოეფიციენტია, რომელიც ითვალისწინებს ნიმუშის ფორმას.

არარეგულარული რეჟიმის მეთოდებიდან ყველაზე მეტად გავრცელებულია თბური იმპულსის მეთოდი, რომელიც ქანის ნიმუშში სითბოს იმპულსის შექმნაზეა დამყარებული.

ქანის თბური პარამეტრების დასადგენად ნიმუშზე ზემოქმედებენ ხანმოკლე თბური იმპულსებით და ადგენენ ნიმუშთან სთბოს წყაროს შეხების წერტილთან რაიმე მანძილზე მაქსიმალური გახურებისთვის საჭირო დროს, ამის შემდეგ კი ანგარიშობენ ნიმუშის ტემპერატურაგამტარიანობას:

$$a = \frac{x^2}{2t_{max}} \quad (6.38)$$

ამის შემდეგ კი, სითბოს წყაროს სიმძლავრის  $Q$ -სა და მისი მოქმედების დროის  $t$ -ს მიხედვით ადგენენ ქანის თბოგამტარობას:

$$\ln \gamma = \ln \frac{Q}{2S\sqrt{a\pi t \Delta t}} - \frac{x^2}{4at} \quad (6.39)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ თბური პარამეტრების დადგენის არსებულ მეთოდებში ვერ ხერხდება საწყისი და სასაზღვრო პირობის ზუსტად დაცვა და მისი სითბოს დანაკარგების სრულად გათვალისწინება. გარდა ამისა, სტაციონალური ნაკადების მეთოდების ისეთმა უარყოფითმა მხარეებმა, როგორცაა ექსპერიმენტის დიდი სირთულე და ხანგრძლივობა, ნაკლები სიზუსტე და სხვა, განაპირობებს მათ დაბალეფექტურობას. დღეს შედარებით ზუსტ და ეფექტურ მეთოდებად არასტაციონარული სითბური ნაკადის მეთოდები ითვლება.

## 6.4 ქანების თბური თვისებების გამოყენება სამთო საქმეში

ქანებზე თბური ველის ზემოქმედების კანონზომიერებათა ცოდნა საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ მათ შესახებ საჭირო ინფორმაცია და მიზანდასახული ზემოქმედებით ვმართოთ მათი მდგომარეობა და თვისებები.

ქანების მასივის თბური თვისებების, მისი მდგომარეობისა და თვისებების შესასწავლად მიმართვენ ჭაბურღილების თერმოკარიტაჟს ზომავენ ქანების ტემპერატურას ჭაბურღილის მთელ სიღრმეზე, აგებენ ტემპერატურათა ცვლილების მრუდებს, ადგენენ ტემპერატურათა გრადიანტებს.

მასივის თერმული გამოკვლევის შედეგების მიხედვით, ბევრი მნიშვნელოვანი საკითხის გადაწყვეტა შეიძლება. მაგალითად, სხვადასხვა ქანი განსხვავებული თბური პარამეტრებით ხასიათდება. ეს საშუალებას გვაძლევს თერმული გამოკვლევის

საფუძველზე დავადგინოთ მასივის შედგენლობა და მასში ქანების ურთიერთგანლაგება. შევისწავლოთ გეოლოგიური აშლილობანი. გეოტემპერატურული ანომალიების შესწავლის საფუძველზე, გამოვავლინოთ ახალი საბადოები. დედამიწის ქერქში ქანების ტემპერატურისა და გეოთერმული გრადიენტის შესწავლის საფუძველზე, შევარჩიოთ ღრმა შახტების განიავეების სწორი რეჟიმი და შევქმნათ ხალხისა და ტექნიკისთვის მუშაობის ნორმალური პირობები.

ქანების რღვევის, გვირაბების გაყვანის, სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვებისა და გამდიდრების პროცესების სრულყოფის მიზნით, სამთო საქმეში ფართოდ გამოიყენება ქანებზე თერმული ზემოქმედების სხვადასხვა მეთოდი.

როგორც ვიცით, ქანების არათანაბარი გახურება იწვევს მათში თერმული ძაბვების გაჩენას, რომლებმაც, გარკვეულ პირობებში შეიძლება გადააჭარბონ ქანების სიმტკიცის ზღვარს, რაც გამოიწვევს მის დარღვევას. თერმული ძაბვები, ქანების რღვევა—სამთო წარმოებაში ქანებზე სითბური ზემოქმედების გამოყენების ერთ-ერთი ყველაზე ძველი და ეფექტური მეთოდია, დღეს ეს მეთოდი, ძირითადად, არაგაბარტების დასამსხვრევად გამოიყენება. ფართო გამოყენება პოვა ჭაბურღილების თერმული ბურღვამაც, რომელიც ასევე არათანაბარი გახურების ქანის ეფექტს ემყარება.

გვირათმშენებლობის პრაქტიკაში დიდი გავრცელება შპოვა გვერდითი გაყინვის ქანებით გვირაბების გაყვანის მეთოდმა. ის, ძირითადად, გამოიყენება წყალქანებში გვირაბების გაყვანის დროს. წყალქანი გაყინვის შედეგად მყარ მდგომარეობაში გადადის, რაც მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს მშენებლობის პირობებს.

სითბური პროცესების გამოყენებაზე სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვების მრავალი მეთოდია დაფუძნებული. ასეთებია: ქვანახშირისა და მურანახშირის მიწისქვეშა გაზიფიკაცია. ფიქლების მიწისქვეშა გამოხდა, მადნეულთა მოპოვება დნობით და სხვა. მინერალებს სხვადასხვა დნობის ტემპერატურა გააჩნიათ, თუ ქანს ნელ-ნელა გავახურებთ, შემადგენელი მინერალები, მათი დნობის ტემპერატურის მიხედვით შესაბამისი თანმიმდევრობით გამოეყოფიან საერთო მასას. ეს გარემოება საფუძვლად დაედო სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების მეტად სასარგებლო მეთოდების შექმნას, რომლებიც სამთო საქმეში თერმულ მეთოდებადაა ცნობილი.

## 7. ქანების ელექტრომაგნიტური თვისებები

### 7.1 ზოგადი ცნობები ელექტრული ველის შესახებ

ელექტრული ველი მატერიი განსაკუთრებული სახეობაა, მას ელექტრული მუხტები ქმნიან. მუხტები შეიძლება იყვნენ თავისუფალი (ელექტრონები) და ბმული (იონები). ელექტრული ველი დამუხტულ სახელებსა და ნაწილაკებზე ძლიერ ზემოქმედებას ახდენს.

უმოდრო მუხტების მიერ შექმნილ ველს **ელექტროსტატიკურს უწოდებენ**.

ელექტროსტატიკური ველის ძირითადი მახასიათებლებია: დამაბულობა  $E$  ვ/მ და პოტენციალი  $\varphi$ .

