



**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**

**Геологічний факультет  
Кафедра гідрогеології та інженерної геології**

**А.В.ШОСТАК**

# **ІНЖЕНЕРНА ПЕТРОЛОГІЯ**

**Навчальний посібник**

**Київ – 2010**

УДК 624.131.1

**Р е ц е н з е н т и:**

канд. геол.-мін. наук, доцент Павлов Г.Г.  
канд. геол.-мін. наук, доцент Корнєєнко С.В.

Рекомендовано до друку вченою радою геологічного факультету  
(протокол №2 від 27 жовтня 2010 року)

**Шостак, А.В.**

Інженерна петрологія: навчальний посібник / А.В.Шостак. – Інтернет-ресурс Київського університету. – geol.univ@kiev.ua. – 47 с.

В посібнику викладено основи інженерно-геологічного вивчення гірських порід, оцінки їх фізико-механічних властивостей і методів штучного покращання. Подано уявлення про природу фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних гірських порід, тобто про всі ті процеси, котрі обумовили їх фізичний стан і закономірності змін міцності й деформаційності. Розглядається вплив умов утворення гірських порід, умов їх залягання, складу, будови, тріщинуватості, вивітрілості, напруженого стану та інших чинників на стійкість, міцність, деформаційність і водопроникність.

Для студентів геологорозвідувальних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 624.131.1

## З М І С Т

Вступ .....	4
1. Місце інженерної петрології в загальному циклі геологічних наук. Предмет і об'єкт науки.....	4
2. Принципи вивчення гірських порід в інженерній геології та петрології. ....	5
3. Основні генетичні типи скельних і напівскельних гірських порід. Петрографічна характеристика магматичних, магматичних і осадочних порід. ....	9
4. Вплив речовинного складу, структури і текстури скельних і напівскельних порід на міцність, деформаційність і стійкість. ....	12
5. Вплив умов залягання скельних і напівскельних порід на оцінку умов будівництва на них споруд. ....	15
6. Врахування напруженого стану скельних і напівскельних порід при їх інженерно-геологічній оцінці.....	17
7. Тріщинуватість скельних і напівскельних порід та її врахування під час інженерно-геологічної оцінки.....	19
8. Вплив вивітрювання на властивості скельних і напівскельних порід. ....	23
9. Загальні уявлення про фізико-механічні властивості скельних і напівскельних порід. ....	29
10. Механічні властивості скельних і напівскельних порід. Міцність порід, її природа і умови. ....	35
11. Зміна міцності й деформаційності порід внаслідок високого всебічного тиску і температури. ....	38
12. Зміна фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних порід під впливом гідротермальних процесів та вивітрювання. ....	40
13. Додаткові спеціальні характеристики фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних порід. ....	41
14. Методи штучного покращання властивостей гірських порід. ....	43
Список рекомендованої спеціальної літератури .....	47

## Вступ

Інженерна геологія розглядає широке коло наукових геологічних проблем і розв'язує практичні завдання, що виникають під час проектування та будівництва різноманітних споруд, виконання інженерних робіт з покращання територій та гірничих робіт на родовищах корисних копалин.

Інженерна оцінка територій, обраних для будівництва або іншого господарського використання, визначається в першу чергу їх геологічною будовою – геологічними умовами в широкому розумінні цього слова. Умови утворення різних типів гірських порід позначаються на умовах їх залягання, складі, структурно-текстурних особливостях і в кінцевому рахунку на фізико-механічних властивостях. Правильна літологічна і петрологічна характеристика порід не лише дозволяє зробити остаточну інженерно-геологічну оцінку умов будівництва, але й дає можливість складати інженерно-геологічні прогнози на ранніх стадіях досліджень хімічні властивості. Якщо дослідник іще не має або має в дуже обмежених розмірах результати лабораторних дослідів чи польових робіт, то в цьому випадку літолого-петрологічний опис порід у поєднанні з умовами їх залягання дозволяє приблизно оцінити фізико-механічні властивості та поведінку порід у сфері впливу споруди. Літологічний склад порід у значній мірі визначає як характер показників властивостей, так і методику їх лабораторного і польового визначення.

Встановлення зв'язку між петрологічними особливостями порід та їх фізико-механічними властивостями дає можливість:

- 1) розділяти товщу порід, що складають природну основу споруд, на інженерно-геологічні елементи;
- 2) отримувати не лише числові значення показників фізико-механічних властивостей порід, але й виявляти причини погіршення або покращання властивостей окремих різновидів порід, що має значення для забезпечення нормальних умов експлуатації споруд;
- 3) обирати найдоцільніші місця і способи відбирання проб і методику вивчення властивостей порід;
- 4) обирати найраціональніші способи, конструкції і режими проходження гірничих виробок.

В основу навчального посібника покладено курс лекцій з інженерної петрології, який автор читає для студентів спеціальності «гідрогеологія та інженерна геологія». Автор висловлює щиру вдячність доцентам Г.Г.Павлову та С.В.Корнєєнку за рецензування посібника і висловлені зауваження, а також співробітникам кафедри гідрогеології та інженерної геології за технічну допомогу.

### **1. Місце інженерної петрології в загальному циклі геологічних наук. Предмет і об'єкт науки.**

Гірські породи вивчаються петрологією та її окремими розділами. Петрологія розглядає процеси утворення гірських порід, умови їхнього залягання, а також склад, внутрішню будову та деякі інші ознаки. В цьому випадку метою вивчення є встановлення певних закономірностей розповсюдження родовищ корисних копалин.

Практичні завдання будівельної справи також потребують вивчення гірських порід, але вже з іншою метою. Гірські породи є найважливішим елементом інженерно-геологічних умов територій. Вони беруть участь у їх геологічній будові, визначають характер рельєфу місцевості, розвиток різноманітних геологічних процесів і явищ, в тому числі стихійних. Процеси і явища, в свою чергу, впливають на стійкість територій, споруд, на умови життя й діяльності людей.

Об'єктом інженерної петрології служать гірські породи, що визначають поширення підземних вод і родовищ корисних копалин на тій чи іншій території і водночас служать природною основою для різних споруд, середовищем для них або будівельним матеріалом. Тому вивчення властивостей різноманітних груп гірських порід і

закономірностей розташування їх у земній корі є найважливішою проблемою інженерної геології в цілому та інженерної петрології як одного з великих і цікавих її розділів.

Основні завдання інженерної петрології:

- вивчення природи фізико-механічних властивостей різних генетичних і петрографічних типів гірських порід та просторової мінливості цих властивостей;
- розробка теоретичних основ прогнозування фізико-механічних властивостей гірських порід на різних ділянках і горизонтах земної кори, а також методів їх польових і лабораторних досліджень та штучного покращання.

Вивчення гірських порід в інженерній петрології в кінцевому рахунку спрямовано на дослідження їхньої міцності, деформаційності,

стійкості і водопроникності. Саме ці властивості є предметом інженерної петрології. Під міцністю розуміється властивість гірських порід опиратися руйнуванню внаслідок дії навантаження. Деформаційність характеризується зміною форми будови і об'єму під навантаженням. Стійкість – це здатність порід зберігати даний фізичний стан, міцність і рівновагу, незважаючи на дію різних чинників. До числа останніх можуть належати агенти вивітрювання, сила тяжіння, сили гідростатичного і гідродинамічного тиску та ін. Водопроникністю гірських порід зветься їхня властивість пропускати крізь себе воду.

Перелічені важливі властивості гірських порід визначаються природноісторичними умовами їхнього утворення і, отже, умовами залягання, складом, структурою, текстурою і фізичним станом. Тому вивчення їх в інженерній геології повинно бути петрологічним. Такий підхід до вивчення гірських порід в інженерній геології визначається ще й тим, що вони в земній корі постійно піддаються істотним змінам внаслідок впливу природних геологічних факторів. Основні з них:

- літифікація;
- метаморфізм;
- тектонічні порушення і тріщинуватість;
- вивітрювання.

В інженерній геології досліджуються саме ті особливості складу, будови і властивостей гірських порід, котрі визначають їхню міцність, деформаційність, стійкість і водопроникність. При цьому враховується також вплив на них штучних чинників (техногенних, антропогенних). Вони утворюються при зведенні різних будівель, викритті гірських порід глибокими виїмками, підземними виробками, розвантаженні й розуцільненні, навантаженні й додатковому ущільненні, осушенні й зволоженні, посиленні чи послабленні впливу підземних і поверхневих вод, зміні температурного режиму гірських порід та ін.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Поясніть зв'язок інженерної петрології з іншими геологічними та природничими науками.
2. Що є об'єктом і предметом інженерної петрології?
3. Вкажіть основні завдання інженерної петрології.
4. Наведіть перелік основних властивостей гірських порід, які вивчає інженерна петрологія.

#### **2. Принципи вивчення гірських порід в інженерній геології та петрології.**

В інженерній геології гірські породи вивчаються на різних рівнях:

- молекулярному (для розуміння природи структурних зв'язків між компонентами гірських порід і оцінки їх міцності, деформаційності й стійкості);
- мікроструктурному (для визначення їх мінерального й петрографічного складу та будови (структури і текстури), отже, умов утворення і обумовленості фізико-механічних властивостей);

– макроструктурному (для визначення розмірів, умов залягання і суцільності геологічних тіл, що служать основою, середовищем і будівельним матеріалом для різних споруд).

Оскільки за фізичним станом і властивостями гірські породи неоднорідні, то під час вивчення одних із них користуються до певної міри методами фізики твердого тіла, а інших – методами фізичної і колоїдної хімії (як для дисперсних систем).

Таким чином, при інженерно-геологічному вивченні гірських порід існує певна спрямованість. Вона вимагає:

- детального вивчення всього розрізу гірських порід в межах зони впливу споруд або інженерних робіт;
- виділення в розрізі всіх різновидів порід, що істотно відрізняються за своїми петрографічними ознаками і будівельними властивостями, незалежно від потужності й поширення. Тут особлива увага звертається на виділення слабких з будівельної точки зору різновидів порід, поверхонь і зон ослаблення;
- встановлення і врахування зміни складу, стану і властивостей порід під впливом споруд та прогнозу цих змін;
- широкого застосування спеціальних лабораторних і польових методів дослідження гірських порід;

На попередній стадії досліджень, коли вивчається район імовірного розташування споруди, завдання зводяться до наступного:

- 1) повинні бути виділені генетичні й петрографічні типи гірських порід, що зустрічаються в районі;
- 2) необхідно встановити їхнє поширення, умови залягання і положення в геологічній структурі району;
- 3) треба оцінити вплив кожного різновиду порід на стійкість тих чи інших ділянок місцевості та споруд, що там проєктуються.

На цій стадії робиться попередня петрографічна характеристика і оцінка фізико-механічних властивостей кожного типу гірських порід. Встановлюються їхні специфічні властивості, які можуть впливати на вибір району розташування споруд і на котрі слід звернути увагу на наступній стадії детальніших досліджень. На попередній стадії досліджень властивості гірських порід характеризують узагальненими середніми показниками. Їхнє інженерно-геологічне вивчення виконується головним чином у процесі інженерно-геологічної зйомки та незначних дослідних польових і лабораторних робіт, що її супроводжують.

На стадії детальних вишукувань, при виборі будівельного майданчика і особливо в межах вибраного майданчика або ділянок розташування окремих споруд, інженерно-геологічне вивчення гірських порід полягає у остаточному встановленні послідовності нашарування (стратифікації) відкладів, умов залягання кожного різновиду порід, детальному вивченні їхніх петрографічних особливостей і фізико-механічних властивостей. При цьому необхідно виявити ступінь однорідності й мінливості складу, будови, стану і властивостей кожного різновиду порід за простяганням і потужністю в межах всього будівельного майданчика або ділянки. В результаті такого вивчення встановлюють розрахункові показники фізико-механічних властивостей порід і умови будівництва на них проєктованих споруд. При необхідності намічають заходи, що забезпечать їхню стійкість. На цій стадії дослідні й лабораторні роботи виконуються детальніше, в більшому об'ємі.

Такими є загальні принципи й спрямування вивчення гірських порід в інженерній геології.

Під впливом навколишнього середовища в гірських породах відбуваються безперервні *кількісні* зміни, котрі в кінцевому рахунку призводять до істотних *якісних* змін їхніх властивостей. Так, наприклад, сильно насичений водою розріджений мул у процесі діагенезу (гравітаційного ущільнення, дегідратації, фізико-хімічних процесів та ін.) може

стати вологою пластичною глиною, опісля внаслідок катагенезу – слабо вологою ущільненою глиною, аргілітом. Далі під впливом процесів метаморфізму він може перетворитися на глинистий сланець. Розсипчастий пісок в результаті поступового ущільнення й цементації може стати міцним пісковиком і т.д.

У природних умовах зазвичай стан і властивості окремих різновидів порід змінюються поступово. Для зведення споруд необхідна оцінка властивостей гірських порід як розсипчастих незв'язних і м'яких зв'язних, так і твердих – скельних. Характер і методи такої оцінки різняться залежно від типу й стану порід, типу проєктованої споруди і стадії досліджень.

*Класифікація гірських порід в інженерній геології.* Гірські породи є різноманітними за своїм походженням, складом, будовою і властивостями. Вивчати властивості гірських порід неможливо без систематизації їх у певному порядку, тобто без класифікації. Класифікація – це основний розділ будь-якої природничої науки, який відображає ступінь вивченості предметів, що розглядаються в певному аспекті. Класифікація гірських порід в інженерній геології є, крім того, засобом і методом їхнього пізнання. Вона необхідна для:

- 1) поділу всього різноманіття гірських на групи, що істотно різняться за генетичними і петрографічними ознаками та будівельними якостями, з тим, щоб, користуючись класифікацією, можна було давати попередню інженерно-геологічну оцінку гірських порід;
- 2) побудови інженерно-геологічних карт, розрізів, схем;
- 3) визначення складу, об'єму, методики і напрямку інженерно-геологічного вивчення гірських порід;
- 4) вибору методів покращання властивостей гірських порід.

Єдиної загальноприйнятої класифікації гірських порід в інженерній геології поки що не існує. Це пов'язано з недостатньою вивченістю їхніх властивостей і важкістю однією класифікацією задовольнити різноманітні вимоги будівельної практики. Існують класифікації загальні й спеціальні. Спеціальні класифікації розроблені стосовно до вимог тієї чи іншої галузі будівельної справи. Вони зазвичай ґрунтуються на врахуванні однієї якої-небудь ознаки гірських порід, і в цьому випадку їх підрозділяють досить детально.

Загальні класифікації призначаються для різних галузей будівництва. Вони розроблені з врахуванням кількох або багатьох ознак гірських порід. В них зазвичай виділяються всі найпоширеніші типи гірських порід і дається з тим чи іншим ступенем детальності їхня

будівельна характеристика. Природно, що загальні класифікації менш детальні, ніж спеціальні, тому перші ніби доповнюються останніми.

Із спеціальних класифікацій найпоширенішими є наступні.

*Класифікація за стійкістю порід в укосах.* Мірою такої стійкості є кут природного укосу, тобто граничний, найбільший кут нахилу поверхні укосу при якому гірські породи перебувають ще в стійкому стані (не осипаються, не обвалюються, не сповзають). Використовується для проєктування невисоких насипів, виїмок, гребель та ін.. земляних споруд.

*Класифікація за несучими здатностями порід.* Такі здатності порід визначаються максимальним для них навантаженням, котре не викликає небезпечних деформацій споруд, осідань, порушень їхньої стійкості. Для проєктування та будівництва фундаментів споруд.

*Класифікація за способом і важкістю розробки гірських порід.* В цій будівельній класифікації гірські породи підрозділяються на категорії залежно від того, яким інструментом вони розробляються, з частковим застосуванням вибухових робіт або лише вибуховим способом.