დამაბულობა ვექტორული სიდიდეა და ტოლია საცდელ დადებით მუხტზე, ველის მოქმედების ძალის მუხტის სიდიდესთან შეფარდების ძალისა, როცა ეს უკანასკნელი ნულისკენ მიისწრაფვის:

$$E = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{F}{q} \quad (7.1)$$

პოტენციალი სკალარული პარამეტრია და გამოხატავს ველის მდგომარეობას ნებისმიერ წერტილში. მისი სიდიდე ტოლია იმ მუშაობისა, რომელიც საჭიროა ერთეული მუხტის უსასრულოდ დან ველის მოცემულ წერტილში გადმოსატანად. ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობას **დამაბულობა ეწოდება**:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

დამაბულობას და პოტენციალს შორის არსებობს კავშირი:

$$E = - \left( \frac{D\varphi}{Dx} X + \frac{D\varphi}{Dy} Y + \frac{D\varphi}{Dz} Z \right), \quad (7.2)$$

სადაც  $X, Y, Z$  ერთეულის ვექტორებია  $x, y, z$  - ღერძებზე.



## 7.2 ქანების პოლარიზაცია.

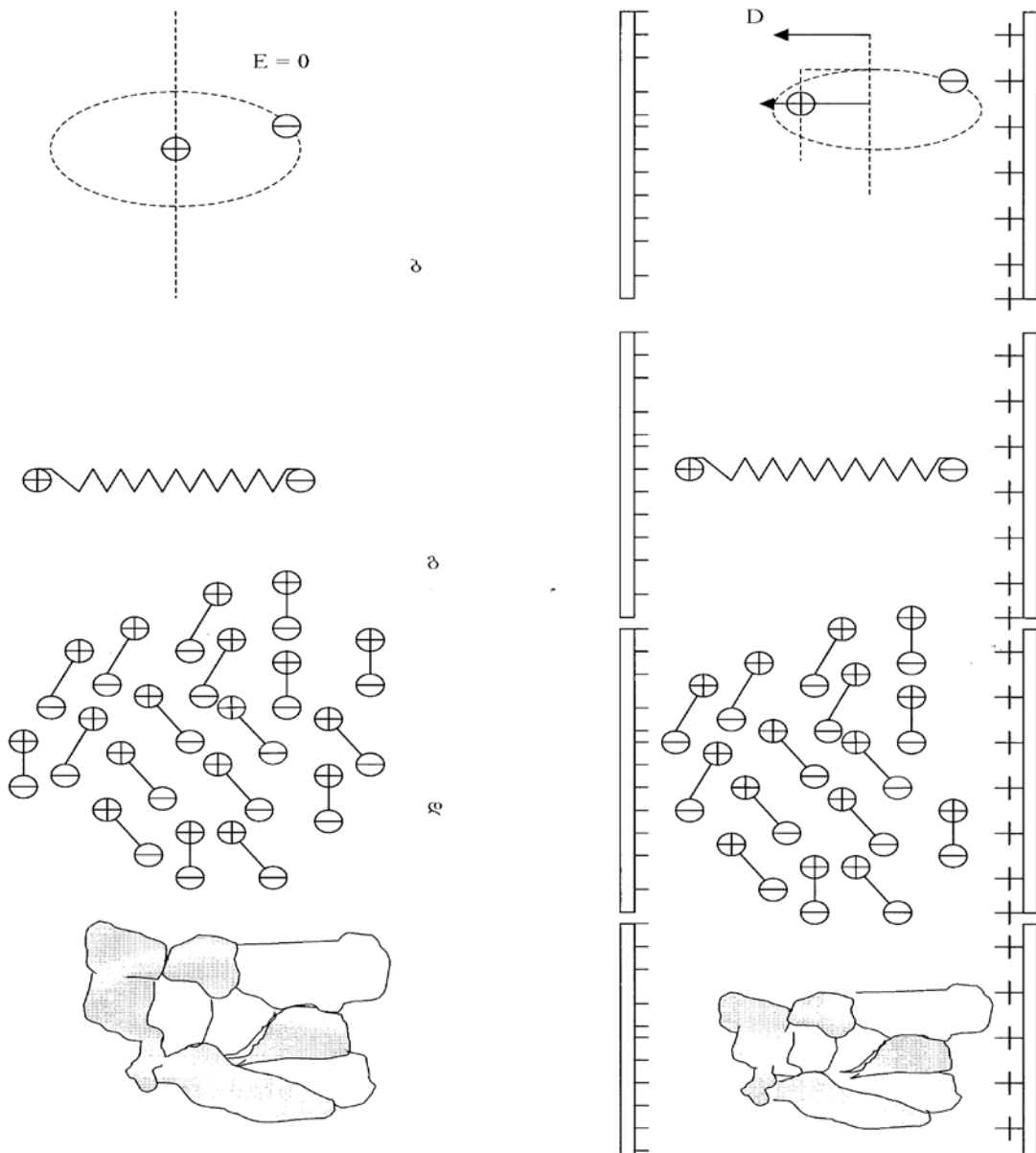
გარე ელექტრული ველის ზემოქმედების დროს, ქანში არსებული ბმული მუხტები გადაინაცვლებენ, რის შედეგადაც ქანის ზედაპირზე ჩნდებიან გაუწონასწორებელი მუხტები. ამ მოვლენას ელექტრული პოლარიზაცია ეწოდება (ნახ. 7.1) პოლარიზაციის ვექტორი  $\bar{P}$  ქანის მოცულობის ერთეულის ჯამური ელექტრული მომენტია.

პროცესში მონაწილე ნაწილაკებისა და მისი მექანიზმის მიხედვით არჩევენ პოლარიზაციის ოთხ ძირითად სახეს:

- 1) ელექტრონულს
- 2) იონურს
- 3) დიპოლურს
- 4) მიგრაციულს

ელექტრონული პოლარიზაცია  $\bar{P}_e$  წარმოიშობა ატომებში ბირთვის მიმართ ელექტრონთა ორბიტების წანაცვლების შედეგად. მისი სიდიდე ელექტრონული ველის დამაბულობის პირდაპირპროპორციულია:

$$\bar{P}_e = a_3 \cdot E_3 \cdot n, \quad (7.3)$$



ნახ.7.1. ქანების პოლარიზაციის ხაზები

ა-ელექტრული პოლარიზაცია, ბ- იონური პოლარიზაცია,

გ-დიპოლური პოლარიზაცია, დ-მიგრაციული პოლარიზაცია, I - გარე ელექტრული ველის გარეშე, II-გარე ელექტრულ ველში, 1- დიელექტრიკი, 2- გამტარი, 3- ფორები.

სადაც  $a_0$ - კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს ატომის პოლარიზაციის უნარს,  $n$  - მოცულობის ერთეულში პოლარიზებული ატომების რაოდენობა.