*Класифікація за міцністю порід,* яка характеризується їхнім опором щодо руйнівних зусиль. Це відома класифікація проф.М.М.Протодьяконова. Мірою міцності порід у ній

прийнято коефіцієнт уявного тертя, названий автором коефіцієнтом міцності (використовується в гірничій справі).

*Класифікація за ступенем водопроникності або водопоглинання.* Показниками водопроникності гірських порід, а для скельних і напівскельних порід також їхньої тріщинуватості й закарстованості є коефіцієнт фільтрації і питоме водопоглинання. Коефіцієнт фільтрації характеризує швидкість руху води в породі при напірному градієнті, що дорівнює одиниці. Під питомим водопоглинанням розуміють витрати води (л/хв), яка поглинається гірськими породами, викритими свердловиною, якщо напір становить 1 м, а довжина інтервалу, що випробовується, також 1 м.

Із загальних класифікацій на сьогодні найбільш відомі класифікації М.М.Маслова, Є.М.Сергєєва та Ф.П.Саваренського.

*Основи інженерно-геологічної класифікації гірських порід.* Природною геологічною ознакою для поділу різних порід є їхнє походження. Відповідно до цього виділяються гірські породи вивержені, метаморфічні, осадові й техногенні. Кожен із цих генетичних типів гірських порід досить відокремлений і наділений низкою лише йому притаманних ознак і властивостей. Найважливіші серед них – мінеральний склад, структура, текстура, умови залягання, фізичний стан і фізико-механічні властивості – є прямим наслідком умов утворення гірських порід і умов їхнього існування в земній корі. Всі ці важливі генетичні ознаки дозволяють виділити велику кількість петрографічних типів гірських порід.

Різні генетичні і петрографічні типи порід можуть бути об'єднаними в певні групи за фізико-механічними властивостями. Таким чином можна виділити наступні п'ять груп гірських порід:

- 1) тверді породи – скельні;
- 2) відносно тверді породи – напівскельні;
- 3) сипкі (пухкі) незв'язні породи;
- 4) м'які зв'язні породи;
- 5) породи, особливі за складом, станом і властивостями.

*Скельні породи* найдосконаліші в інженерно-будівельному відношенні. Вони наділені високою міцністю і стійкістю, малою деформативністю і слабкою водопроникністю. Ділянки поширення таких порід є найсприятливішими для будівництва будь-яких споруд без істотних обмежень.

*Напівскельні породи* відрізняються від скельних меншою міцністю і стійкістю, більшою деформативністю значною або високою водопроникністю. Часто вони досить тріщинуваті, а карбонатні породи закарстовані. Напівскельні породи часто зазвичай відзначаються великою неоднорідністю й анізотропністю. Ділянки їхнього поширення у більшості випадків сприятливі для будівництва різних споруд, але часто-густо з дотриманням певних обмежень і застосуванням складних інженерних заходів для забезпечення їхньої стійкості й нормальних умов експлуатації.

*Сипкі (пухкі) незв'язні та м'які зв'язні породи* в порівнянні зі скельними й напівскельними характеризуються значно меншою міцністю і стійкістю та великою деформативністю. Деякі з них сильно водопроникні. Ці групи охоплюють різноманітні генетичні типи осадових порід головним чином четвертинного віку. Вони відзначаються великою мінливістю фізичного стану і властивостей. Умови будівництва споруд на таких породах часто поєднуються з великими обмеженнями.

*Породи, особливі за складом, станом і властивостями*, як правило, слабкі в будівельному відношенні, і тому при виборі місць для будівництва намагаються по можливості уникати ділянок, складених ними. Виділення цих порід в одну групу логічно цілком виправдано не лише тим, що вони наділені особливими будівельними якостями, але й їхнім екстремальним положенням в геологічних рядах утворень земної кори. В цих рядах відображені процеси гуміфікації, літифікації, метаморфізму, розчинності, перетворень та ін. Так, наприклад, торф займає крайнє (екстремальне) положення в ряду:



торф – буре вугілля – кам’яне вугілля – антрацит; глинистий мул – в ряду: мули – м’які глини – ущільнені глини – аргіліти – аргіліти зі слідами сланцюватості – філіти і т.д.; піщаний мул – пісок – слабкий пісковик – міцний пісковик і т.д.; легкорозчинні породи (кам’яна сіль) – розчинні (гіпси, ангідрити) – важкорозчинні (карбонатні) – практично нерозчинні; породи техногенно мало змінені – помітно змінені – перетворені – новостворені.

Запитання для самоконтролю.

1. На що спрямоване інженерно-геологічне вивчення гірських порід?
2. Якими завданнями характеризується попередня і детальна стадії інженерно-геологічних досліджень?
3. Наведіть приклади спеціальних класифікацій гірських порід у інженерній геології.
4. На які групи за фізико-механічними властивостями поділяються гірські породи?

**3. Основні генетичні типи скельних і напівскельних гірських порід. Петрографічна характеристика магматичних, метаморфічних і осадочних порід.**

*Скельні гірські породи* характеризуються високою міцністю, малими деформаційністю і водопроникністю, високою стійкістю і опором до впливу атмосферних чинників. Генетично вони підрозділяються на:

- магматичні масивно кристалічні;
- метаморфічні масивно- і шарувато-кристалічні;
- осадочні міцнозцементовані.

Напівскельні гірські породи відрізняються від скельних дещо зниженими показниками фізико-механічних властивостей внаслідок особливостей складу, будови і фізичного стану (тріщинуватості, вивітрілості та ін.). До цієї групи належать:

- 1) магматичні, метаморфічні і осадочні міцнозцементовані, що характеризуються підвищеними тріщинуватістю і вивітрілістю;
- 2) уламкові слабо зцементовані;
- 3) глинисті високого ступеня літифікації;
- 4) органогенні й органогенно-хімічні;
- 5) пірокластичні й ефузивно-осадочні зцементовані;
- 6) техногенні – різноманітні природні породи, штучно ущільнені й закріплені різними засобами.

Як відомо, магматичні гірські породи утворюються з магматичних розплавів. Залежно від складу магми, умов її застигання і кристалізації в земній корі утворюються гірські породи того чи іншого складу і структури.

Під впливом тектонічних рухів магматичні маси, проникаючи в товщу земної кори, піддаються тиску з боку мас бокових порід, що рухаються. Такий тиск призводить до витікання магми в напрямках, перпендикулярних до нього. В цю фазу початкової магматичної тектоніки – прототектоніки – починають зароджуватися й розвиватися текстурні особливості породи. Вони проявляються в рівномірному або нерівномірному розподілі в ній орієнтованих кристалів мінералів, шлірових виділень, ксенолітів, слідів флюїдності, лінійності, смугастості, сланцюватості тощо. Все це в кінцевому рахунку створює неоднорідність, анізотропність породи, формує поверхні й зони послаблення, явні або приховані.

В міру вистигання й кристалізації магматичних мас під впливом внутрішніх сил і тектонічних рухів, що продовжуються (боковий тиск), у затверділому масиві утворюються системи прихованих, закритих і відкритих мікро- і макро тріщин, розколин і розломів. По них, як по каналах, піднімаються магматичні розчини, котрі, застигаючи, утворюють жили, дайки і т.п. Ці процеси характеризують пізньомагматичну фазу формування магматичного масиву. Деякі системи тріщин, розколин і розломів з’являються після повного затухання магматичних процесів, у пост магматичну фазу або навіть під

час наступних тектонічних циклів. Всі ці явища пізньо- і постмагматичної фаз створюють внутрішню структуру маси магматичних порід із притаманними їм «дефектами», котрі впливають на їхню міцність, деформаційність, стійкість, водопроникність, водоносність тощо.

Таким чином, формування магматичних порід протікає в особливих термодинамічних умовах, які створюють великі внутрішні напруження стискання, за постійного впливу зовнішніх тектонічних рухів (боковий тиск). Ці значні внутрішні напруження в породах проявляються в їхніх структурно-петрографічних особливостях.

Із наведеного випливає, що інженерно-геологічна характеристика скельних магматичних порід у *зразку* завжди повинна істотно відрізнятися від характеристики, котру вони мають в умовах природного залягання. Тому в основі інженерно-геологічного вивчення цих порід повинні бути структурно-петрографічні й структурно-тектонічні польові спостереження й дослідження. Лабораторні дослідження магматичних порід дозволяють розширити характеристику їхніх властивостей, але змінити польову оцінку місць розташування споруд, умов їхнього будівництва і прогноз стійкості не можуть.

Сукупність процесів утворення осадків і осадочних порід прийнято називати *літогенезом*. Вивчення загального ходу і закономірностей літогенезу – завдання складне, а вивчення формування властивостей осадочних порід у процесі їхнього утворення й існування в земній корі – завдання ще складніше. Однак треба чітко уявляти, що знання способу й умов утворення осадочних товщ – це знання властивостей осадочних порід.

Як відомо, утворення осадочної породи відбувається в декілька послідовних етапів:

- 1) утворення початкового матеріалу внаслідок вивітрювання материнських порід;
- 2) перенесення цього матеріалу і часткове відкладення на шляхах переміщення;
- 3) відкладення осадочного матеріалу в кінцевих пунктах осадконакопичення;
- 4) перетворення осадків на породи;

5) зміна порід у земній корі при прогресивному розвитку осадочного процесу або їхнє руйнування, вивітрювання – при регресивному. Останні два етапи – перетворення осадку на породу (діагенез) і зміна порід у земній корі (катагенез) – становлять собою стадії літифікації, тобто скам'яніння спочатку осадку, а потім породи.

Метаморфічні породи утворюються з магматичних і осадочних порід різного складу в результаті глибокого їхнього перетворення під впливом високих температур (до 850–900<sup>0</sup>C) і тиску (до 1–2 тис. МПа), дії гарячих розчинів і летючих компонентів. Велике значення при цьому має і склад вихідних порід.

Ступінь перетворення й зміни первинних порід при метаморфізмі залежить від тієї фізико-хімічної й термодинамічної обстановки, в якій вони опинилися. Оскільки в різних зонах земної кори обстановка неоднакова, то розрізняють три головні ступені метаморфізму – низькотемпературний, середньотемпературний і високотемпературний.

*Низькотемпературний* ступінь характеризується слабким проявом метаморфізму внаслідок помірних температур і тиску. При порівняно значному одnobічному тектонічному тиску відбувається катаклаз порід і заміна без гідроксильних мінералів на мінерали, що містять гідроксил або воду. На цьому ступені утворюються такі породи, як філіти, талькові й хлоритові та інші метаморфічні сланці.

*Середньотемпературний* ступінь характеризується значним проявом метаморфізму внаслідок більш високих температур і тиску, а інколи й значного одностороннього тиску. Тут утворюються різні мінерали, що не утримують гідроксильну воду, поряд із мінералами, які містять її в собі. Для цього ступеня характерні різноманітні кристалічні сланці, слюдяні сланці, кварцити, мармури, амфіболіти.

Для *високотемпературного* ступеня властивий найінтенсивніший прояв метаморфізму внаслідок високих температур і тиску, причому тиску часто спрямованого. Тут утворюються без гідроксильні мінерали. Сланцюватість порід проявляється слабкіше, кристалізація стає досконалішою. На цьому ступеня утворюються різні гнейси (біотитові, піроксенові та ін.), мармури, кварцити, амфіболіти тощо.

*Пірокластичні породи.* Вони утворюються за участю продуктів вулканічних вивержень. Тому в їхньому складі поряд із нормально-осадочним матеріалом присутній пірокластичний матеріал, представлений пелітовими і алевритовими (вулканічний попіл), псамітовими (вулканічний пісок) і псефітовими частками (ляпілі – уламки розміром від 2-3 до 20-25 мм і вулканічні бомби – уламки більших розмірів до брил включно). Залежно від вмісту цього матеріалу серед пірокластичних порід виділяють туфи, туфіти і туфогенні породи.

Пірокластичні породи зазвичай складаються з уламків вулканічного скла, кристалів різних мінералів (кварцу, польових шпатів, біотиту, піроксену, амфіболу та ін.) і ефузивних порід. Важливою складовою частиною пірокластичних порід є їхній цемент. У туфітах і туфогенних породах цемент завжди містить нормально-осадочний матеріал або цілком складається з нього. У туфах цемент зазвичай складається з тонко дисперсного вулканічного матеріалу, головним чином із часток вулканічного скла. Пірокластичні зцементовані породи нерідко наділені значною міцністю і тривкістю. Вони зазвичай залягають серед ефузивних і осадочних утворень у вигляді прошарків, лінз і пластів. За зовнішнім виглядом вони мають різноманітне забарвлення і як масивну, так і шарувату текстуру.

*Уламкові породи.* Скельні й напівскельні уламкові породи утворюються в результаті цементації уламкового матеріалу або в процесі його накопичення, або після відкладення. Спосіб і умови відкладення уламкового матеріалу можуть бути різними, тому існує велике різноманіття генетичних типів різних конгломератів і брекчій, пісковиків і алевролітів. Грубоуламкові породи (конгломерати і брекчії) найчастіше зустрічаються в гірсько-складчастих областях, де утворюють товщі потужністю в десятки, сотні й навіть тисячі метрів, тоді як на платформах вони залягають у товщах інших порід у вигляді невеликих прошарків і шарів. Пісковики й алевроліти зустрічаються значно частіше, ніж конгломерати і брекчії. Вони широко розповсюджені як на платформах, так і в гірсько-складчастих областях і складають приблизно 15-20% об'єму осадочної оболонки земної кори.

Важливою складовою частиною вказаних типів порід є цемент, що скріплює уламковий матеріал і перетворює сипкий осадок у зцементовану гірську породу. Склад цементу, його будова і взаємовідношення з уламковими частками характеризуються великим різноманіттям. За часом утворення цемент може бути первинним, тобто таким, що утворився одночасно з осадженням уламкового матеріалу, і вторинним, коли цементация уламкового матеріалу відбулася після його відкладення.

За мінеральним складом розрізняють цемент глинистий, кременистий, опаловий, халцедоновий, кварцовий, карбонатний (кальцитовий, доломітовий, сидеритовий), залістий, піритовий, глауконітовий, фосфатний, сульфатний (гіпсовий, ангідритовий, баритовий) та ін.

За співвідношенням цементу й уламкових часток розрізняють декілька типів цементация порід:

*базальний*, коли уламкові частки занурені в цемент і між собою не дотикаються;

*поровий*, що заповнює вільний простір (пори) між уламковими частками, що дотикаються;

*цемент дотикання* (контактовий), коли цементуюча речовина знаходиться лише в місцях зближення – дотикання уламкових часток.

Отже, тип цементация до певної міри зумовлюється кількістю цементу в породі. Коли цементу багато, то характер цементация породи базальний або поровий, коли ж цементу мало, він накопичується в місцях зближення зерен уламкового матеріалу.

*Глинисті породи.* Глинистих порід, котрі за міцністю і стійкістю можна було б класифікувати як скельні, не існує, виділяються тільки напівскельні породи. До цієї групи входять різновиди підвищеного ступеня літифікації – аргіліти і деякі глинисті сланці.

Вони широко розповсюджені як у гірсько-складчастих областях, так і на платформах, складають потужні товщі, шари й пачки перешарування з алевролітами й пісковиками.

Аргіліти становлять собою глинисті породи, котрі під впливом значного гравітаційного навантаження або тектонічних тисків сильно ущільнені й дегідратовані. Процес ущільнення глинистої речовини при цьому зазвичай супроводжується його частковою перекристалізацією і цементацією та в деяких випадках проявом удаваної шаруватості – сланцюватості.