ელექტრონული პოლარიზაცია ყელაზე სწრაფი სახის პოლარიზაციაა. (ის წარმოიშობა  $10^{-15} - 10^{-16}$ წმ-ში)

იონური ატომური პოლარიზაცია  $P_n$  გამოწვეულია კოვალენტურობიანი დადებითი და უარყოფითი იონების მოლეკულაში ან მესერში ერთმანეთის მიმართ წანაცვლებით:

$$P_n = E a_n \cdot n \quad (7.4)$$

სადაც  $a_n$  კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს იონების პოლარიზაციის უნარს. იონური პოლარიზაცია ვითარდება  $10^{-12} - 10^{-13}$  წმ-ში.

დიპოლური პოლარიზაცია გვხვდება ისეთ ქანში, რომელიც დიპოლურ მოლეკულებს შეიცავს. მათზე ელექტრული ველის მოდება იწვევს მანამდე ქაოსურად მოძრავი დიპოლების მობრუნებას და მოწესრიგებას ველის მიმართ, ვინაიდან დიპლოს მობრუნება სითბურ აქტივაციასთანაა დაკავშირებული, ამიტომ პოლარიზაცია დამოკიდებულია ტემპერატურაზე.

დიპოლური პოლარიზაცია ვითარდება ველის მოდების მომენტიდან  $10^{-10} - 10^{-7}$  წმ-ში.

მიგრაციული პოლარიზაციის  $P_g$  ადგილი აქვს მრავალფაზიან ქანებში. სხვადასხვა ელექტრონული თვისებების მინერალების გამყოფ ზედაპირზე.

მიგრაციული პოლარიზაცია  $10^{-6} - 10^{-3}$  წმ-ში სრულდება.

ქანების ჯამური პოლარიზაცია ტოლია ცალკეული სახის პოლარიზაციათა ალგებრული ჯამისა:  $P = P_g + P_n + P_d + P_p$

პოლარიზაციას თან ახლავს ელექტროსტრიქციის მოვლენა, რაც ელექტრული ველის გავლენით დიელექტრიკის დეფორმირებაში გამოიხატება. ელექტროსტრიქციის მოვლენა აიხსნება, ერთი მხრივ ელექტრული ველის დამუხტული ნაწილაკების ქანზე დაწოლით, მეორე მხრივ, გარე ველის ზემოქმედების შედეგად ქანების ელექტრონებისა და იონების გადაადგილებით. ელექტროსტრიქციით აღძრული მექანიკური ძაბვა, ელექტრული ველის დამაბულობის კვადრატის პირდაპირპროპორციულად იცვლება.

მინერალებ, რომლებიც მიეკუთვნებიან აცენტრულ კრისტალოგრაფიულ კლასს, პოლარიზაციას განიცდიან მექანიკური დატვირთვის შედეგადაც. ასეთ მოვლენას ჰეიზოლექტრულ ეფექტს უწოდებენ. ხოლო მინერალს-ჰეიზოლექტრიკებს. ამ შემთხვევაში პოლარიზაციის სიდიდე ტოლია :

$$P_3 = a_3 \sigma \quad (7.5),$$

სადაც  $a_3$ -ქანის ჰეიზოლექტრული მოდელია.

ზოგიერთი კლასის მინერალებს ჰეიზოლექტრიკთა რიცხვიდან აქვთ განსაკუთრებული ღერძები, რომლის დადებითი და უარყოფითი მიმართულებებით კრისტალთა თვისებები სხვადასხვაა. ასეთი მინერალები თავისთავად პოლარიზდებიან. მათ პიროელექტრიკებს უწოდებენ. პიროელექტრიკის პოლარიზაციის სიდიდე დამოკიდებულია მის ტემპერატურაზე.

ზოგიერთი პიროელექტრიკის თავისთავადი პოლარიზაციის მიმართულება შეიძლება შევცვალოთ გარე ელექტრონული ველის ზემოქმედებით. მინერალების ამ ჯგუფს სეგნეტოელექტრიკებს უწოდებენ.

მრავალფაზოვან ქანებში დენის გავლის შედეგად აღიძვრება ნელი ელექტროქიმიური პოლარიზაცია. ელექტროქიმიურ პოლარიზაციას იწვევს ქანებში მიმდინარე ჟანგვა-აღდგენის პროცესები, ელექტროფლორეზი, ხსნართა კონცენტრაციის გადანაწილება და სხვ.

პრაქტიკულად ყველა მინერალები დიელექტრიკები ან სუსტი ნახევრადგამტარები არიან და ხახუნის შედეგად პოლარიზდებიან. ორი დიელექტრიკის ურთიერთხახუნის დროს, მეტი დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე დიელექტრიკი დადებითად იმუხტება.

### 7.3 დიელექტრიკული შეღწევადობა და დიელექტრიკული დანაკარგები

ელექტრული პოლარიზაციის შედეგად ქანებში წარმოიქმნება შინაგანი ელექტრული ველი, რომელიც გარეგანის საპირისპიროდაა მიმართული. ამიტომაც, რომ ნებისმიერ ნივთიერებაში ელექტრონული ველის ჯამური დაძაბვა  $-E_0$  ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე ვაკუუმში  $E_0$ .

დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon$  წარმოადგენს ქანის პოლარიზაციის დონის საზომს და გვიჩვენებს, რამდენად მეტია მისი დაძაბულობა ნივთიერებაში ვაკუუმთან შედარებით:

$$\epsilon = E_0 \quad (7.6)$$

დიელექტრიკული შეღწევადობის ცნებას აზრი აქვს მხოლოდ დიელექტრიკებისა და ნახევარგამტარებისთვის. გამტარების დიელექტრიკული შეღწევადობა უსასრულოდ დიდია.

ცვლად ელექტრულ ველში მოთავსებული ქანი ხასიათდება კიდევ ერთი პარამეტრით– დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხით  $\sigma$ .  $\Sigma$  კუთხის თანგენსი დენის აქტული  $I_a$  და რეაქტიული  $I_r$  მდგენელების ფართობის ტოლია.  $\sigma = \frac{I_a}{I_r}$ . პარამეტრი  $\text{tg}\sigma$  ელექტრული ენერჯის იმ ნაწილს ახასიათებს, რომელიც სითბურ ენერჯიაზე გადადის.

#### 7.4. ქანების ელექტროგამტარობა

ელექტროგამტარობა  $\gamma$ , ელექტრული ველით გამოწვეული, მუხტების ელექტრონებითა და იონებით შექცევადი გადატანაა.

ელექტროგამტარობის შებრუნებულ სიდიდეს წინალობა ეწოდება.

ელექტროგამტარების სიდიდის მიხედვით ბუნებაში არსებული ნივთიერებები იყოფიან ოთხ ჯგუფად: დიელექტრიკები ( $\sigma = 10^{-14} - 10^{-15}$  ომი/სმ) , ნახევარგამტარები ( $\sigma = 10^2 - 10^{10}$  ომი/სმ) და გამტარები ( $\sigma = 10^4 - 10^5$  ომი/სმ).