Залежно від переважаючих мінералів або характерних домішок розрізняють аргіліти гідрослюдисті, каолінітово-гідрослюдисті, каолінітові, вапняковисті, вуглисті, бітумінозні та ін.

Аргіліти зазвичай мають темне забарвлення (сіре, зелене, чорне, буре, коричневе та ін.), але світлішу, ніж глини, з яких вони утворилися. На дотик вони становлять собою слабо вологу або майже суху тверду породу, часто з масним блиском, що важко розламується і розтирається в руках; рідше зустрічаються аргіліти напівтвердої консистенції. Злам у них зазвичай мушлястий. За природної вологості вони в більшості випадків не розмокають у воді, але деякі різновиди при зволоженні набрякають. На повітрі вони, як правило, швидко розтріскуються і розсипаються на дрібну неправильної форми гострокутну щєбінку.

Вода в аргілітах присутня лише фізично зв'язана. Тому структурні зв'язки відзначаються підвищеною міцністю, вони головним чином конденсаційно-кристалізаційні. Структура аргілітів пелітова або алевро-пелітова, зустрічаються різновиди з оолітовою, криптозернистою (прихованокристалічною) структурою, що переходить у мікролепідобластову.

Деякі аргіліти містять домішки водорозчинних солей, вуглистої речовини, мушлі молюсків та ін. Текстура їх масивна, неясношарувата, смугаста. Зустрічаються різновиди й шаруваті, що є перехідними від осадочних порід до метаморфічних. Це зазвичай сухі тверді породи з вираженим у тій чи іншій мірі ступенем сланцюватості й анізотропністю водних і механічних властивостей.

Отже, аргіліти можна класифікувати за мінеральним складом, характерними домішками, забарвленням, структурними й текстурними ознаками.

*Органогенні й хемогенні породи.* Із скельних і напівскельних порід тут найбільший інтерес в інженерно-геологічному відношенні становлять карбонатні породи – вапняки, доломіти, мергелі, крейда і крейдо подібні породи, а також кременисті – діатоміти, трепели, опоки та ін. Найголовнішими складовими карбонатних порід є кальцит, доломіт і теригенні мінерали, рідше в них присутні сидерит, магнезит та ін.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Які різновиди порід належать до скельних і напівскельних?
2. Поясніть термодинамічні умови формування магматичних порід
3. Якими є етапи утворення осадочної породи?
4. Наведіть порівняльну характеристику ступенів метаморфізму порід за температурою.
5. Яким чином відбувається утворення уламкових скельних і напівскельних порід?
6. Вкажіть типи цементації у породах

#### **4. Вплив речовинного складу, структури і текстури скельних і напівскельних порід на міцність, деформаційність і стійкість.**

Речовинний склад магматичних і метаморфічних порід визначається їхнім мінеральним складом, а порід осадочних – мінеральним складом кристалів мінералів і їх уламків, складом уламків порід, а також складом різних домішок і цементаційної речовини.

Властивості мінералів, з яких складаються гірські породи, залежать від їхнього хімічного складу, характеру зв'язків між матеріальними частками і структури кристалічної ґратки. Як відомо, матеріальні частки, з яких складаються кристали мінералів, їхні уламки й агрегати можуть бути електрично нейтральними (атоми, молекули) або зарядженими (іони). За допомогою структурних зв'язків ці матеріальні частки поєднані певним чином між собою і, геометрично правильно розташовуючись у просторі, утворюють кристалічну ґратку мінералів.

Структурні зв'язки в кристалах мінералів обумовлені міжатомними силами. Вони неоднакові між різними частками. Виділяються чотири основні типи структурних зв'язків – *іонні, ковалентні, металічні й молекулярні*. Ковалентні зв'язки відрізняються від іонних значно більшою міцністю, металічні слабкіші від іонних, а молекулярні – найслабкіші. Мінерали можуть мати структури зі зв'язками лише одного типу (гомодесмічні сполуки), але найпоширенішими є мінерали з двома та більше типами зв'язків (гетеродесмічні сполуки).

З усіх основних типів кристалічних структур мінералів найбільшу щільність упакування часток у кристалічній ґратці мають координаційні й острівні, а кільцеві дещо меншу. Ланцюжкові мінерали мають пухку, а шаруваті й каркасні ще пухкішу кристалічну ґратку. Кристалічні ґратки мінералів можуть мати ті чи інші недосконалості (дефекти), від яких у значній мірі залежать властивості мінералів. Відомо, наприклад, що механічна міцність мінералів фактично менша від можливої їхньої теоретичної міцності. Наявність різних дефектів у кристалічній ґратці мінералів сприяє їхній деформації й руйнуванню під впливом зовнішніх зусиль.

Розрізняють наступні основні типи недосконалості кристалічної ґратки мінералів.

1. Вакансії, або «дірки», тобто не зайняті атомами вузли кристалічної ґратки.
2. Замісні атоми – атоми чужорідної речовини, що відрізняються за розмірами й властивостями від атомів основної речовини, – займають вузли кристалічної ґратки.
3. Впроваджені атоми – атоми чужорідної або основної речовини, розташовані між вузлами кристалічної ґратки.
4. Спотворення (дислокації) правильного розташування атомів у кристалічній ґратці як результат мікро пластичних деформацій вздовж паралельних поверхонь.
5. Подвійність, тобто переміщення частини кристалу як одного цілого в інше порівняно з початковим положення.
6. Включення в мінералах сторонньої речовини у вигляді тонко розпилених часток або пухирців води й газу.
7. Прокладання мінералів іншого виду всередині кристалічного індивіду.

Стійкість мінералів проти вивітрювання, як і ряд інших властивостей, визначається сумарною енергією їхньої кристалічної ґратки. Як відомо, кожний іон наділений певною кількістю енергії, котра при утворенні кристалічної ґратки мінералів, при зближенні іонів, вивільнюється. На руйнування мінералів повинна бути витраченою така ж кількість енергії, яка виділилася під час їхнього утворення.

Стійкість мінералів щодо вивітрювання залежить не тільки від їхньої сумарної енергії, але й від будови власне ґратки. Наприклад, острівні силікати типу олівіну розкладаються легше, ніж ланцюжкові типу піроксену й авгіту. Важче розкладаються впорядковані шаруваті силікати, легше – невпорядковані. Для нешаруватих силікатів відзначається посилення міцності енергії зв'язку зі збільшенням вмісту  $\text{SiO}_2$ . Мінерали, що містять закис заліза, наприклад біотит, швидше руйнуються, бо при вивітрюванні відбувається швидке окислення заліза, виділення тепла й розхитування ґратки.

На сьогодні стійкість мінералів щодо вивітрювання можна охарактеризувати наступним чином. Дуже стійким проти вивітрювання із головних породоутворюючих мінералів є кварц; менш стійкими – мусковіт, ортоклаз, мікроклін; помірно стійкими – натрієво-кальцієві польові шпати – кислі плагіоклази (альбіт, олігоклаз), амфіболи (рогова обманка), піроксени (авгіт), кальцит. Малостійкими є кальцієво-натрієві кристалічної

гратки. Отже, щоб зрозуміти причини зміни щільності гірських польові шпати – основні плагіоклази (анортит), фельдшпати (лейцит, нефелін), олівін, біотит, гіпс. Із акцесорних породоутворюючих мінералів дуже стійкі циркон, гранат, турмалін, корунд, топаз, андалузит, ставроліт, рутил, шпінель, флюорит, монацит; менш стійкі – магнезит, ільменіт; нестійкі – пірит, піротин, гематит, апатит, глауконіт.

Природно, що неоднакова стійкість різних породоутворюючих мінералів відбивається й на стійкості гірських порід. За інших однакових умов навколишнього середовища стійкість гірських порід проти вивітрювання залежить від їхнього мінерального складу, тобто від асоціації мінералів, що складають породу. Польовошпатові породи вивітрюються швидше, ніж безпольовошпатові, за виключенням розчинних порід (вапняки, гіпс тощо). Породи з польовими шпатами, кварцом і слюдою вивітрюються швидше, ніж ті ж породи, але мало слюдисті або зовсім без слюди. Із слюдистих порід легше вивітрюються ті, що містять магнезіальні темні слюди, ніж породи, які містять світлу калієву слюду. Породи з вапняковистим авгітом вивітрюються швидше від порід, що містять вапняковисту рогову обманку.

Під час оцінки стану змінності порід необхідно звертати увагу також на свіжість польових шпатів (помутніння, розтріскування), їхню каолінізацію, епідотизацію, хлоритизацію, серпентинизацію, а також на характер розподілу (рівномірний чи нерівномірний) нестійких мінералів у породі. Все це дозволить дати якісну оцінку будівельних властивостей гірських порід, оцінити їх схильність до руйнування при вивітрюванні.

Мінеральним складом гірських порід визначається щільність (густина) їх мінеральної частини. Щільність основних породоутворюючих мінералів скельних і напівскельних порід змінюється в основному від 2,50 до 3,10-3,20 г/см<sup>3</sup>. Великий вплив на щільність мінералів справляє структура кристалічної гратки. Наприклад, кальцит і арагоніт мають однаковий хімічний склад, а щільність у них різна – відповідно 2,71-2,72 і 2,90-3,00 г/см<sup>3</sup>, що пов'язано зі щільнішим упакуванням атомів у гратці арагоніту. Іншим характерним прикладом є графіт і алмаз – 2,2 і 3,5 г/см<sup>3</sup> – внаслідок різної будови порід, треба вивчати їх мінеральний і хімічний склад. Мінеральний склад впливає також на міцність і твердість скельних і напівскельних гірських порід. Слід враховувати, що міцність і твердість мінералів – це не те саме, що міцність і твердість гірських порід, які становлять собою агрегат, котрий складається з різних мінералів. Зазвичай міцність і твердість у мінералів є набагато вищою, ніж у гірських порід.

Твердість характеризується опором, що виявляє тіло при проникненні в нього іншого тіла, тобто твердість – це міцність на вдавлювання. Отже, міцність є загальною властивістю тіла, а твердість – частковий випадок прояву міцності.

Стисливість мінералів залежить від типу структурних зв'язків та структури їхньої кристалічної гратки. Мінерали з ковалентними й іонними зв'язками, що мають щільнішу структуру – координаційну й острівну, – стискаються слабко. Мінерали гетеродесмічні, що мають молекулярні зв'язки між шарами, ланцюжками і кільцями кремнекисневих тетраєдрів, тобто пухкіші структури (ланцюжкові, шаруваті й каркасні), стискаються сильніше.

У багатьох породоутворюючих мінералів існує чітко виражена механічна анізотропність. Добре відомий, наприклад, вплив спайності у слюд, польових шпатів та інших мінералів на зменшення їхнього опору руйнуванню. Значну анізотропність має кварц. Залежно від того, до якої грані прикладене стисне зусилля, його модуль пружності характеризується наступними шістьма значеннями, МПа: 86800, 7100, 14400, 17200, 107500 і 58200. Крайні значення модуля пружності у кварцу можуть різнитися між собою більше ніж у 15 разів.

Вже було сказано, що речовинний склад осадових порід визначається не лише мінеральним складом уламків порід і мінералів, що їх складають, але також складом домішок і цементу. Наявність домішок має найважливіше значення для карбонатних

порід, а склад цементу – для порід уламкових зцементованих. Так, наприклад, карбонатні породи, крім основних породоутворюючих мінералів – кальциту, доломіту й інших карбонатів – часто містять домішку кремнезему, глинистої речовини, гіпсу та ін. Домішки кремнезему у вапняках знижують їхню розчинність і підвищують міцність. Тому кременисті вапняки щільної будови, зазвичай дуже міцні й стійкі, класифікуються як породи скельні.

Глиниста речовина у вапняках підвищує при зволоженні їхнє пом'якшення, знижує міцність, хоча дещо утруднює розчинність.

Зі збільшенням вмісту глинистої речовини вапняки переходять у карбонатно-глинисті породи, тобто глинисті вапняки, мергелі тощо. Всі ці різновиди відносяться вже до напівскельних порід.

Важливою складовою уламкових зцементованих порід є цемент. Уламкові породи з кременистим цементом найміцніші і найстійкіші проти вивітрювання. Порівняно високою міцністю наділені уламкові породи з карбонатним і залістим цементом. Тому різні конгломерати, брекчії й особливо пісковики і алевроліти з кременистим, карбонатним або залістим цементом, що мають масивну будову (зливні пісковики й алевроліти), належать до скельних порід. Конгломерати, пісковики і алевроліти з глинистим, гіпсовим або іншими слабкими цементами відносяться до напівскельних порід, вони мають понижену міцність і неводостійкі.

На стійкість і міцність скельних і напівскельних порід суттєвий вплив справляють також їхня структура і текстура. У магматичних і частково метаморфічних породах структура характеризується головним чином:

- 1) ступенем кристалічності породи (повнокристалічні, порфірові, прихованокристалічні і склянисті);
- 2) абсолютними розмірами кристалів, що складають породу (великозернисті, середньозернисті, дрібнозернисті, афанітові – прихованокристалічні, склянисті);
- 3) відносними розмірами кристалів, що складають породу (рівномірнозернисті, нерівномірнозернисті, порфірові та ін.).

Найміцнішими і найстійкішими є породи, що мають повнокристалічну рівномірно-середньозернисту або дрібнозернисту структури. Породи великозернисті, грубозернисті, гігантозернисті є більш податливими до руйнування як за механічного впливу, так і при різких змінах температури. Великі кристали з вираженою спайністю у великозернистих, порфіро видних та інших породах легко розколюються, вивітрюються і викришуються з породи, порушуючи її монолітність. Склянисті породи швидко розтріскуються при різких змінах температури.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Назвіть і охарактеризуйте типи структурних зв'язків у кристалах мінералів.
2. Якими є основні типи недосконалості кристалічної ґратки мінералів?
3. Чим обумовлюється стійкість мінералів щодо вивітрювання?
4. Поясніть відмінності між міцністю і твердістю мінералів?
5. Від чого залежить щільність гірських порід?
6. Яким чином тип цементу впливає на властивості порід?

### **5. Вплив умов залягання скельних і напівскельних порід на оцінку умов будівництва на них споруд.**

Умови залягання гірських порід визначаються формою залягання порід, витриманістю їхньої потужності й простягання, співвідношенням з іншими породами і ступенем порушеності початкового залягання тектонічними рухами.

На платформах породи залягають спокійно, майже горизонтально або утворюють складки з порівняно пологими крилами. Поряд із цим тут породи менш ущільнені й менш міцні; зустрічаються сипкі піщані, а також пластичні глинисті різновиди, причому не лише серед палеоген-неогенових або мезозойських відкладів, але й серед палеозойських.

У складчастих областях всі породи зазвичай сильно дислоковані, тут широко розповсюджені різноманітні види порушень суцільності порід – скиди, зсуви, що супроводжуються подрібненістю, тріщинуватістю порід, тектонічними брекчіями, мілонітами і т.д. Однак на ділянках, не порушених розривами, породи відзначаються великою щільністю, міцністю, жорсткістю і напруженістю.

Отже, в різних тектонічних областях умови залягання гірських порід, так само, як і їхній фізичний стан і міцність, є різними.

Скельні й напівскельні гірські породи залежно від умов утворення можуть мати різні форми залягання. Вони можуть утворювати різні за розмірами і формою масиви, дайки, штоки, жили, покриви, потоки, куполи, товщі, пачки, шари або поклади різної потужності й витриманості за простяганням.

Магматичні глибинні й напівглибинні породи утворюють у більшості випадків великі або порівняно великі інтрузивні тіла – масиви, батоліти, лаколіти та ін. За таких розмірів і форм залягання на них можуть повністю розташовуватися великі споруди. Наприклад, на гранітах повністю розміщена Дніпровська ГЕС, а Кременчуцька й Дніпродзержинська – частково.

Вивержені породи утворюють покриви, потоки, куполи, пластові поклади, які перешаровуються з осадочними й ефузивно-осадочними породами. Інколи ефузивні породи утворюють потоки або покриви, котрі перекривають слабкі відклади четвертинного віку.

Умови залягання метаморфічних порід залежать у значній мірі від умов залягання висхідних порід, з яких вони утворилися. При регіональному метаморфізмі, що охоплює значні площі, утворюються товщі великої потужності; на них можуть розташовуватися великі споруди. При локальному метаморфізмі спостерігається швидка зміна різних типів порід із різним фізичним станом. У цих випадках на невеликих площах геологічні умови можуть виявитися неоднорідними й складними.

Осадочним породам залежно від умов відкладення властиві різні форми залягання. Так, наприклад, морські відклади зазвичай мають витримане за простяганням регіональне поширення, залягають у вигляді товщ і світ, потужність яких часто досягає сотень і навіть тисяч метрів. Лагунні відклади мають також порівняно широке регіональне поширення й залягають у вигляді товщ, потужність яких вимірюється десятками або сотнями метрів. Однак потужність цих відкладів більш мінлива, ніж потужність порід морського походження. Для лагунних відкладів характерний складний геологічний розріз, обумовлений частим і неправильним перешаруванням порід різного петрографічного складу, серед яких часто зустрічаються породи нестійкі, розчинні (гіпси, ангідрити, гіпсоносні породи та ін.).

Континентальні відклади в цілому порівняно з морськими характеризуються ще більшою невитриманістю поширення і мінливою потужністю. Вони залягають у вигляді покривів, товщ, шарів, пластоподібних покладів, лінз, гнізд і т.п.

Для геологічної будови осадочних товщ в цілому одним із найбільш загальних правил є шарувата будова, утворення структур нашарування. Під час опису й оцінки таких структур важливо розрізняти зміну петрографічного складу порід у вертикальному розрізі і утворення розподілів між шарами. Обидві ці ознаки в інженерно-геологічному відношенні мають виключно важливе значення. Вони вказують на неоднорідність, тобто на поширення в розрізі осадочних порід не одного роду за складом, будовою, фізичним станом і властивостями, а часто й за зовнішнім виглядом і забарвленням, а також на наявність у них поверхонь розподілу – зон, прошарків і шарів слабких порід, тобто поверхонь ослаблення. Такі поверхні розподілу нерідко підкреслюються появою тріщин нашарування, орієнтованих по площинах шаруватості. Все це впливає на міцність і стійкість гірських порід, особливо коли вони відслонюються в котлованах, виїмках, укосах, тому що показує напрямки, по яких можливі понижені опори їх сколюванню або зсуву, а в підземних виробках, крім того, відшарування та обрушення.



Запитання для самоконтролю.

1. Чим відрізняються умови залягання порід на платформах та у складчастих областях?
2. Які форми залягання характерні для магматичних, метаморфічних і осадових порід?
3. Дайте порівняльну характеристику залягання континентальних і морських відкладів.

**6. Врахування напруженого стану скельних і напівскельних порід при їх інженерно-геологічній оцінці.**

Гірські породи в умовах природного залягання зазвичай перебувають у стані всебічного стиснення. Воно розвивається під впливом ваги мас гірських порід, що залягають вище (гравітаційних сил), тектонічних рухів (тектонічних сил), температурних градієнтів і геохімічних процесів. Внутрішні напруження в скельних і напівскельних породах створюються вже під час їхнього формування: в магматичних при вистиганні й розкристалізації магми, в осадових при гравітаційному й геохімічному ущільненні осадків, у метаморфічних при перекристалізації вихідних осадових і магматичних порід та тектонічних рухах, що супроводжують ці процеси.

Таким чином, компоненти, що складають скельні й напівскельні породи, – кристали мінералів, їхні уламки й уламки гірських порід – кристалізуються, ущільнюються й цементуються в стисломому стані під впливом контракційних, гравітаційних і головним чином тектонічних сил. Однак сучасний напружений стан гірських порід обумовлений головним чином новітніми й сучасними геологічними процесами. Свідченням того, що гірські породи в сучасну геологічну епоху перебувають у напруженому стані, є землетруси, неотектонічні рухи, прояви різних динамічних форм гірничого тиску в гірничих виробках (стріляння, викиди вугілля й газів, гірничі удари), розущільнення порід, поява тріщин, систем і зон тріщин пружного відпирання в гірських породах при їхньому розвантаженні, аномально високий пластовий тиск на нафтових і газових родовищах та інші явища. Тому при проектуванні й будівництві споруд загальновищаною є необхідність врахування напруженого стану порід і пов'язаних з ним явищ.

Гравітаційні навантаження на платформах в осадових породах можуть досягати 120-150 МПа, а в геосинклінальних зонах – 400-500 МПа і більше. У приповерхневих горизонтах земної кори напруження в гірських породах від ваги порід, що залягають вище, перебувають зазвичай у межах від десятих часток мегапаскаля на глибині 10-20 м до 2-3 МПа на глибині 1000 м. Тектонічні сили викликають напруження до тисяч мегапаскалів.

Донедавна при визначенні внутрішніх напружень у гірських породах виходили з теорії, сформульованої швейцарським геологом А.Геймом (1878 р.). Відповідно до цієї теорії напруження в гірських породах визначаються глибиною їхнього залягання від поверхні землі

$$\sigma_1 = \gamma H, \quad (6.1)$$

де  $\sigma_1$  – вертикальне головне напруження, Па, МПа;  $\gamma$  – щільність порід, г/см<sup>3</sup>;  $H$  – глибина залягання порід, м.

А.Гейм припускав, що напруження в земній корі поширюються за гідростатичним законом, тобто  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , де  $\sigma_2 = \sigma_3$  – горизонтальні головні напруження, Па, МПа.

Російський вчений акад.О.М.Динник (1925) показав, що тверді гірські породи до деякої досить значної глибини перебувають у пружному стані і їхні деформації в значній мірі підкоряються закону Гука. Тому напруження в таких породах не скрізь підкоряються гідростатичному закону, а горизонтальні напруження залежать від коефіцієнта бокового

тиску, котрий показує, яка частина вертикального навантаження передається в боки, тобто  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \xi$ , (6.2)

де  $\sigma_2 = \sigma_3$  – горизонтальні головні напруження, Па, МПа;  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску, що дорівнює  $\mu/(1-\mu)$ ;  $\mu$  – коефіцієнт поперечної деформації гірських порід – коефіцієнт Пуасона.

Отже, згідно з теоретичними уявленнями О.М.Динника, горизонтальні напруження у твердих гірських породах дорівнюють

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H \mu / (1 - \mu). \quad (6.3)$$

Коефіцієнт поперечної деформації скельних і напівскельних порід змінюється від 0,10 до 0,40, а піщаних і м'яких глинистих – від 0,2 до 0,5. Отже, коефіцієнт бокового тиску може досягати максимального значення, рівного одиниці, на глибинах, що становлять практичний інтерес, лише в м'яких глинистих породах. На сьогодні в результаті чисельних спостережень і досліджень отримано обширний фактичний матеріал, котрий показує, що теоретичні положення А.Гейма і О.М.Динника можуть застосовуватися з певними обмеженнями. У багатьох випадках безпосередні виміри, виконані на глибинах від 6-15 до 1000-1100 м від поверхні землі, показують, що гірські породи витримують природні напруження значно більші, ніж тиски, що визначаються розрахунковим шляхом за теорією А.Гейма і О.М.Динника. При цьому горизонтальна складова напружень досягає 30-78 МПа і значно перевищує вертикальну, тобто має надлишкове значення, як і виміряні вертикальні напруження, котрі в 3-4 рази більші від розрахованих за А.Геймом і О.М.Динником.

На всі складові напруження великий вплив справляють петрографічні особливості гірських порід і їхні фізико-механічні властивості. Сюди входять їхня приналежність до тієї чи іншої групи за інженерно-геологічною класифікацією, структурно-тектонічне положення порід у земній корі, їхня дислокованість, тріщинуватість, вивітрілість та інші чинники. Крім того, на зміни й перерозподіл напружень у гірських породах справляють вплив розташування регіональних тектонічних порушень і розвантаження гірських порід, що виникає внаслідок процесів денудації, ерозійних врізань і при викритті їх гірничими виробками.

Розподіл надлишкових напружень у гірських породах показує, що вони пов'язані переважно з областями активних новітніх і сучасних тектонічних рухів. Тому не можна вважати ці напруження «залишковими», що збереглися від більш віддалених геологічних епох. Їхній зв'язок із пізньокайнозойськими рухами підтверджується також часом релаксації пружних напружень у верхніх консолидованих шарах земної кори, котрий значно менший від тривалості четвертинного періоду.

Узагальнення даних вимірів напружень у гірських породах, виконані багатьма вченими (П.М.Кропоткін, М.К.Булін, Д.П.Прочухан) показують, що надлишкові, особливо горизонтальні, напруження спостерігаються повсюдно, на всіх континентах, головним чином у гірських породах складчастого фундаменту платформ, незалежно від їхнього віку. Вони виявлені на Балтійському щиті Східно-Європейської платформи, на Канадському щиті Північно-Американської платформи, в Ліберії і Єгипті на Африканській платформі, в нижньопалеозойських (каледонських) складчастих поясах Норвегії, Шпіцбергена й Ірландії, Скандинавського хребта і Гірської Шорії в Сибіру, у верхньопалеозойських (герцинських) складчастих поясах Уралу, Донецького басейну, Центрального Казахстану (Конрад, Джеккаган), Апалачів та інших районів сходу США, Південно-Східної Австралії й о.Тасманія. Вони встановлені також у поясах більш молоді мезозойської і кайнозойської (альпійської) складчастості у Британській Колумбії (Західна Канада), Малайзії та Ірані, Португалії, Альпах і Каліфорнії. Наприклад, у нижньопалеозойських вапняках осадочного чохла Північно-Американської платформи на глибині 700 м сума головних горизонтальних напружень  $\sigma_2 + \sigma_3$  становить 72,4 МПа. Вона на 30 МПа

перевищує подвоєне вертикальне напруження, обумовлене вагою порід, що залягають вище.

Розподіл напружень у гірських породах може бути досить нерівномірним. У деяких випадках виникають зони, осередки концентрації напружень. Так, наприклад, при будівництві підземної гідроелектростанції Пікото в Португалії у гранітах поблизу крутоспадної тектонічної зони напруження склали 20 МПа, а на відстані 16 м від цієї зони всього 3,5 МПа, тобто були майже в 6 разів меншими.

Високі напруження в гірських породах пов'язуються з диференційованими зрушеннями окремих блоків земної кори по тектонічних зонах, що супроводжуються землетрусами силою до 5 балів. Такі зрушення є причиною концентрації напружень в окремих зонах і осередках, де можуть вестися гірничі роботи.

Надлишковими в порівнянні з гравітаційними можуть бути не лише горизонтальні напруження у твердих породах, але й вертикальні.

У розподілі надлишкових горизонтальних напружень не спостерігається відмінність між областями з різними геоморфологічними умовами, тобто рівнинними, невисокими районами платформ і областями, охопленими інтенсивними неотектонічними підняттями. Повсюдно відзначається їхній зв'язок з орієнтуванням стискаючих напружень пізньокайнозойської складчастості. В усіх цих випадках вони характеризуються різкою анізотропією.

Розподіл напружень у гірських породах осадового чохла древніх і молодих платформ інший, ніж у кристалічних породах фундаменту. Узагальнення даних вимірів показують, що вертикальна складова регіонального поля Землі в таких породах повністю визначається навантаженням порід, що залягають вище. Напруження  $\sigma_1$  лінійно зростає з глибиною і відповідає гравітаційним напруженням, розрахованим за даними середньої щільності гірських порід, що залягають вище. Така зміна напружень, як правило, добре контролюється зміною фізичного стану і властивостей гірських порід – їхньої щільності, пористості, вологості, міцності – у зв'язку зі зміною ступеня їхньої літифікації.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Чим обумовлений напружений стан у масивах гірських порід?
2. Поясніть суть теорії утворення напружень за А.Геймом та О.М.Динником?
3. Що впливає на зміну і перерозподіл напружень у масиві гірських порід?

### **7. Тріщинуватість скельних і напівскельних порід та її врахування під час інженерно-геологічної оцінки.**

Тріщинуватість скельних і напівскельних порід є одним із вирішальних факторів під час їхньої інженерно-геологічної оцінки. Вона властива скельним і напівскельним породам і характеризує результат порушення їхньої суцільності – механічного руйнування. Ступінь тріщинуватості гірських порід визначається ступенем їхнього руйнування. Тріщинуватість разом із іншими тектонічними порушеннями характеризує тектонічну будову того чи іншого району або ділянки, просторову неоднорідність і анізотропність властивостей порід, що їх складають. Якщо гірські породи почленовані тектонічними порушеннями на великі блоки і ці порушення істотно визначають геологічну і тектонічну будову ділянки в цілому, то тріщинуватість істотно визначає внутрішню будову окремих блоків, складених твердими і відносно твердими гірськими породами.

Тріщини зазвичай простягаються по кількох напрямках, що взаємно перетинаються. Вони визначають просторове розташування поверхонь і зон послаблення. Ось чому тріщинуватість впливає на:

- міцність і стійкість гірських порід;
- деформаційність, характер прояву деформацій та їх величину;
- водоносність, вологоємність, водопроникність і газопроникність;

глибину проникнення агентів вивітрювання й інтенсивність розвитку процесів вивітрювання;

розвиток корозійних і карстоутворюючих процесів і проникнення карсту на глибину;

температурний режим порід;

швидкість поширення сейсмічних хвиль і сейсмостійкість порід;

міцність, важкість розробки й будівельну категорію порід;

визначення потужності зони знімання при проектуванні споруд.

Тріщини в гірських породах можуть бути тектонічними і нетектонічними. Тектонічні тріщини розвиваються в магматичних, метаморфічних і осадових зцементованих породах під впливом тектонічних стискаючих і розтягуючих зусиль, котрі перевищують межі міцності порід. Відповідно до цього тектонічні тріщини підрозділяються на тріщини сколювання (розвиваються під впливом дотичних зсувних – сколюючих – зусиль) і тріщини відриву (розвиваються під впливом розтягуючих зусиль). Тектонічні тріщини, по яких не відбувалося переміщення гірських порід, називаються *діаклазами*, а по яких таке переміщення відбувалося (зсуви, підкиди), – *параклазами*.

Загальними особливостями тектонічних тріщин є наступні.

1. Велика або порівняно велика витриманість за простяганням і глибиною; інколи вони простежуються на сотні й тисячі метрів, розтинаючи породи різного петрографічного складу.

2. Визначене просторове розташування, яке найчастіше обумовлює утворення систем тріщин. На одній і тій же ділянці може бути кілька систем тріщин, що взаємно перетинаються.

3. Закономірне сполучення систем тріщин із тектонічними елементами – складками, тектонічними порушеннями та ін.

4. Контрольованість багатьма структурно-петрографічними елементами порід – шаруватістю, сланцюватістю, лінійністю і смугастістю, орієнтуванням шлірових виділень, жильних утворень та ін.

Тектонічні тріщини сколювання зазвичай приховані або закриті – волосні, площини тріщин гладенькі, притерті, інколи з дзеркалами й борознами сколювання. Це свідчить про деяке переміщення вздовж них. Зазвичай вони утворюють дві похилі системи, що перетинаються. Окремості, утворені цими тріщинами, мають правильну форму. Тріщини цього типу, як правило, неводоносні або слабо водоносні, водопроникність по них невелика. При викритті гірських порід із такими тріщинами можуть виникати значні деформації – зміщення великих мас порід.