ელექტროგამტარობაში მონაწილეობას იღებენ მხოლოდ ის ელექტრონები, რომლებიც ატომის ბირთვისგან საკმაოდ არიან დაშორებულნი და გამტარობის ზონაში იმყოფებიან. იმისთვის, რომ ელექტრონები გამტარობის ზონაში მოხვდნენ, საჭიროა მასზე ენერგეტიკული ზემოქმედება. აღნიშნული ზეგავლენის სიდიდე დამოკიდებულია ეგრეთწოდებული აკრძალული ზონის სიგანეზე. რომლებიც ელექტრონების მიმოქცევის ვალენტურ ზონას გამტარობის ზონისგან გამოყოფს.

გამტარობისთვის აკრძალული ზონა არ არსებობს, გარე ფაქტორების ზეგავლენით ელექტრონები დამატებით კინეტიკურ ენერჯიას იძენენ, რის გამოც ადვილად გადადიან გამტარობის ზონაში. გამტარებს მიეკუთვნებიან თვითნაბადი მეტალები და გრაფიტი.

ნახევარგამტარების აკრძალული ზონა გარკვეული სიგანისაა, ამიტომ ელექტრონების გამტარობის ზონაში გადასაყვანად გარკვეული ენერჯიაა საჭირო ( $0.16 \cdot 10^{-19} - 3 \cdot 10^{-19}$  ჯ). ნახევარგამტარის თვისებები გააჩნიათ პირიტს, მაგნეტიტს და, საერთოდ, სულფატებს.

დიელექტრიკებში აკრძალული ზონის სიგანე ძალიან დიდია, რის გამოც, კრისტალური მესრის კვანძიდან ელექტრონის ამოსაგლეჯად (ე.ი მისი გამტარობის ზონაში გადასაყვანად) ძალიან დიდი ენერგიაა საჭირო  $13 \cdot 10^{-19}$  ჯ, შედარებით ნაკლები ენერგია სჭირდება მეორიდან იონის ამოგლეჯას. ამიტომ, რომ გამტარებისა და ნახევარგამტარების გამტარობა ელექტრონულია, დიელექტრიკებისა კი იონური. მინერალების უმრავლესობა დიელექტრიკებია. ასეთებია: კვარცი, მინდვრის შპატი, ქსარბი და ქანწარმომქმნელი ყველა მინერალი.

ქანების გამტარობის მექანიზმი, მინერალებთან შედარებით, რთულია. ისინი ნარევეს წარმოადგენენ, ამიტომ ზოგიერთი ქანის ხასიათი შრეული (ელექტრონულ-იონური) ხასიათისაა.

#### 7.4 ქანების მაგნიტური თვისებები

ქანების რეაქციის მაგნიტური ველის ზემოქმედებაზე მათი მაგნიტური თვისებები გვიჩვენებენ.

მაგნიტური ველი განსაკუთრებული სახეობაა, რომელიც მოძრავი ნაწილაკების ელექტრონული მუხტების და ელექტრონული ველით არის განპირობებული.

მაგნიტური ველის ინტენსიობას მაგნიტური ინდუქცია  $B$  (ვ წმ/მ<sup>2</sup>) ახასიათებს.

მაგნიტური ინდუქცია ვექტორული სიდიეა. ის რიცხვობრივად ე.დ.ს.– ს ტოლია და აღინიშნება გამტარის ხვეულში, მაგნიტური ველის ზემოქმედების დროს.

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის ინტეგრალს რაიმე ზედაპირზე მაგნიტურ ნაკადს ( $\Phi$ , მ წმ) უწოდებენ.

$$\Phi = \int_S B dS. \quad (7.7)$$

მაგნიტური ძალების სიდიდესა და მიმართულებას მაგნიტური ველის დამაბულობა ( $H$ , პისტელი) გვიჩვენებს. დამაბულობა, ისევე, როგორც მაგნიტური ინდუქცია, ვექტორული სიდიეა, მათ შორის არსებობს დამოკიდებულება:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (7.8)$$

სადაც  $\mu_s$  აბსოლუტური მაგნიტური შეღწევადობაა, ვაკუუმისთვის  $\mu_s = \mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ჰნ/მ}$  და მას მაგნიტური მუდმივა ეწოდება.

$$\mu = \frac{\mu_s}{\mu_0} \quad (7.9)$$

ფარდობით მაგნიტურ შეღწევადობას უწოდებენ.

მაგნიტური ველის ინდუქციის ცვალებადობა დაკავშირებულია ქანის დამაგნიტებასთან. ამიტომ, დამაგნიტება შეიძლება განისაზღვროს რაიმე გარემოში, როგორც ველის მაგნიტური ინდუქციის ნამატი ვაკუუმთან შედარებით (7.8) ფორმულის საფუძველზე :

$$I = \frac{B}{\mu_0} - H = H(\mu - 1), \quad (7.10)$$

სადაც  $(\mu - 1)$ -მოცულობითი მაგნიტური ათვისებულობის კოეფიციენტი.

ფარდობას :  $mI$ / დხვედრითი მაგნიტური ათვისებლობა  $mI_{\text{ხგ}}$  ეწოდება.

დამაგნიტების მექანიზმი უფრო ნათელი გადება, თუ თითოეული ორბიტის მოძრაობას განვიხილავთ როგორც ელემენტარულ წრიულ დენს. თუ ამ შემთხვევაში ელექტრონის ბრუნვის სიბრტყე შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ბრტყელი მაგნიტური დიპოლი ორ ზედაპირზე სხვადასხვა პოლარობით.

ელემენტარული დენისა და (i) მაგნიტური დიპოლის ფარდობის ( $\Delta S$ ) ნამრავლს ელექტრონის მაგნიტურ მომენტს ( $m$ ) უწოდებენ. ეს მუდმივი სიდიდეა და ტოლია  $9.28 \cdot 10^{-14} \text{ჯ/ტ}$ .

ატომი არ არის დამაგნიტებული თუ მისი ყველა ელექტრონების მაგნიტური მომენტები ერთმანეთს აკომპენსირებენ. ასეთ ქანებს დამაგნიტებს უწოდებენ.