Тектонічні тріщини відриву зазвичай відкриті (зяючі), круто нахилені або вертикальні, з нерівними площинами, зазубреними, бугристими, вкритими патьоками, налітами, що свідчить про циркуляцію по них підземних вод і розчинів. Часто вони бувають заповнені привнесеним піщано-глинистим матеріалом, а також продуктами подрібнення й перетирання порід, продуктами вивітрювання й гідротермальних змін. До цих тріщин часто приурочені жили кварцу, кальциту, гіпсу, а в районах багаторічної мерзлоти – жили льоду.

Тріщини відриву часто водоносні, водопроникність по них підвищена, тому вони часто обумовлюють великі притоки підземних вод до виробок, а також великі витрати води на фільтрацію з каналів, водосховищ, під водопідпірними спорудами і в обхід їх. Вони часто також є шляхами підйому гідротерм із глибини. Тріщини відриву за простяганням і вглиб простежуються на коротші відстані, ніж тріщини сколювання. Інколи вони переривчасті: одна тріщина виклинюється, а поряд із нею або збоку від неї з'являється інша такого ж напрямку. В цілому тріщини часто досягають значної глибини. На окремих ділянках вони можуть згущуватися й утворювати зони підвищеної тріщинуватості або, навпаки, бути поодинокими. У берегових обривах, укосах і підземних

виробках тріщини відриву сприяють утворенню вивалювань, великих зміщень гірських порід, а також інтенсивному розвитку вивітрювання і корозійних процесів на глибину.

У породах, зім'ятих у складки, часто добре виражені поверхні подільності, орієнтовані закономірно відносно складок. Таке явище подільності називається кліважем. *Кліваж* не порушує суцільності породи і цим відрізняється від тектонічних тріщин. У відслоненнях в зоні вивітрювання кліваж має вигляд відкритих або закритих частих паралельних тріщин із рівними поверхнями і часто-густо зі слідами сковзання й притирання. У породах, що перебувають поза зоною вивітрювання, поверхні подільності приховані, вони виявляються при ударі по породі або при її стисканні.

За походженням кліваж може бути ендегенним, пов'язаним із внутрішніми глибинними процесами земної кори (складкоутворенням, утворенням розривних дислокацій, метаморфізмом), і екзогенним, пов'язаним із поверхневими процесами (діагенезом, рухами льодовика, зсувів). Екзогенний кліваж – явище рідкісне й локальне.

Кліваж підрозділяють на кліваж течії і кліваж розлому (розколу). Обидва вони утворюються в процесі пластичних деформацій порід за відповідних умов. *Кліваж течії* обумовлений орієнтованим плоско-паралельним розташуванням мінералів у породі. Особливо характерний він для метаморфічних порід. Розрізняють кілька видів кліважу течії: осьовий (паралельний осьовим поверхням складок), шаровий, плейчастий. До кліважу течії відносять також кристалізаційну сланцюватість, яка утворюється в результаті перекристалізації порід під впливом чинників метаморфізму. Кліваж течії охоплює зазвичай потужні товщі порід. Стосовно шаруватості він може розташовуватися по-різному: діагонально, паралельно і рідше перпендикулярно.

Тріщини нетектонічні утворюються під впливом внутрішніх сил стиснення й розтягування, що розвиваються в тій чи іншій породі. Такі тріщини зустрічаються повсюдно, вони дуже різноманітні. Загальні особливості у них наступні:

- 1) приуроченість до приповерхневих або навіть верхніх горизонтів земної кори;
- 2) своєрідність для кожного петрографічного типу порід (утворюють окремі різного розміру й форми у різних типів порід);
- 3) невитриманість за простяганням;
- 4) відсутність, як правило, у багатьох із них визначених систем;
- 5) у більшості випадків у приповерхневих горизонтах земної кори вони відкриті, а з глибиною звужуються й виклинюються.

Нетектонічні тріщини за своїм походженням можуть бути поділені на кілька груп:

- 1) *контракційні*, що виникають у зв'язку зі зменшенням об'єму при вистиганні магматичних порід, – тріщини первинної окремістості;
- 2) *тріщини усихання*, що виникають внаслідок зменшення об'єму осадків при їхньому висиханні та усадці при діагенезі;
- 3) *тріщини напластування*, що виникають в осадочних породах у процесі їхньої літифікації, яка супроводжується дегідратацією і ущільненням;
- 4) *тріщини вивітрювання*, які утворюються в результаті руйнування порід при вивітрюванні;
- 5) *тріщини розвантаження*, що виникають при збільшенні об'єму порід при їхній гідратації або в результаті пружної віддачі при викритті глибокими котлованами, підземними виробками чи ерозійними процесами;
- 6) *тріщини зсувів, провалів і просідань*, котрі проявляються внаслідок перерозподілу напружень у гірських породах і порушення їхньої рівноваги;
- 7) *штучні тріщини*, що виникають під час вибухів, обрушеннях, при підробці гірських порід підземними виробками.

Контракційні тріщини зазвичай розташовуються перпендикулярно і паралельно до поверхонь охолодження магматичних порід, розбиваючи їх на окремі кубічної, паралелепіпедної, матрацевидної, стовпчастої, кулястої та інших форм. Тому їхня

первинна окремість може утворюватися під впливом одночасної дії внутрішніх контракційних і зовнішніх тектонічних сил.

Тріщини усихання (або діагенетичні) проявляються в тонкозернистих і глинистих породах. Вони зазвичай відкриті, розширені біля верхнього краю і затухаючі, виклинюються донизу. Такі тріщини розташовуються перпендикулярно до поверхні пласта й не виходять за його межі. Вони завжди добре виражені на донній поверхні усихаючих водойм, утворюють вертикальну полігональну окремість.

Тріщини нашарування розвиваються по шаруватості порід, особливо на межі суміжних петрографічно різних шарів. Залежно від характеру шаруватості ці тріщини утворюють товстоплиткові, тонкоплиткові або листоваті окремісті. Виникають вони у процесі ущільнення й дегідратації порід при літифікації, тому що різні породи неоднаково реагують на зовнішні зусилля.

Тріщини вивітрювання виникають в результаті руйнування гірських порід під впливом коливань температури, води й водних розчинів, коріння рослин і організмів. Особливо інтенсивно розтріскування порід відбувається при їхньому замерзанні й розмерзанні, в результаті чого виникають так звані морозобійні тріщини. Тріщини вивітрювання розташовуються у найповерхневіших горизонтах, розділяючи породу. Вони звивисті, розгалужуються, площини у них нерівні. Біля поверхні ці тріщини зазвичай відкриті, з глибиною виклинюються.

Тріщини розвантаження з'являються при збільшенні об'єму порід після зняття з них навантаження. Таке збільшення об'єму може бути обумовлене гідратацією або проявом пружних деформацій (розущільненням) порід. Наприклад, при гідратації ангідриту й переході його в гіпс відбувається збільшення об'єму приблизно на 27%. При цьому виникають значні внутрішні напруження в породі і як наслідок з'являються тріщини в гіпсі і в породах, що його перекривають.

Розвантаження порід від дії стискаючих сил біля поверхні землі, під днищем і в бортах долин, у глибоких виїмках, котлованах, у кар'єрах або на глибині в підземних виробках викликає розкриття прихованих і закритих тріщин, розущільнення порід у бік вільного простору і появу нових тріщин розвантаження або, як їх іще називають, «пружної віддачі», «відсідання», «бортового відпору». Тріщини розвантаження розвиваються більш паралельно до відслоненої поверхні. Поблизу цієї поверхні їх багато і вони добре виражені, з глибиною ж стають рідшими і менш чіткими. По тріщинах розвантаження часто відбувається зміщення (відсідання) порід і утворення ступінчастості по схилу, зсувів структурного типу і обвалів.

Тріщини зсувів і провалів з'являються на ділянках, де порушується рівновага мас гірських порід і відбувається їхнє зміщення. В результаті цього в гірських породах виникають зсувні, сколюючі й розтягуючі напруження. Зсувні тріщини розвиваються головним чином у тілі зсуву і частково вздовж його границь. По тріщинах, що обмежують зсув, зазвичай відбувається зрив і зміщення мас гірських порід. Це тріщини відриву. Вони утворюються паралельно схилу, укусу або напівцирком оперізують зсувний масив. Найчастіше вони виникають біля вершин зсувів, де внаслідок цього в рельєфі з'являється ступінчастість. Тріщини відриву зазвичай відкриті, біля поверхні землі зяючі, з глибиною виклинюються.

Тріщини провалів виникають над карстовими печерами та іншими порожнинами. Вони зазвичай відкриті, зяючі, круті або вертикальні, по-різному орієнтовані в плані.

Різного типу штучні тріщини утворюються в гірських породах під час вибухових робіт і під впливом гірничого тиску при розробці їх підземними виробками, глибокими виїмками тощо. У плані такі тріщини можуть мати різне розташування, вони розтинають породи лише з поверхні або на тій чи іншій глибині, не досягаючи поверхні землі.

Такими є основні генетичні типи тріщин. При інженерно-геологічному вивченні тріщинуватості скельних і напівскельних порід необхідно приділяти велику увагу наступним основним питанням:

- 1) просторовому розташуванню тріщин, тобто їхньому орієнтуванню, з метою з'ясування панівних систем тріщин, орієнтуванню поверхонь і зон послаблення і, отже, просторової неоднорідності й анізотропії порід на тій чи іншій ділянці;
- 2) морфології тріщин і систем тріщин для встановлення їхніх генетичних типів і виділення локальних і регіональних тріщин;
- 3) визначенню ступеня тріщинуватості порід з метою кількісної оцінки ступеня їхньої подрібненості – зруйнування, виділення ділянок і зон, що відрізняються за ступенем тріщинуватості;
- 4) оцінці впливу тріщин і систем тріщин, як поверхонь і зон послаблення, на міцність, деформаційність, стійкість і водопроникність порід та їхню анізотропність у цьому відношенні; оцінці їхнього впливу на стійкість місцевості і проєктованих споруд;
- 5) визначенню раціональної методики дослідних робіт під час інженерно-геологічних вишукувань для виявлення анізотропії і дирекційності фізико-механічних властивостей порід залежно від орієнтування їхньої тріщинуватості.

#### Запитання для самоконтролю.

1. На які характеристики масиву порід впливає тріщинуватість?
2. Якими за походженням бувають тріщини в гірських породах?
3. Назвіть загальні особливості тектонічних тріщин.
4. Що таке кліваж і на які види він поділяється?
5. Якими бувають типи нетектонічних тріщин?

#### **8. Вплив вивітрювання на властивості скельних і напівскельних порід.**

Гірські породи, виходячи на поверхню землі або викриваючись гірничими виробками, котлованами та виїмками, рідко зберігають свою початкову свіжість та природний фізичний стан. У приповерхневій зоні в нових температурних, вологісних і фізико-хімічних умовах вони піддаються різним змінам – вивітрюванню, в результаті чого виникає й розвивається елювіальна зона – зона вивітрілих порід.

Слід мати на увазі, що руйнування порід часто розуміється як зміна їхнього фізичного стану, а в дійсності вивітрювання – процес складний, котрий полягає не лише в руйнуванні порід і зміні їхнього мінерального й хімічного складу, але й в утворенні нових, вторинних мінералів, стійких у зоні вивітрювання.

При вивітрюванні гірських порід змінюються:

- 1) зовнішній вигляд, забарвлення, відтінки, з'являються вицвітання, патьоки, нальоти солей тощо;
- 2) фізичний стан, тому що послаблюються або зникають внутрішні структурні зв'язки між кристалами мінералів або частками і агрегатами, що їх складають;
- 3) мінеральний і хімічний склад у тій чи іншій мірі залежно від вивітрілості порід;
- 4) властивості – вологоємність, водопроникність, водоносність, щільність, пористість, міцність, твердість, тривкість, стійкість і несуча здатність;
- 5) деформаційність, її характер, величина і неоднорідність на різних ділянках.

Все це необхідно враховувати при виборі ділянок для розташування споруд, при оцінці можливих змін стійкості порід в укосах, у стінках котлованів і підземних виробок, а також при визначенні будівельної категорії порід, потужності зони знімання, глибини врізання будівельних котлованів у гірські породи, глибини закладення фундаментів споруд, при організації виконання будівельних робіт тощо.

Вивітрювання гірських порід у приповерхневих горизонтах земної кори – це безперервний процес, інтенсивність якого залежить як від властивостей власне порід, їх мінерального складу, структури, текстури, так і від умов навколишнього середовища, тобто кліматичних – фізико-географічних.

Основні агенти вивітрювання порід – температура, вода і водні розчини, рослинні й живі організми. При цьому інтенсивність вивітрювання зростає зі збільшенням

надходження тепла до поверхні землі або зі збільшенням різкості коливань температури порід, зі збільшенням частоти переходу температури через 0°C. Впливає також кількість вологи, що надходить, тобто чим більше випадає опадів, чим інтенсивніше відбувається водообмін у приповерхневих горизонтах порід, чим більше у воді міститься різних агресивних по відношенню до гірських порід речовин, тим інтенсивніше відбувається процес вивітрювання. Велике значення при цьому мають наявність і характер рослинного покриву, мікроорганізмів, вплив різних продуктів їхньої життєдіяльності і в цілому активність біохімічних процесів.

Всі ці агенти руйнування (вивітрювання) гірських порід діють одночасно, але напруженість і перевага того чи іншого цілком залежить від кліматичних умов даної місцевості. Тому може бути різним і характер руйнування порід, тобто тип вивітрювання. Так, наприклад, в умовах холодного вологого або сирого полярного гумідного клімату, тривалих морозів тундри і лісотундри панівну роль відіграє фізичне і особливо морозне вивітрювання. Тут кількість атмосферних опадів перевищує випаровування, але низькі температури повітря обумовлюють їхню акумуляцію у вигляді снігу й фірнового льоду, тому діяльність води у рідкій фазі стримується. На обширних просторах гірські породи у приповерхневих зонах промерзлими, тому породи в зоні вивітрювання промиваються порівняно слабо.

В умовах континентального помірно холодного надлишково вологого гумідного клімату тайги і змішаних лісів поряд із фізичним вивітрюванням помітну роль грає і хімічне. Кількість опадів тут перевищує випаровування, тому породи в зоні вивітрювання промиваються порівняно добре.

В поясі континентального помірно теплого посушливого гумідного клімату лісостепів і степів хімічне вивітрювання є ще інтенсивнішим. Оподи переважають тут над випаровуванням, але незначно. Велике значення має поверхневий стік, бо оподи випадають протягом року нерівномірно, часто у вигляді злив. Тому породи в зоні вивітрювання промиваються порівняно помірно.

В областях помірно холодного сухого різко континентального аридного клімату пустель і напівпустель, позбавлених рослинності або з бідною рослинністю, різко переважає фізичне вивітрювання. Тут випаровування значно перевищує кількість опадів, і породи в зоні вивітрювання промиваються дуже слабо.

Нарешті, в умовах теплого, жаркого й надлишково вологого гумідного клімату тропіків і субтропіків, в умовах багатой і різноманітної рослинності та активних біохімічних процесів, панівний розвиток має хімічне вивітрювання. Тут оподи значно переважають над випаровуванням, і породи в зоні вивітрювання добре і глибоко промиваються.

Окрім клімату, на інтенсивність і характер вивітрювання гірських порід великий вплив справляє також рельєф місцевості. Так, наприклад, в умовах гірського пересіченого рельєфу процеси площинного змивання посилюються. Інколи темпи змивання випереджають темпи вивітрювання порід, тому потужність зони вивітрювання тут мізерна, частіше ж породи невивітрілі, свіжі виступають на поверхню землі або зачеплені вивітрюванням у незначній мірі.