დამაგნიტის მაგნიტურ ველში შეტანით ელექტრონები იძენენ დამატებით სიჩქარეებს, რის შედეგადაც თითოეული ატომი იძენს მაგნიტურ მომენტს, რომელიც ველის საწინააღმდეგოდაა მიმართული, ამიტომ, რომ დამაგნიტის მაგნიტური შეღწევადობა ერთზე ნაკლებია. ამ მომენტების ჯამი ნულისგან განსხვავდება და განაპირობებს ქანის დამაგნიტებას.

$$\sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n i\Delta S \neq 0$$

ქანის დამაგნიტება  $I$  (ვბ/მ<sup>2</sup>) ტოლია რაიმე მოცულობაში ( $\Delta V$ ) არსებული მაგნიტური მომენტის ჯამის, ამ მოცულობასთან შეფარდების ზღვრისა:

$$I = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\Delta V} \quad (7.11)$$

ქანებს, რომელთა ატომებს მაგნიტური მომენტები გარე ველის ზემოქმედების გარეშეც გააჩნიათ, **პარამაგნიტური ქანები ეწოდებათ**. იმის გამო, რომ ცალკეული ატომების მაგნიტური მომენტები ქაოსურად არიან განაწილებულნი, პარამაგნიტური ქანი, გარე ველის ზემოქმედების გარეშე დაუმაგნიტებელია. მაგნიტურ ველში შეტანისას ასეთი ქანის დიპოლები ველის შესაბამისად ორიენტირდებიან, რაც მის დამაგნიტებას იწვევს.

პარამაგნიტური ქანების მაგნიტური შეღწევადობა ერთზე მეტია. ქანებს, რომელთა დემენებს (მთელ მოცულობებს) გარე ველის ზემოქმედების გარეშე გააჩნიათ მაგნიტური მომენტები, **ფორომაგნიტური ქანები ეწოდებათ**. მათი მაგნიტური შეღწევადობა ბევრად აღემატება პარამაგნიტური ქანებისას.

როგორც (7.8) ფორმულიდან გამომდინარეობს, ველის დამაბულობის ზრდასთან ერთად ქანის დამაგნიტება იზრდება: ფორომაგნიტურ ქანებში  $H$ -ის გარკვეული მნიშვნელობის შემდეგ, აღნიშნული დამოკიდებულობა ქრება – ადგილი აქვს ქანის გაჯერებას. გარე ველის მოხსნის შემდეგ, ქანების განმაგნიტობა მთლიანად არ ხდება, ადგილი აქვს ნარჩენ დამაგნიტებას  $I_6$ . სრული განმაგნიტებისთვის ქანებზე საწინააღმდეგოდ მიმართული გარკვეული დამაბულობის მაგნიტური ველის ზემოქმედება. დამაბულობის სიდიდე–  $H_3$  ქანის მაგნიტური მახასიათებელია, მას კოერციტულ ძალას უწოდებენ.

ზოგიერთ ფერომაგნიტიკებს მკვეთრად გამოხატული მაგნიტოსტრიქციული თვისებები აქვთ; დამაგნიტების დროს ხდება მათი დაგრძელება (მა. მაგნეტიდი, რკინა) ან დამოკლება (მაგ. ნიკელი).



## 7.5 ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელება

### ქანებში

ელექტრომაგნიტური ველი მატერიის განსაკუთრებული სახეობაა, რომელიც ხასიათდება უწყვეტი ურთიერთგარდაქმნით დაკავშირებული ელექტრული და მაგნიტური ველებით.

ელექტრული ველის ცვალებადობით გამოწვეული გრიგალური ველის წარმოქმნის პროცესში მაქსველის პირველი განტოლებით აიწერება:

$$[\nabla H] = \frac{\partial D}{\partial t} + \bar{\sigma}, \quad (7.12)$$

სადაც: 
$$[\nabla H] = \begin{vmatrix} \bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0 \\ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x, H_y, H_z \end{vmatrix};$$

$\frac{\partial D}{\partial t}$ -დენის სიმკვრივის ვექტორია;

$\bar{\sigma}$ -გამტარობის დენის სიმკვრივის ვექტორია;

(7.12) განტოლება გვიჩვენებს, რომ მაგნიტური ველი არ იარსებებს ( $\bar{H} = 0$ ) მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა წინაცვლების დენი და გამტარობის დენი არ გვაქვს ე.ი დენის გაჩენა ყოველთვის ბადებს მაგნიტურ ველს.

მაგნიტური ველის ელექტრულად გარდაქმნის პროცესი იწერება მაქსველის მეორე განტოლებით:

$$[\nabla H] = -\frac{\partial B}{\partial t}. \quad (7.13)$$

ე.ი მაგნიტური ინდუქციის ცვალებადობა იწვევს ელექტრული ველის გაჩენას.

მაქსველის მესამე განტოლება გვიჩვენებს, რომ ელექტრული ინდუქციის ნაკადი, რაიმე შეკრულ ზედაპირზე, ტოლია მის შიგნით მოთავსებული მუხტის სიდიდის:

$$d_{iv}D = \nabla D = \eta, \quad (7.14)$$

სადაც  $\eta$  მუხტის მოცულობითი სიმკვრივეა :

$$\eta = \overline{\lim}_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}. \quad (7.15)$$

$\Delta q$  არის  $\Delta V$  მოცულობაში მოთავსებული მუხტი.

მეოთხე განტოლება მაგნიტური ხაზების უწყვეტობას გამოხატავს:

$$d_{iv}B = \nabla B = 0. \quad (7.16)$$

ელექტრომაგნიტური ველის ყველა პარამეტრი დაკავშირებულია ქანის ელექტრულ და მაგნიტურ თვისებებზე:

$$\begin{aligned} B &= \mu\mu_0 H \\ D &= \varepsilon\varepsilon_0 E \quad (7.16) \\ \delta &= \sigma E \end{aligned}$$

ყველა ზემოთ მოყვანილი განტოლება შეადგენს ელექტრომაგნიტური ველის დიფერენციალურ განტოლებეთა სისტემას.

თუ არნიშნული განტოლებიდან გამოვრიცხავთ H-ს, და გავითვალისწინებთ, რომ დიელექტრიკისათვის  $\delta=0$  ელექტრული ველის დამაბულობის განტოლება შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\nabla^2 E - \varepsilon'\mu' \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0. \quad (7.17)$$

მაქსველის განტოლებიდან E ვექტორის გამოვრიცხვით კი მაგნიტური ველის დამაბულობის განტოლება მიიღებს ასეთ სახეს :

$$\nabla^2 H - \varepsilon'\mu' \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0. \quad (7.18)$$

დროის მიხედვით ძაბვის ჰარმონიული ცვალებადობის შემთხვევაში (7.18) და (7.19) განტოლება შეიძლება ჩაიწეროს კომპლექსური სახით:

$$\begin{aligned} \nabla^2 E &= (i\xi - \omega\varepsilon)\omega \cdot \mu' E \\ \nabla^2 H &= (i\xi - \omega\varepsilon)\omega\mu' H \end{aligned}$$

$$\text{სადაც } \omega=2\pi f; \varepsilon' = \varepsilon\varepsilon_0; \mu' = \mu\mu_0$$

ვინაიდან ქანები, ძირითადად, დიელექტრიკებს წარმოადგენენ, მათში გამტარობის დენები წანაცვლების დენებთან შედარებით უმნიშვნელოა, ამის გათვალისწინებით (7.20) განტოლებიდან მივიღებთ როცა  $\sigma=0$

$$\nabla^2 E = -\omega^2 \varepsilon' E; \nabla^2 H = -\omega^2 \varepsilon' \mu' H; \quad (7.21)$$

ზემოთ მოყვანილი განტოლებები ასახავენ ელექტრული და მაგნიტური ტალღების წარმოშობის და გავრცელების ძირითად კანონზომიერებას.