В умовах рівнинного рельєфу, де темпи площинного змивання послаблені або малі, вивітрювання гірських порід поширюється на велику глибину. Тут встигає сформуватися, за інших однакових умов, більш потужна зона вивітрювання. Породи в ній більше змінені, причому часто в неоднаковій мірі на різних глибинах. В результаті встановлюється диференціація зони вивітрювання на підзони.

Отже, із зовнішніх чинників, що обумовлюють темпи і характер вивітрювання гірських порід тієї чи іншої місцевості, першорядне значення мають клімат і тектонічний режим, діючий через рельєф. У більшості випадків фізичне й хімічне вивітрювання розвиваються одночасно, але залежно від кліматичних умов, умов рельєфу те чи інше з них переважає.



При фізичному вивітрюванні відбуваються механічне подрібнення породи, її дезінтеграція на складові компоненти без помітної зміни мінерального й хімічного складу. Воно пов'язане головним чином із різкими коливаннями температури, котрі викликають нерівномірне об'ємне й лінійне розширення і стискання мінеральних компонентів і в цілому об'єму всієї породи. В умовах холодного клімату фізичне руйнування порід інтенсивно розвивається при замерзанні води, що проникає в пори, тріщини й пустоти. При замерзанні води й перетворенні її на лід об'єм її збільшується приблизно на 9%. Це викликає тиск на стінки тріщин і пор до 90-100 МПа і обумовлює розколювання і розривання порід навіть дуже міцних. У посушливих районах при інтенсивному випаровуванні вологи руйнування гірських порід відбувається внаслідок кристалізації солей із водних розчинів у тріщинах і пустотах. При цьому кристалізаційний тиск на стінки пор і тріщин може досягати величезної сили, розривати й розколювати породи також дуже міцні.

Руйнівним чином діє на гірські породи коренева система дерев, що розвивається по тріщинах. Коріння, яке розростається, з великою силою давить на стінки тріщин, розсуває їх і викликає ще більше розколювання порід на окремі брили і уламки.

Таким чином, фізичне вивітрювання спочатку обумовлює розтріскування порід або відшарування з їхньої поверхні окремих плиток, пластинок, шарів, потім розколювання й розділення на великі, зазвичай кутасті уламки, котрі в подальшому кришаться, подрібнюються й перетворюються на щебінь, жорстку і пісок.

Інтенсивність фізичного вивітрювання залежить у значній мірі від забарвлення порід, їхнього мінерального складу, структурних і текстурних особливостей, теплоємності й теплопровідності, коефіцієнтів лінійного і об'ємного розширення мінералів і породи в цілому.

При хімічному вивітрюванні відбувається хімічне розкладення породи зі зміною мінерального й хімічного складу, з утворенням нових, стійкіших мінералів і накопиченням мінеральної речовини в тонкодисперсному – колоїдному – стані. Основними агентами хімічного вивітрювання є вода і розчинені в ній вуглекислота, кисень, органічні та інші кислоти, що утворюються в результаті розкладення різних мінералів, рослинних залишків і життєдіяльності організмів.

Вода є сильним хімічним реагентом завдяки тому, що завжди в тій чи іншій мірі дисоційована на іони  $H^+$  і  $OH^-$ . Чим вищою є концентрація водневих іонів у воді, тим сильніша її хімічна дія на мінерали порід. Ступінь дисоціації води, а отже, і концентрація водневих іонів зростає з підвищенням температури. Так, наприклад, концентрація водневих іонів у ґрунтових водах тропіків приблизно в 6 разів вища, ніж у ґрунтових водах середніх широт, тому й хімічне вивітрювання там інтенсивніше. Значно зростає дисоціація води за наявності в ній вільної вуглекислоти. У воді, насиченій вуглекислотою, концентрація водневих іонів збільшується в 300 разів і більше.

Хімічне вивітрювання гірських порід характеризується великою складністю. У породі одночасно можуть відбуватися розчинення, окислення, гідратація, заміщення і гідроліз. Природно, що залежно від складу і властивості власне породи, умов навколишнього середовища, тривалості вивітрювання, глибини залягання порід той чи інший процес може отримати переважаючий розвиток.

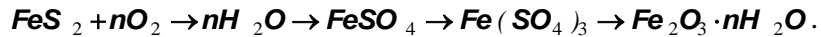
Безпосереднє розчинення й вилугування властиві лише соленосним і засоленим породам, що утримують легко- і середньорозчинні солі. Розчинність різних силікатів у порівнянні з простими солями мізерна. Породи соленосні й засолені зустрічаються у при поверхневих горизонтах Землі лише в умовах недостатнього зволоження, тобто степових і головним чином напівпустельних і пустельних областях.

Процесам окислення піддається більшість порід і мінералів, що містять закисні форми заліза, марганцю, нікелю, кобальту, ванадію, сірки та інших елементів. Ці процеси полягають у перетворенні закисних сполук металів у окисні, в результаті чого кристалічна ґратка мінералів починає руйнуватися. Зовнішньо цей процес виражається перш за все у

зміні кольору породи, у появі жовтого (вохристого) забарвлення, у пігментації мінералів, у появі згустків і пластівців у формі натічних колоїдних утворень.

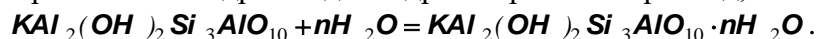
Одним із добре відомих прикладів подібних процесів є окислення сульфїду залїза (пірит). Сульфїди у присутності вільного кисню і води

стають нестійкими і, поступово окислюючись, перетворюються на сульфати, карбонати і окисли.



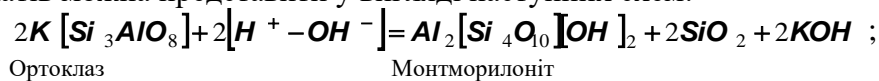
Із піриту отримується лимонїт, що являє собою сполуку залїза, найстійкішу в при поверхневих горизонтах земної кори. Процесами окислення піриту пояснюється присутність гіпсу в зоні вивітрювання деяких глинистих відкладів. Окисленню піддаються й органічні речовини, часто за допомогою мікроорганізмів. Зовні це також проявляється у зміні забарвлення породи. Так, наприклад, вуглисті й бітумінозні відклади чорного або сірого кольору світліють майже до білого.

Широко розповсюджений при вивітрюванні процес гідратації різних мінералів. Суть його полягає в тому, що багато мінералів за впливу на них води і водяної пари переходять у сполуки, збагачені на воду, хімічно зв'язують її, утворюючи кристалогідрати. Поряд із хімічно зв'язаною водою при гідратації мінералів з'являється також і фізично зв'язана вода, яка адсорбується поверхнею мінералів. Раніше від усіх починають гід ратуватися мінерали з добре вираженою спайністю, головним чином слюди і хлорити, котрі перетворюються на гідрослюди і гідро хлорити. Наприклад,



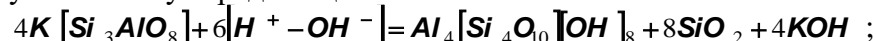
Процес гідратації мінералів зазвичай супроводжується явищами заміщення катіонів. При цьому виникають нові однотипні мінерали, що розрізняються частковим заміщенням основ. Помічено, що мінерали, наділені високою обмінною здатністю основ, особливо схильні до гідратації. Як приклад гідратації мінералів у зоні вивітрювання можна навести перехід ангїдриту в гіпс ( $CaSO_4 + 2H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), гематиту в лимонїт ( $Fe_2O_3 + nH_2O = Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ) та ін.

Гїдролїтичне розкладення – основний процес хїмічного руйнування таких широко розповсюджених мінералів, як силїкати. Він полягає в тому, що гідратований іон водню (оксонїй) витїсняє із кристалїчної ґратки мінералів К, Na, Ca, Mg і, входячи в неї, послаблює внутрішні зв'язки, викликаючи перебудову каркасної ґратки в шарувату, а в подальшому розпад її на окремі компоненти. Послідовність гїдролїтичного розкладення силїкатів можна представити у вигляді наступних схем:



Ортоклаз Монтморилонїт

у кислішому середовищі



Ортоклаз Каолїніт

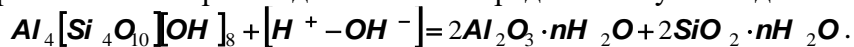
у вуглекислому середовищі



Ортоклаз Каолїніт

Аналогічною є схема розкладення і залїзисто-магнезіальних силїкатів. Характерно, що в першу чергу із кристалїчної ґратки первинних мінералів витїсняються основи, котрі утворюють істинні розчини, і виносяться. Кремнезем при розпаді частково переходить у розчин і виноситься, частково переходить у колоїдний стан, виноситься або випадає в осад у вигляді водного кремнезему – опалу, а частково витрачається на побудову нових, вторинних – глинистих – мінералів. Залїзо, що входить до складу залїзисто-магнезіальних силїкатів, переходить із закисної форми в окисну, утворюючи вільні гїдрати окису залїза (лимонїт), і накопичується в зоні вивітрювання.

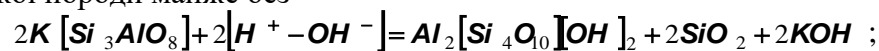
Вторинні – глинисті – мінерали в умовах жаркого і вологого клімату тропіків і субтропіків при значній тривалості процесів вивітрювання можуть піддаватися подальшому розкладенню і переходити в кінцеві найпростіші продукти хімічного вивітрювання – окисли кремнію, алюмінію і заліза, що є найстійкішими у зоні вивітрювання. Таке розкладення можна представити у вигляді схеми



Складний процес гідролітичного розкладення силікатів не можна розглядати в ізольованому вигляді: зазвичай він супроводжується явищами гідратації, окислення, карбонатації, заміщення і винесенням деяких елементів із зони вивітрювання. При цьому виникають нові – вторинні – мінерали й мінеральні утворення.

На сьогодні виділяють наступні чотири основні стадії вивітрювання гірських порід, встановлені Б.Б.Полиновим: 1) уламкову, 2) сіалітну лужну, 3) сіалітну кислоту і 4) алітну.

*Уламкова стадія* характеризується переважанням фізичного вивітрювання над хімічним. На цій стадії відбувається механічне руйнування – подрібнення, дезінтеграція – гірської породи майже без



Ортоклаз

Монтморилоніт

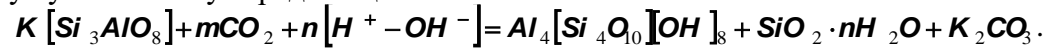
у кислішому середовищі



Ортоклаз

Каолініт

у вуглекислому середовищі

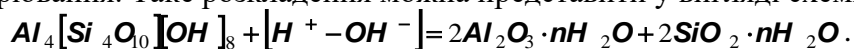


Ортоклаз

Каолініт

Аналогічною є схема розкладення і залізо-магнезійних силікатів. Характерно, що в першу чергу із кристалічної ґратки первинних мінералів витісняються основи, котрі утворюють істинні розчини, і виносяться. Кремнезем при розпаді частково переходить у розчин і виноситься, частково переходить у колоїдний стан, виноситься або випадає в осад у вигляді водного кремнезему – опалу, а частково витрачається на побудову нових, вторинних – глинистих – мінералів. Залізо, що входить до складу залізо-магнезійних силікатів, переходить із закисної форми в окисну, утворюючи вільні гідрати окису заліза (лимоніт), і накопичується в зоні вивітрювання.

Вторинні – глинисті – мінерали в умовах жаркого і вологого клімату тропіків і субтропіків при значній тривалості процесів вивітрювання можуть піддаватися подальшому розкладенню і переходити в кінцеві найпростіші продукти хімічного вивітрювання – окисли кремнію, алюмінію і заліза, що є найстійкішими у зоні вивітрювання. Таке розкладення можна представити у вигляді схеми



Складний процес гідролітичного розкладення силікатів не можна розглядати в ізольованому вигляді: зазвичай він супроводжується явищами гідратації, окислення, карбонатації, заміщення і винесенням деяких елементів із зони вивітрювання. При цьому виникають нові – вторинні – мінерали й мінеральні утворення.

На сьогодні виділяють наступні чотири основні стадії вивітрювання гірських порід, встановлені Б.Б.Полиновим: 1) уламкову, 2) сіалітну лужну, 3) сіалітну кислоту і 4) алітну.

*Уламкова стадія* характеризується переважанням фізичного вивітрювання над хімічним. На цій стадії відбувається механічне руйнування – подрібнення, дезінтеграція – гірської породи майже без зміни її мінерального й хімічного складу. Залежно від тривалості уламкової стадії вивітрювання ступінь подрібнення породи може бути різним: від грубоуламкового (брилового) до дрібноуламкового (щебенистого і жорствяно-піщаного). В аридних областях, у полярних і холодних гірських країнах цією стадією в основному і завершується вивітрювання гірських порід.

*Стадія сіалітна лужна* є початковою стадією хімічного вивітрювання гірських порід. На цій стадії із порід, що вивітрюються, виносяться всі прості розчинні солі –

хлориди, сульфати і карбонати лужних і лужноземельних металів. Починається гідратація мінералів і гідролітичне розкладення силікатів із винесенням основ (K, Na, Mg, Ca). Лужні й лужноземельні метали, що переходять у розчин, обумовлюють лужну або нейтральну реакцію середовища і переводять у рухомий стан частину кремнезему, бо він є розчинним у лужних водах. Те ж саме відбувається з Mn, котрий виноситься. Полуторні окисли ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  та ін.), надходячи в розчин із материнських порід, коагулюють і осаджуються. Двовалентне залізо, швидко окислюючись до тривалентного, також осаджується. Починається утворення глинистих мінералів (гідролюд, гідрохлоритів, монтморилоніту, нонтроніту, бейделіту). Накопичується слабозчинний карбонат кальцію, відбувається звапнювання породи, через що цю стадію називають також сіалітною звапнювання.

*Сіалітна кисла стадія* характеризується тривалим вимиванням основ і  $\text{SiO}_2$  із силікатів, що руйнуються. Внаслідок цього лужні умови поступово змінюються на кислі, розпочинається міграція важкорозчинних сполук  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$  та ін. Чим кислішим є середовище, тим інтенсивніше розкладаються силікати. Винесення магнію і калію, яке продовжується, призводить до руйнування глинистих мінералів, що утворилися на попередній стадії. Кисле середовище сприяє збереженню й утворенню глинистих мінералів, позбавлених основ (каолініт, галуазит та ін.).

*Алітна стадія* характеризується подальшим розкладенням і спрощенням сполук. Силікати розпадаються на найпростіші окисли кремнію, алюмінію і заліза. Переважаюче значення у продуктах вивітрювання, що утворюються, отримують полуторні окисли алюмінію і заліза. Цей процес призводить до формування латеритів – залишкових відкладів, збагачених на гідрати окислів заліза і вільний глинозем. Ця стадія розвинена головним чином в умовах жаркого і вологого клімату тропіків і субтропіків.

Добре сформована зона хімічно вивітрілих порід наділена ясною мінливістю у вертикальному напрямку, причому донизу зустрічаються все менше й менше змінені породи. Умови їхнього руйнування на різній глибині є різними, бо донизу послаблюється температурний вплив; води, які просочуються, стають все більше мінералізованими і їхня агресивність знижується; вміст кисню з глибиною зменшується. Середовище стає більш лужним. Над рівнем ґрунтових вод, у зоні аерації, панують окислювальні умови, нижче – нейтральні і відновні.

Загальна потужність зони хімічного вивітрювання порід може сягати десятків і навіть сотень метрів.

Відповідно до «Будівельних норм і правил...» рекомендується визначати показник ступеня вивітрілості порід  $\hat{E}_{\bar{n}\bar{a}}$  як відношення щільності вивітрілої породи до щільності тієї ж невивітрілої породи  $\hat{E}_{\bar{n}\bar{a}} = \frac{\rho_{\bar{a}}}{\rho_{i\bar{a}}}$ .

Залежно від величини  $\hat{E}_{\bar{n}\bar{a}}$  вивітрілі породи можуть розділятися на наступні групи:

- 1) Невивітрілі (монолітні).  $\hat{E}_{\bar{n}\bar{a}} = 1$ . Породи залягають у вигляді суцільного моноліту.
- 2) Слабко вивітрілі (тріщинуваті).  $1 > \hat{E}_{\bar{n}\bar{a}} \geq 0,9$ . Породи залягають у вигляді незміщених окремостей.
- 3) Вивітрілі.  $0,9 > \hat{E}_{\bar{n}\bar{a}} \geq 0,8$ . Породи залягають у вигляді накопичення шматків, яке переходить у тріщинуваті різновиди.
- 4) Сильно вивітрілі (рухляки).  $\hat{E}_{\bar{n}\bar{a}} < 0,8$ . Породи залягають у вигляді окремих уламків.

Для захисту споруд від шкідливого і небезпечного впливу процесів вивітрювання на їхню стійкість застосовують різноманітні інженерні заходи (зрізання порід; залишення вивітрілих порід в основах за умови дотримання певних обмежень; захист порід від агентів вивітрювання шляхом влаштування різного покриття; штучне покращення властивостей порід різними розчинами; застосування штучних основ шляхом заміни вивітрілих порід подушками з інших).

Запитання для самоконтролю.

1. На яких характеристиках порід позначаються процеси вивітрювання?
2. Чому і як саме кліматичні умови впливають на вивітрювання гірських порід?
3. В чому полягає суть фізичного вивітрювання?
4. Поясніть механізм хімічного вивітрювання.
5. Охарактеризуйте стадії вивітрювання порід (за Б.Б.Полиновим).
6. Як визначається показник ступеня вивітрюваності порід?

**9. Загальні уявлення про фізико-механічні властивості скельних і напівскельних порід.**

Фізико-механічними властивостями гірських порід слід називати такі, котрі визначають їхній фізичний стан, відношення до води і закономірності зміни міцності й деформації. Відповідно розрізняють властивості фізичні, водні й механічні. Їх виражають і оцінюють за допомогою певних показників – характеристик.

Фізичні властивості характеризують фізичний стан гірських порід, тобто якісну визначеність, що проявляється в їхній щільності, вологості, пористості, консистенції, тріщинуватості, закарстованості і вивітрюваності в умовах природного залягання. Щільність, вологість, пористість і консистенція характеризують також стан порід у земляних спорудах і відвалах. Дані про фізичні властивості гірських порід дозволяють якісно оцінювати їхню міцність і стійкість.

Водні властивості гірських порід проявляються в їхній здатності змінювати стан, міцність і стійкість при взаємодії з водою, поглинати і утримувати воду або фільтрувати її. Знаючи водні властивості гірських порід, можна прогнозувати зміни їхньої міцності та інших властивостей, а також розвиток яких-небудь геологічних процесів. Деякі показники таких властивостей порід безпосередньо використовуються при різноманітних інженерних розрахунках, наприклад, при розрахунках витрат води на фільтрацію, притоків води до будівельних котлованів і водозаборів, параметрів водопонижувальних установок, для оцінки можливостей розвитку суфозійних явищ тощо.

Механічні властивості визначають поведінку гірських порід в умовах впливу на них зовнішніх зусиль – навантажень. Ці властивості дозволяють безпосередньо оцінювати міцність і деформаційність гірських порід. Показники механічних властивостей гірських порід використовуються для різних інженерних розрахунків, наприклад, при розрахунку осідань споруд за величиною і в часі, стійкості укосів і природних схилів, при визначенні тиску гірських порід на підпирні споруди або кріплення гірничих виробок.

Дослідження фізико-механічних властивостей гірських порід мають не лише інженерне значення, але й загальне геологічне. Вони дозволяють в цілому розширити їхню геологічну вивченість. Фізико-механічні властивості відображають ті зміни, котрих гірські породи зазнали в історії їхнього геологічного розвитку під впливом процесів вивітрювання, гравітаційного й хімічного ущільнення, тектонічних сил.

Перш ніж перейти до розгляду фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних гірських порід, необхідно звернути увагу на особливості їх будови. В об'ємі будь-якої гірської породи виділяється об'єм мінеральної частини – її скелет – і об'єм пор, пустот, каверн, тріщин та інших порожнин. Вони можуть бути частково або повністю заповненими повітрям, газами або водою. Загальний об'єм всіх пустот у породі визначає її шпаруватість, а пустоти, що мають капілярні (діаметр пор <1 мм, ширина тріщин <0,25 мм) або субкапілярні розміри (діаметр пор <0,0002 мм, ширина тріщин <0,0001 мм), виражають їхню пористість.

Важливо зазначити, що пористість у гірських породах розподілена більш-менш рівномірно, тобто в кожній точці ділянки, зони, шару або товщі вони обов'язково наділені тією чи іншою пористістю, тоді як інші види пустот – тріщини й каверни – розподілені нерівномірно: в одному місці вони можуть бути, в іншому відсутні. У скельних і частково

напівскельних гірських породах пористість в цілому не порушує їхньої монолітності, вона приблизно однакова і в зразку, і в умовах природного залягання порід. Зі збільшенням пористості порід знижуються їхня міцність і стійкість, підвищуються вологоємність і здатність до деформацій. Пустоти великих розмірів зазвичай завжди порушують масивність, монолітність порід, а тріщини обумовлюють розчленування їх на окремі різні розміри і форми.

Скелет скельних і напівскельних порід складається з кристалів мінералів, їх уламків, а також із уламків порід і органічних решток. Ці складові частини можна розглядати як певні структурні елементи, котрі в скельних і напівскельних породах поєднані між собою структурними зв'язками. В магматичних, метаморфічних і осадових хемогенних породах ці зв'язки виникають у процесі кристалізації і перекристалізації складових частин породи – мінералів. У осадових порід такі зв'язки утворюються при цементації, в результаті твердіння в'язких речовин, що утворюють плівки на поверхні часток або заповнюють пори між ними, при кристалізації солей, котрі випадають за певних умов із водних розчинів або при перекристалізації мінералів, що складають породу. В ущільнених глинистих породах, що за своїми щільністю і властивостями наближаються до скельних і напівскельних, структурні зв'язки можуть бути обумовлені крім цементації також силами молекулярного притягання (ван-дер-ваальсівські сили).

Отже, у скельних і напівскельних гірських породах структурні зв'язки можуть бути головним чином конденсаційно-кристалізаційними або просто кристалізаційними, або цементаційними. Як у першому, так і в другому випадку вони виникають в результаті взаємодії між іонами або атомами кристалів мінералів, між іонами, атомами і молекулами кристалів мінералів і цементуючої речовини породи. Тому з точки зору фізичної природи ці зв'язки можна розглядати як результат взаємодії іонів, атомів і молекул, що складають породу, тобто по своїй природі вони не відрізняються від зв'язків, котрі діють всередині кристалів мінералів, що складають гірські породи. Структурні зв'язки справляють великий вплив на властивості скельних і напівскельних гірських порід. Міцність і стійкість їх залежать не лише від міцності кристалів мінералів, уламків мінералів і порід, але також і від міцності і стійкості структурних зв'язків. Останні можуть мати міцність вищу або нижчу від міцності елементів, що складають породу; бути водостійкими або неводостійкими; значно опиратися впливу агентів вивітрювання або бути в цьому відношенні слабкими.

Міцність структурних зв'язків у скельних і напівскельних порід залежить від взаємодії міжатомних сил у місцях контактів різних фаз. У цих порід енергія зв'язку в таких контактах велика, але мінлива. У повнокристалічних рівномірно-дрібнозернистих і середньозернистих породах загальна площа контактів велика, а міжатомні відстані і сили між кристалами дорівнюють таким же всередині кристалів. Тому міцність структурних зв'язків у таких породах особливо висока і може бути навіть вищою від міцності власне кристалів. Це пояснюється наявністю у кристалів спайності і дефектів у кристалічній ґратці. У великозернистих і нерівномірно зернистих породах, а також у осадових зцементованих загальна площа контактів може бути малою, а міжатомні відстані і сили мінливими у зв'язку з нерівностями поверхні кристалів і уламків, різними їх розмірами і ступенем кристалічності, гідратованістю цементу і т.д. Тому міцність структурних зв'язків у таких породах може бути відносно зниженою.

Скельні й напівскельні породи завдяки структурним зв'язкам є монолітними і характеризуються високою та порівняно високою міцністю і твердістю. Однак структурні зв'язки в таких породах незворотні. Якщо монолітність таких порід порушена вивітрюванням, тріщинуватістю і т.д., то структурні зв'язки, як правило, не відновлюються, міцність і стійкість порід порушуються, а деформаційні здатності різко підвищуються.

Ці особливості скельних і напівскельних порід істотно відрізняють їх від інших типів порід, і тому їх необхідно враховувати при вивченні фізико-механічних властивостей.

*Фізичні властивості.* Найголовнішими фізичними властивостями скельних і напівскельних порід є щільність (густина) і пористість, а у напівскельних і вологість. Ці властивості взаємозалежні і в цілому виражають їхній фізичний стан, тобто якісну визначеність. Крім того, для характеристики фізичного стану цих порід велике або навіть вирішальне значення має також ступінь їхньої вивітрілості, тріщинуватості й закарстованості. Показники фізичних властивостей скельних і напівскельних порід істотно визначають їхній опір руйнуванню, деформаціям і взаємодію з водою. Вивчення фізичних властивостей гірських порід необхідне як для попередньої, так і для остаточної їхньої інженерної оцінки.

*Щільність (густина).* Щільністю гірської породи є її маса в одиниці об'єму. Щільність виражається в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , частіше в  $\text{г}/\text{см}^3$ . Оскільки в об'ємі будь-якої гірської породи виділяються об'єм мінеральної частини, тобто її скелет, і об'єм пор, пустот, каверн, тріщин та інших порожнин, частково або повністю заповнених водою, повітрям, або газами, то для характеристики і оцінки щільності гірських порід використовують три показники: щільність мінеральної частини породи (щільність часток)  $\rho_s$ , щільність породи  $\rho$  і щільність сухої породи (щільність скелету породи)  $\rho_d$ .

*Щільність мінеральної частини породи (щільність часток породи)  $\rho_s$*  чисельно дорівнює відношенню маси мінеральної частини породи (без врахування маси води в її порах) до її об'єму (без врахування об'єму пор). Величина щільності мінеральної частини породи визначається її мінеральним складом і виражає середньозважену щільність мінералів, що складають породу. У більшості випадків ця величина змінюється в порівняно вузьких межах – від 2,60 до 2,75  $\text{г}/\text{см}^3$ . Щільність мінеральної частини породи не відображає безпосередньо їхнього фізичного стану і не використовується в інженерних розрахунках, але вона необхідна для обчислення інших важливих показників їхніх властивостей, наприклад, пористості. Порівнюючи щільність мінеральної частини породи зі щільністю породи, можна судити про ступінь її ущільненості і пористості, тобто про фізичний стан.

*Щільність (густина) гірської породи  $\rho$*  чисельно дорівнює відношенню маси породи (із врахуванням маси води в її порах) до об'єму породи (із врахуванням об'єму пор). Іншими словами, це маса одиниці об'єму породи з непорушеною будовою і природною вологістю. Щільність породи виражають у тих же одиницях, що і щільність її мінеральної частини ( $\text{кг}/\text{м}^3$  або  $\text{г}/\text{см}^3$ ).

*Щільність сухої породи (щільність скелету породи)  $\rho_d$*  чисельно дорівнює відношенню маси сухої породи (без врахування маси води в її порах) до об'єму породи (з врахуванням об'єму пор). Її виражають у тих же одиницях, що й щільність породи. Оскільки природна вологість скельних порід мала, то при характеристиці їхньої щільності часто визначають масу одиниці об'єму сухої породи (щільність скелету) і називають її просто щільністю породи. Природно, що таке визначення щільності не є точним. Щільність скелету напівскельних порід може істотно відрізнятись від їхньої щільності, тому що природна вологість цих порід у деяких випадках може досягати 15-20% відсотків і більше.

Щільність породи зв'язана зі щільністю її скелету наступним виразом:

$$\rho = \rho_d (1 + W), \quad (9.1)$$

де  $W$  – вологість породи (в долях одиниці).

Щільність гірських порід визначається щільністю їх мінеральної частини, отже, мінеральним складом, пористістю і вологістю. Оскільки у більшості скельних порід пористість і природна вологість дуже малі (долі й одиниці відсотків), то їхня щільність залежить головним чином від щільності мінеральної частини. У порід напівскельних

пористість і природна вологість можуть вимірюватися не лише одиницями, але й десятками відсотків, тому їхня щільність може значно відрізнятись від щільності мінеральної частини, що характеризує їх як менш щільні у порівнянні зі скельними породами.

Інтрузивні породи мають більшу щільність і вужчі межі її зміни в порівнянні з їхніми ефузивними аналогами. Це пояснюється головним чином щільнішою і досконалішою їх кристалізацією, тобто структурними особливостями.

Щільність метаморфічних порід також визначається в основному їхнім мінеральним складом, оскільки пористість у цих порід мала. За абсолютними величинами щільність у цих порід зростає зі збільшенням ступеня метаморфізму.

Щільність скельних і напівскельних осадочних гірських порід змінюється в широких межах залежно від їхнього петрографічного складу, структурно-текстурних особливостей, ступеня літифікації, а також залежно від того, в якому структурно-тектонічному районі вони поширені. Щільність піщано-глинистих порід у цілому дещо нижча, ніж карбонатних. У кожному з цих типів порід спостерігається певна закономірність у зміні їхньої щільності залежно від ступеня літифікації. Така ж закономірність спостерігається у порід уламкових. Пісковики зазвичай мають щільність 2,50-2,65, а піщані сланці – 2,60-2,70 г/см<sup>3</sup>.

На щільність карбонатних порід великий вплив справляють домішки глинистої речовини, кремнезему, ступінь доломітизації і особливо їхня структура. Щільні кристалічні зернисті вапняки можуть мати щільність 2,80-3,00 г/см<sup>3</sup>, а вапняки органогенної структури – 1,70 г/см<sup>3</sup>, зрідка більше.

На зміну щільності порід впливає і їхній вік, тобто тривалість перетворення під впливом процесів літифікації. Наприклад, метаморфічні сланці й кварцити палеозою Південного Сахаліну характеризуються середньою щільністю 2,55-2,85 г/см<sup>3</sup>, піщано-глинисті відклади мезозою того ж району мають щільність 2,20-2,60 г/см<sup>3</sup>, а такі ж відклади палеогену й неогену – 2,00-2,50 г/см<sup>3</sup>.

Щільність порід гірсько-складчастих районів завжди вища, ніж платформених. Нерідко на платформах породи певного петрографічного складу мають малий або середній ступінь літифікації, а в складчастих районах досягають гранично високого, і це позначається на зміні їхньої щільності.

Щільність гірських порід є найважливішою характеристикою їхнього фізичного стану. Чим вона менша, і особливо в порівнянні зі щільністю їхньої мінеральної частини, тим більшою є пористість, вологоємність порід і, можливо, нижчою є міцність. Значення щільності порід широко використовуються при різноманітних інженерних розрахунках. Наприклад, при розрахунках розподілу напружень від власної ваги у гірських породах, їхньої стійкості на схилах і в укосах, стійкості зсувів, підірних стінок, при визначенні гірничого тиску та ін. Тому названий показник фізичних властивостей належить до розрахункових.