## 7.6 ქანების შედგენილობისა და აღნაგობის გავლენა

### ელექტრომაგნიტურ პარამეტრებზე

მთავარი ქანმაშენი მინერალები (ქარბი, პალატი, სილვინი, კალცი, მინდვრის კვარცი) დაბალი ელექტროგამტარობით ხასიათდებიან:

$$\sigma = 10^{-12} - 10^{-20} \text{ სმ/მ.}$$

მკვრივი ქანების ხვედრითი ელექტროგამტარობა დამოკიდებულია შემადგენელი მინერალების გამტარობაზე.

მადნეული მინერალების მარღვისებური ჩანართები ზრდიან ქანის ელექტროგამტარობას.

ქანების შრეულობა იწვევს ელექტროგამტარობის ანიზოტროპიას. როგორც წესი :

$$\frac{\gamma_{\parallel}}{\gamma_{\perp}} > 1.$$

დანალექი ქანები დაბალი ელექტროგამტარობით ხასიათდებიან, რაც შემაცემენტებელი ნივთიერებების (კვარცი, გიფსი, კალციტი და სხვ.) სუსტი გამტარობით აიხსნება.

ქანების გამოფიტვა, ფორიანობისა და ბზარიანობის გაზრდა, მშრალ მდგომარეობაში ელექტროგამტარობას ამცირებს.

ნახშირის მეტამორფოზაცია იწვევს ელექტროგამტარობის გაზრდას, ნაცრიანობის მომატება - კი შემცირებას.

ქანების დიელექტრიკული შეღწევადობა შემადგენელი მინერალების თვისებებზეა დამოკიდებული და იანგარიშება ფორმულებით:

$$\epsilon_{\parallel} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i V_i, \quad (7.23)$$

$$\epsilon_{\perp} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i V_i}. \quad (7.24)$$

ქანების ფორიანობისა და ბზარიანობის გაზრდა დიელექტრიკულ შეღწევადობას ამცირებს, დატენიანება კი ზრდის. პარამეტრი  $\epsilon$  გზ ბევრადაა დამოკიდებული კრისტალური მესრის სტრუქტურაზე. მესერში არსებული ნებისიერი დეფექტი ზრდის დიელექტრიკულ დანაკარგებს.

მინერალებში კრისტალიზაციური წყლის არსებობა არის  $\epsilon_{\text{გბ}}$ , ამ პარამეტრის დიდი მნიშვნელობები შეესაბამება, აგრეთვე, მადნეულ მინერალებს. ქვანახშირებისთვის  $\epsilon_{\text{გბ}}$  იზრდება ნაცრიანობის ზრდასთან ერთად. მშრალი ქანის ბზარიანობისა და ფორიანობის ზრდა იწვევს  $\epsilon_{\text{გბ}}$ -ს შემცირებას.

შრეული ქანებისთვის  $\epsilon_{\text{გბ}\parallel} > \epsilon_{\text{გბ}\perp}$ , და თუ შრეებს დიელექტრიკული შეღწევადობა გააჩნიათ, მაშინ პარამეტრის მნიშვნელობები შრეულობის პარალელური და მართობული მმართულებით იანგარიშება, ფორმულით :

????

ქანების მაგნიტური შეღწევადობა განისაზღვრება შემადგენელი მინერალების მაგნიტური თვისებებით. თუ ქანის ძირითადი მასის მაგნიტური შეღწევადობა  $\mu_1$ , ხოლო სფეროსებური ჩანართების –  $\mu_2$  მაშინ:

$$\mu_{\text{საშ}} = \frac{\mu_1(1+2V_0)+2\mu_2(1-V_0)}{\mu_2(1-V_0)+\mu_1(2+V_0)}, \quad (7.25)$$

სადაც  $V_0$  ჩანართების ფარდობითი მოცულობაა.

მაგნიტურ შეღწევადობაზე მნიშვნელოვნად მოქმედებს ფერომაგნიტური მინერალების შემცირება. მათი ფორმა, ზომები და ურთიერთგანლაგება, მსხვილმარცვლოვანი ფერომაგნეტიკების შეღწევადობა წვრილმარცვლოვანზე მეტია.

ქანების უმრავლესობა დიამაგნეტიკები და პარამაგნეტიკებია.

მაგმიური და მეტამორფული ქანები მნიშვნელოვანი მაგნიტიზმით ხასიათდებიან, დანალექი ქანები კი, როგორც წესი, მაგნიტურები არ არიან.

ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელების ხასიათი ბევრადაა დამოკიდებული ქანის ელექტრულ და მაგნიტურ თვისებებზე. ელექტროგამტარობის დიელექტრიკული და მაგნიტური შეღწევადობის გაზრდით, ძლიერდება ქანების მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების შთანთქმის უნარი და იზრდება მათში ტალღების გავლის სიჩქარე.

სხვადასხვა ელექტრული თვისებების მქონე ქანების გამყოფი ზედაპირის გავლის დროს, ელექტრომაგნიტური ქანები სინათლის სხივის მსგავსად აირეკლებიან, გარდატყდებიან, თუ ელექტრომაგნიტური ტალღა  $Z_1$ , ტალღური წინალობის მქონე გარემოდან  $Z_2$  წინალობის მქონე გარემოში ვრცელდება, მაშინ :

ა) თუ  $Z_1=Z_2$  ტალღის არეკვლის ადგილი არ არის,

ბ) თუ  $Z_1 \rightarrow \infty$  და  $Z_2 \rightarrow 0$  (ე.ი.დიელექტრიკული გამტარში გადასვლის დროს) ხდება სრული არეკვლა.

გ) თუ  $Z_1 > Z_2$  ადგილი აქვს არეკვლას და გარდატეხვასაც.

## 7.7. ელექტრული და მაგნიტური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები.

ლაბორატორიულ პირობებში, ელექტროგამტარობის პირობები იყოფიან მუდმივი დენისა და ცვლადი დენის მეთოდებად.

ცვლადი დენის მეთოდია:

ა) ამპერმეტრ-ვოლტმეტრის მეთოდი. ელექტროგამტარობის დასადგენად საჭიროა ვიცოდეთ ქანის ნიმუშის განკვეთის ფართობი  $S$ , სიგრძე  $L$  და სრული წინაღობა  $R$ . მაშინ

$$\rho = \frac{1}{\zeta} = \frac{S}{L} \cdot R .$$

სრული წინაღობის დასადგენად, ნიმუშში ატარებენ დენს  $R$ -ის სიდიდეს ან პირდაპირ ზომავენ ომმეტრის საშუალებით, ან გაზომილი ძაბვისა  $U$  და დენის ძალის  $I$  მიხედვით ანგარიშობენ  $R = \frac{U}{I}$ .

ბ) რელაქსაციური მეთოდი. ელექტროგამტარობის დასადგენად ცნობილი ტევადობის კონდენსატორის განმუხტვის (ან დამუხტვის) დენს ატარებენ ნიმუშში. რაც უფრო კარგი გამტარია ქანი, მით უფრო სწრაფად ხდება კონდენსატორის განმუხტვა (ან დამუხტვა).

გ) ეტალონთან შედარების მეთოდი. ის ცნობილია ბოგირის მეთოდის სახელითაც, ამ შემთხვევაში ნიმუშის წინააღმდეგობას აღიარებენ ცნობილ წინააღმდეგობათა ანაწყობს.

ბოგირის მეთოდს დიდი გამოყენება აქვს ცვლადი დენის მეთოდშიც, ის საშუალებას გვაძლევს ელექტროგამტარობასთან ერთად დიელექტრიკული შეღწევადობაც განვსაზღვროთ.

## 8. ქანების რადიაციული თვისებები

რენტგენის სხივები იგივე ელექტრომაგნიტური ტალღებია, ოღონდ გაცილებით უფრო მოკლე, ვიდრე სინათლისა ( $10^{-6}$ - $10^{-9}$ მ), რენტგენის სხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედება ორი არსებითი ფაქტორით ხასიათდება – ტალღის მცირე სიგრძითა და კვანტის დიდი ენერგიით, ამიტომ, ამ სხივებისადამი მიკრონაწილაკთა გავრცელების კანონებს ზოგიერთი საერთო ნიშანი აქვთ. თუმცა, სიხშირესა და ნივთიერებაში შთანთქმას შორის სხვაგვარი დამოკიდებულება ჩნდება.

**რენტგენის სხივების ინტენსიურობა** - ენერგიის ის რაოდენობაა, რომელიც 1 წამში სხივის მართობული ზედაპირის  $სმ^2$  გაივლის. ნივთიერებაში გავლისას რენტგენის სხივები შთანთქმისა და განზნევის გამო ენერგიას კარგავენ. შთანთქმა ენერგიის სხვა სახეობაში გარდაქმნაა (რენტგენის სხივებისათვის ეს არის მეორეული გამოსხივების ენერგიაში გადასვლა), განზნევა ნაწილაკებთან შეჯახების გამო სხივების მიმართულების ქაოსური შეცვლა. შთანთქმის სრული კოეფიციენტი  $v$  უდრის საკუთრივ შთანთქმისა და განზნევის კოეფიციენტთა ჯამს. სხეულში გავლილი სხივის ინტენსიურობას გამოიანგარიშებენ ცნობილი მაჩვენებლიანი ფორმულით :

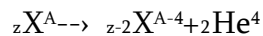
$$J = J_0 e^{-\mu d}$$

სადაც  $d$ -შრის სისქეა.

რაც უფრო დიდია ნივთიერების სიმკვრივე, მით უფრო მეტია რენტგენის სხივების შთანთქმა. ზოგიერთ ქანსა და მინერალს ბუნებრივი რადიოაქტიურობა ახასიათებს. ქანების რადიოაქტიურობა იმით არის გამოწვეული, რომ მათი შედგენილობა, ან მინერალები, რომლებიც რადიოაქტიურ ელემენტებს (ურანი, თორიუმი, რადიუმი) შეიცავს, ან კალიუმის, კალციუმის, რუბიდიუმის, ცირკონიუმისკალის, ტელურის, ვოლფრამის, რენიუმისა და ბისმუტის რადიოაქტიური იზოტოპები. გარდა ამისა, ზოგიერთ მინერალს გარემოდან რადიოაქტიური ელემენტებისა და იზოტოპების დასორბციის უნარი შესწევს, რის გამოც ასეთი მინერალები, აგრეთვე, ამაღლებს ქანების რადიოაქტიურობას მაგალითად, ელემენტთა სორბციის შედეგად ამაღლებული რადიოაქტიურობა ახასიათებს თიხებსა და თიხაფიქლებს.

ამიტომ ნალექ ქანებში (მაგალითად, მერგელებში) თიხების არსებობა მათ რადიო-აქტიურობას ადიდებს. დედამიწის ქერქში რადიოაქტიური ელემენტების რაოდენობა ძალიან მცირეა, ლითოსფერო შეიცავს დაახლოებით  $2,1 \cdot 10^{-6}\%$  ურანს ( $U^{235}$ ),  $3 \cdot 10^{-4}\%$  ურანს ( $U^{238}$ ),  $8 \cdot 10^{-4}\%$  თორიუმს ( $Th^{237}$ ),  $10 \cdot 10^{-10}\%$  რადიუმს ( $Ra^{226}$ ). ელემენტთა ბირთვების კვლავ აწყობასთან დაკავშირებული რადიოაქტიური დაშლის დროს ხდება გამა-სხივებისა და ალფა და ბეტა-ნაწილაკების გამოსხივება.

**ალფა-ნაწილაკები** ჰელიუმის დადებითად დამუხტული ატომგულებია, რომლებიც ორი პროტონისა და ორი ნეიტრონისაგან შედგება. ალფა-დაშლა სქემატურად ასე გამოიყურება ა:



სადაც X ელემენტია, z-ელემენტის ნომერი, დ.მენდელეევის პერიოდული სისტემის მიხედვით, A — ელემენტის ატომ წონა.

ნივთიერებიდან ალფა-ნაწილაკების გამოტყორცნის საწყისი სიჩქარე  $1,2 \cdot 10^9$ - დან  $2,3 \cdot 10^9$  სმ/წმ-მდეა, ენერგია  $3 \cdot 10^{-13}$ -დან  $1,7 \cdot 10^{-12}$  ჯ-მდე. ალფა-ნაწილაკების გარბენის სიგრძე უმნიშვნელოა, ჰაერში იგი შეადგენს 3—10 სმ, ხოლო კვარცში მარტოოდენ 38,3 მკ.

**ბეტა-ნაწილაკები** ელემენტების ბირთვიდან სხვადასხვანაირი სიჩქარით გამოტყორცნილი ელექტრონების (პოზიტრონების) ნაკადია. არსებობს ბეტა ნაწილაკები, რომელთა სიჩქარე სინათლის სიჩქარეს უახლოვდება. ბეტა-ნაწილაკების გარბენის სიგრძე საშუალოდ გაცილებით მეტია, ვიდრე ალფანა წილაკების, და ჰაერში, იმის მიხედვით, თუ როგორია საწყისი სიჩქარე, 1-:-900 სმ შეადგენს. ბეტა-ნაწილაკების მაქსიმალური ენერგია იცვლება  $3,2 \cdot 10^{-14}$ -დან  $5,1 \cdot 10^{-13}$  ჯ-მდე.

გამა-სხივები ძალიან მოკლე ელექტრომაგნიტური ტალღებია, სიგრძით  $1A^0$ -მდე ( $10^8$  სმ-მდე). გამა-სხივები ხასიათდება მასითა და კვანტის ენერგიით. კვანტის მასა გამა-სხივის ტალღის სიგრძის უკუპროპორციულია:

$$M = hf / c^2 \text{ გ.წმ}^3/\text{მ}^2,$$

სადაც  $f$  ტალღათა სიხშირეა,  $h$ -პლანკის მუდმივა ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  ვტ.წმ<sup>2</sup>),  $\nu_0$ -სინათლის სიჩქარე, მ/წმ. კვანტის ენერგია მით უფრო მეტია, რაც უფრო ნაკლებია ტალღის სიგრძე:

$$W = hf.$$

ტალღის სიგრძისაგან დამოკიდებულებით, გამა-კვანტების ენერგია შეიძლება მერყეობდეს  $8,1 \cdot 10^{-16}$ -დან  $4,8 \cdot 10^{-13}$ . ტალღის სიგრძე თითოეულ რადიოაქტიურ ელემენტს თავისი საკუთარი აქვს. მაგალითად, კობალტის რადიოაქტიური იზოტოპისათვის  $^{60}\text{Co}$  გამა-კვანტების ენერგია  $18 \cdot 10^{-13}$ - $2,1 \cdot 10^{-13}$  ჯ შეადგენს. გამა-სხივების შეღწევადობის უნარი ძალიან დიდია. რადიოაქტიური კობალტის გამა-კვანტების კონას 1,6 სმ სისქის ტყვიისა ან 12 სმ სისქის ალუმინის შრე მხოლოდ ორჯერ ასუსტებს.

ქანების რადიოაქტიურობა იზომება კიურით, რეზერფორდით, რადიუმის გრამა-ეკვივალენტით და სხვ.

კიური - ნივთიერების რადიოაქტიურობაა, გამოსახება 1 გრადიუმში 1 წმ დაშლილი ატომების რაოდენობით ( $3,7 \cdot 10^{10}$  ატომები/წმ).

რეზერფორდი შეესაბამება ისეთი ქანის რადიოაქტიურობას, რომლის 1 გ წამში 10-ჯერ დაიშლება. ქანების რადიოაქტიურობა მათი გამოსხივების ინტენსიურობით განისაზღვრება. გეოფიზიკის პრაქტიკაში იყენებენ რადიომეტრებს, სცინტილაციურ ანალიზატორებს და სხვ.

ეს ხელსაწყოები რადიოაქტიური გამოსხივების საჭერებია, რომლებიც აღჭურვილია ქანის ნიმუშიდან გამოტყორცნილი გამა-კვანტების, ალფა და ბეტა ნაწილაკების მრიცხველით. ქანების რადიოაქტიურობა ურანის პროცენტულ შემცველობაზე დაიყვანება და შემდეგი ფორმულით გამოიანგარიშება:

$$\Gamma_s = \frac{n_j G_j a}{n_j G_j}$$

სადაც  $n_j$  და  $n_0$  - ქანის ნიმუშიდან და ეტალონიდან წუთში გამოტყორცნილი ნაწილაკების რაოდენობაა;  $G_j$  და  $G_0$  - ქანისა და ეტალონის წონა, გ.  $a$  - ეტალონში ურანის წონითი შემცველობა.



## სარჩევი

1. მინერალები და ქანები.....	3
1.1. მინერალებისა და ქანების შედგენილობა და აღნაგობა.....	3
1.2. ქანების კლასიფიკაცია.....	6
1.3. ქანთა მასივი და ქანების ნიმუში.....	7
1.4. ქანების ფიზიკური თვისებების კლასიფიკაცია.....	8
1.5. შიგა ფაქტორების გავლენა ქანების თვისებებზე.....	9
1.6. გარე ფაქტორების გავლენა ქანის თვისებებზე.....	11
1.7. ქანების ფიზიკური მახასიათებლების განსაზღვრა.....	13
2. ქანების სიმკვრივის თვისებები.....	16
2.1. ქანების ფორიანობა.....	16
2.2. ქანების სიმკვრივე.....	19
2.3. ქანების ბზარიანობა.....	20
3. ქანების ჰიდრო და აეროდინამიკური თვისებები.....	22
3.1. სითხეები და გაზები ქანებში.....	22
3.2. სითხეებისა და გაზების გადაადგილება ქანებში.....	28
3.3. სითხეებისა და გაზების ზემოქმედება ქანებზე.....	30
3.4. ქანების ჰიდრო და აეროდინამიკური თვისებების გამოყენება სამთო საქმეში.....	37
4. ქანების მექანიკური თვისებები.....	38
4.1. ქანების დრეკადობა.....	42
4.2. ქანების სიმტკიცე.....	44
4.3. ქანების პლასტიკურობა.....	47
4.4. ქანების რღვევა.....	49
4.5. ქანების რეოლოგიური თვისებები.....	52
4.6. ქანების სიმაგრე.....	55
5. ქანების აკუსტიკური თვისებები.....	56
6. ქანების თბური თვისებები.....	58

6.1. ქანებში სითბოს დაგროვებისა და გავრცელების კანონები.....	58
6.2. ქანების შედგენილობისა და აღნაგობის გავლენა თბურ პარამეტრებზე.....	64
6.3. თბური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები.....	67
6.4 . ქანების თბური თვისებების გამოყენება სამთო საქმეში.....	70
7. ქანების ელექტრომაგნიტური თვისებები.....	72
7.1. ზოგადი ცნობები ელექტრული ველის შესახებ.....	72
7.2. ქანების პოლარიზაცია.....	73
7.3. დიელექტრიკული შეღწევადობა და დიელექტრიკული დანაკარგები.....	76
7.4. ქანების ელექტროგამტარობა.....	77
7.4 . ქანების მაგნიტური თვისებები.....	78
7.5. ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელება ქანებში.....	81
7.6. ქანების შედგენილობისა და აღნაგობის გავლენა ელექტრომაგნიტურ პარამეტრებზე.....	83
7.7. ელექტრული და მაგნიტური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები.....	85
8. ქანების რადიაციული თვისებები . . . . .	86

### გამოყენებული ლიტერატურა:

- 1). თ. ჭელიძე. ნარკვევები ქანების ფიზიკაში.თბილისი,1983.264გვ.
- 2). В.В.Ржевский,Г.Я.Новик. Основы физики горных пород. М.,Недра.1984.359с.
- 3). Russell Duffy.CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018 . 292p

რედაქტორი ლ. კვინიკაძე

გადაეცა წარმოებას 10.09.2018. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 04.12.2019. ქალაქის ზომა 60X84  
1/8. პირობითი ნაბეჭდი თაბახი 5,5. №2924.

საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, კოსტავას 77



Verba volant,  
scripta manent