Щільність гірських порід служить показником різного ступеня їхньої ущільненості і тому використовується при розчленуванні різновікових товщ, комплексів і формацій та кореляції розрізів. Вона може застосовуватися також як показник вторинних змін гірських порід під впливом природних і штучних факторів.

*Пористість.* Як уже говорилося, пустоти в гірських породах, що мають капілярні й субкапілярні розміри, називаються порами. Загальний об'єм пор в одиниці об'єму породи визначає її пористість

$$n = 1 - m = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad (9.2)$$

Пористість скельних порід незначна і зазвичай змінюється від долей відсотка до кількох відсотків, а у напівскельних вона може досягати 15-20%.

За загальною пористістю гірські породи підрозділяються на три групи:

- 1) з низькою пористістю,  $n < 5\%$ ;



2) з середньою пористістю,  $n = 5 \div 20\%$ ;

3) з високою пористістю,  $n > 20\%$ .

Більшість скельних порід має низьку пористість (малопористі), а породи напівскельні, як правило, середньо пористі.

За часом утворення пористість у гірських породах може бути первинною (сингенетичною) і вторинною (епігенетичною). Первинна пористість виникає в процесі формування породи; наприклад, при вистиганні магматичного розплаву, його кристалізації і перекристалізації виникають мікропори між гранями кристалів мінералів у результаті виділення пари й газів, з'являються мікро тріщини в кристалах мінералів і в цілому в породі. У метаморфічних породах пористість виникає при кристалізації і перекристалізації первинних порід у результаті утворення прихованих мікро тріщин. В осадових породах вона утворюється при накопиченні осадків і їх діагенетичному перетворенні. Вона складається з пустот між уламками кристалів мінералів, уламками порід, органічними рештками, із пустот, що утворилися на місці органічних решток в результаті їхнього розкладення, а також тих, що виникли внаслідок перекристалізації або неповної цементації осадку при діагенетичному перетворенні його в породу.

Вторинна пористість у гірських породах виникає при їхньому перетворенні в земній корі в результаті перекристалізації елементів, що складають породу, при розкладенні деяких мінералів і органічних решток, повному або частковому розчиненні й вилуговуванні цементу й утворенні прихованих мікротріщин, при гравітаційному ущільненні порід, дегідратації, а також при їхньому розущільненні або внаслідок впливу тектонічних сил.

Необхідно зазначити, що для магматичних і метаморфічних порід головне значення має тріщинна пористість. У ефузивних порід загальна пористість складається з тріщинної пористості і пористості, яка утворюється при виділенні парів і газів; для осадових порід важливе значення має пористість міжгранулярна, а також та, що виникає в результаті вилуговування. Для осадових порід загальною закономірністю є зменшення пористості з глибиною, зі збільшенням їхнього віку, тобто тривалістю епігенетичних перетворень, а також залежно від залягання в межах тих чи інших геологічних структур або зон.

Пори можуть бути відкритими, тобто такими, що сполучаються між собою, і закритими. Загальна пористість дорівнює сумарному об'єму пор закритих і відкритих. В гідрогеології та нафтовій геології при вивченні колекторських властивостей гірських порід і можливості руху в порах рідин і газів пори підрозділяють на ефектинні та неефективні. Ефективні пори утворюють ефективну пористість порід – частину порового об'єму, по якій може відбуватися рух рідини газів за певного тиску. Неефективна пористість – частина порового об'єму, що не пропускає рідин і газів внаслідок малого розміру пор, їхньої ізольованості або недостатнього тиску.

*Вологість.* Фізичний стан і властивості порід у значній мірі залежать від їхньої вологості. Вологість визначається відношенням маси води, що заповнює пори, до маси сухої породи. Виражається в долях одиниці.

Якщо вологість визначена по природних зразках породи, вона називається природною. У скельних порід пористість мала, також малою є і їхня природна вологість. Вона змінюється від тисячних до сотих долей одиниці. Тому при дослідженнях скельних порід нею зазвичай нехтують і не визначають. У напівскельних порід природна вологість може досягати 15-20% і більше.

*Водні властивості.*

Головними водними властивостями скельних і напівскельних гірських порід є їхні водостійкість, вологоємність і водопроникність.

*Водостійкість.* Водостійкість цих двох груп порід характеризується в першу чергу їхньою розм'якливістю. Будь-які гірські породи при насиченні водою розм'якшуються і знижують свою міцність. Розм'якливість характеризується коефіцієнтом розм'якливості

$K_p$

$$K_p = R_{\dot{n}0.\dot{a}} / R_{\dot{n}0.\dot{n}}, \quad (9.3)$$

де  $R_{\dot{n}0.\dot{a}}$  – тимчасовий опір стисканню зразка породи після насичення водою;

$R_{\dot{n}0.\dot{n}}$  – тимчасовий опір стисканню зразка породи до насичення його водою.

Коефіцієнт розм'якливості виражають у долях одиниці і обчислюють з точністю до 0,1. Для порід скельних водостійких він зазвичай не нижчий від 0,9, у порід із пониженою водостійкістю він дорівнює 0,7-0,8. У напівскельних – вапняків і глинистих пісковиків, мергелів, аргілітів – коефіцієнт розм'якливості менший 0,5.

Волога, що проникає в мікротріщини і пори, справляє руйнівну дію внаслідок розклинюючого тиску тонких плівок, який може досягати десятків мегапаскалів і бути більшим від міцності породи на розрив. У осадочних породах вода розм'якшує і розчиняє цементуючу речовину, це також позначається на зменшенні їхньої міцності.

Більшість осадочних порід при зволоженні або насиченні водою здатна в тій чи іншій мірі змінювати об'єм. Зміна об'єму порід у їхній поверхневій і внутрішній частинах неоднакова внаслідок неоднакового зволоження. Тому в них виникають напруження, що викликають розширення існуючих мікротріщин, утворення нових і в цілому зниження міцності. Багаторазові насичення й наступні висушування створюють «втому» порід від внутрішніх напружень, які повторюються. Певне зменшення міцності після насичення водою спостерігається у всіх типів порід і характеризує той чи інший ступінь їхньої водостійкості. Як правило, чим нижчою є пористість порід, тим вища їхня водостійкість.

*Вологоємність.* Це здатність гірських порід поглинати й утримувати певну кількість води. Скельні породи невологоємні, напівскельні зазвичай слабо вологоємні і лише деякі з них середньовологоємні. Хоча скельні й напівскельні породи в цілому слабо вологоємні, здатність їхня до поглинання невеликої кількості води все ж має практичне значення для побічної, непрямой оцінки їхньої морозостійкості. Під час досліджень вологоємності цих порід визначають їх водопоглинання  $W_{\text{п}}$ , водонасичення  $W_{\text{н}}$  і коефіцієнт водонасичення  $K_{\text{н}}$ .

Під водопоглинанням розуміється здатність породи поглинати (вбирати) воду при зануренні в неї за звичайних умов, тобто при атмосферному тиску й кімнатній температурі. Кількісно водопоглинання дорівнює відношенням маси поглиненої води до маси абсолютно сухої породи, виражається в долях одиниці

$$W_{\text{п}} = g_{\dot{a}} / g_{\text{с}}.$$

Під водо насиченням розуміється здатність породи поглинати (вбирати) воду при зануренні в неї в особливих умовах – під вакуумом, при підвищеному тиску або при кип'ятінні, тобто здатність породи вбирати максимальну кількість води. Водо насичення завжди більше від водопоглинання, бо при насиченні порід за особливих умов повітря і газу в мікротріщинах і порах менше заважають проникненню в них води. Водо насиченням зазвичай визначають відкрити пористість породи. Відношення водопоглинання до водонасичення називають коефіцієнтом водонасичення породи

$$K_{\text{н}} = W_{\text{п}} / W_{\text{н}}.$$

Якщо коефіцієнт водонасичення більший від 0,8, то такі породи вважаються морозонестійкими.

*Водопроникність.* Це властивість гірських порід пропускати крізь себе воду за наявності гідравлічного напору.

Скельні породи проникні лише по тріщинах. У напівскельних породах рух води відбувається як по тріщинах та інших пустотах, так і частково за певних напорів по мікротріщинах і порах. Загальна водопроникність будь-яких гірських порід тим більша, чим більша їхня шпаруватість і більші розміри пустот і тріщин, які її визначають. Вона залежить також від напору, під впливом якого здійснюється рух води.

Водопроникними слід вважати такі породи, котрі за реально існуючих або проєктованих напорів пропускають чи будуть пропускати воду. Водонепроникні – не

будуть пропускати. В цілому водопроникність залежить від властивостей порід (шпаруватість і розміри пор), гідрогеологічних умов (діючий напір) і властивостей води (в'язкість). Мірою водопроникності порід служить коефіцієнт фільтрації  $K_f$  (це питання розглядалося в курсі «Гідрогеологія»).

Закон Дарсі, його витратна і швидкісна форми запису.

Проникність розраховують за формулою

$$K_n = \frac{Q\eta l \cdot 1000}{Ft(\rho_1 - \rho_2)},$$

де  $K_n$  – коефіцієнт проникності,  $\text{см}^2$ ;  $Q$  – кількість рідини, що профільтрувалася через породу за 1 с,  $\text{см}^3$ ;  $l$  – довжина шляху фільтрації,  $\text{см}$ ;  $\eta$  – в'язкість рідини при температурі дослідження,  $\text{пуаз}$ ?;  $F$  – площа поперечного перетину,  $\text{см}^2$ ;  $\rho_1 - \rho_2$  – перепад тиску, напір, МПа;  $t$  – час, с.

Коефіцієнти фільтрації і проникності пов'язані між собою наступною залежністю:

$$K_f = K_n \rho_a / \eta,$$

де  $\rho_a$  – щільність (густина) рідини.

Запитання для самоконтролю.

1. Назвіть показники основних фізичних властивостей гірських порід.
2. Що таке водні властивості порід?
3. Які властивості порід належать до фізико-механічних?
4. Чим обумовлені структурні зв'язки між частками скельних і напівскельних порід?
5. Дайте означення щільності гірської породи, щільності часток породи і щільності сухої породи.

## 10. Механічні властивості скельних і напівскельних порід. Міцність порід, її природа і умови.

Механічні властивості гірських порід характеризуються їх поведінкою за впливу зовнішніх зусиль (навантаження) і проявляються в опорі руйнуванню і деформації.

Властивість породи опиратися і сприймати певні навантаження, не руйнуючись і без великих залишкових деформацій, називається *міцністю*. Їхня властивість змінювати під навантаженням форму будови і об'єм називається *деформацією*. Отже, механічні властивості гірських порід – це їхні міцність і деформаційність. Їх виражають і оцінюють міцнісними й деформаційними показниками.

Міцність скельних і напівскельних порід прийнято виражати і оцінювати тимчасовим опором стисканню, розтягуванню, зсуву (сколюванню). (наводиться схема-графік випробування породи на стискання, 134). Максимальне навантаження  $D_{\bar{a}\delta}$  – до якого зберігається пряма пропорційна залежність деформацій від навантаження. Відношення навантаження  $D_{\bar{a}\delta}$  до початкової площі зразка  $F_0$  характеризує межа пропорційності (МПа):  $R_{i\delta} = D_{\bar{a}\delta} / F_0$ . (Навести приклад з вагою танка і тиском від нього та тиском від жіночого каблучка).

Багаточисельні дослідження різноманітних петрографічних типів скельних порід показують, що при напруженнях, які не перевищують межу пропорційності, деформації мають пружний характер. Якщо напруження перевищують цю межу, то породи швидко руйнуються з втратою суцільності, мають крихкий характер руйнування, деформації у них стають незворотними.

Напівскельні породи (пісковики й алевроліти з глинистим цементом, глинисті сланці, аргіліти, глинисті вапняки й доломіти, мергелі та ін.) відрізняються від скельних пониженими міцністю і опірністю до деформацій.

Деформації напівскельних порід за звичайних умов бувають пружними, але лише до певного, порівняно невеликого значення зовнішнього навантаження. За тим, коли

навантаження перевищує межу пропорційності, деформація зростає швидше від навантаження. Розвиваються пружнов'язкі або залишкові деформації, що характеризуються незворотними змінами форми зразків породи. Пластичні деформації часто переходять у пластичну течію, тобто в деформації, які тривають без зміни зовнішнього навантаження  $P_T$ . При цьому об'єм і суцільність породи до певного моменту не порушуються. Відношення навантаження  $P_T$  до початкової площі зразка  $F_0$  називається межею текучості (МПа)

$$R_T = P_T / F_0. \quad (10.1)$$

Отже, межею текучості є напруження, яке викликає початок пластичної течії. У більшості різновидів напівскельних порід пластичні деформації розвиваються при деякому збільшенні зовнішнього навантаження. Це означає, що в породі проявляються внутрішні сили, котрі гальмують її деформацію, – сили зміцнення. Вони протидіють зовнішнім зусиллям, але тільки до того моменту, коли зовнішні зусилля перевищать їх, стануть хоча б на якусь дуже малу величину більшими від внутрішніх сил опору, сил зміцнення  $P_{max}$ . Тоді гірська порода (зразок) руйнується, втрачає цілісність і початкову форму. Навантаження, яке відповідає (дорівнює) максимальному зміцненню  $P_{max}$ , характеризує тимчасовий опір породи стисненню – її міцність. Відношення навантаження  $P_{max}$  до початкової площі зразка  $F_0$  називають межею міцності породи на стиснення (МПа)

$$R_{ст.} = P_{max} / F_0. \quad (10.2)$$

Відповідно можуть бути визначені межі міцності породи на розтягнення, сколювання або згинання.

У типових напівскельних породах після явно виражених пластичних деформацій у процесі пластичної течії з'являються тріщини, часто з нерівними поверхнями, настає розрив суцільності, відбувається крихко пластичне їх руйнування.

Напруження, за яких настають пластичні деформації або руйнування порід, називаються граничними. Відповідно до сучасних теоретичних положень механіки гірських порід (механіки ґрунтів) розрізняють два напружених стани гірських порід. Тому різні розрахунки ведуть за двома напруженими станами.

*Перший граничний* напружений стан визначається несучою здатністю, міцністю і стійкістю породи, тобто таким граничним навантаженням, за якого порода перебуває у стані, що безпосередньо передуює порушенню її рівноваги, – її руйнуванню. Тому розрахунки за першим граничним станом називають розрахунками за несучою здатністю, за міцністю або за стійкістю.

*Другий граничний* напружений стан відповідає навантаженню, котре викликає розвиток у породі пластичних деформацій, які не перевищують певного гранично допустимого значення. При деформаціях, більших від цього граничного значення, виникає небезпека порушення міцності й стійкості споруд, нормальної їх експлуатації тощо. Розрахунок за другим граничним станом називають розрахунком за деформаціями. Навантаження, яке викликає такий стан порід, як правило, менше від навантаження, що відповідає їхньому першому граничному стану.

Для скельних порід розрахунки можуть виконуватися лише за першим граничним напруженим станом, а для напівскельних – за першим і за другим.

*Міцність.* Тимчасовий опір стисненню скельних порід вимірюється десятками й сотнями, а сколюванню й розриву десятками й одиницями мегапаскалів

$$R_{ст.} > R_{ск.} > R_p.$$

Тимчасовий опір стисненню напівскельних порід змінюється в широких межах: у міцних різновидів від 15 до 50 МПа, середньої міцності – від 2,5 до 15 МПа, а малої міцності – менше від 2,5 МПа. Опір сколюванню зазвичай перевищує 5 МПа у міцних, від 1 до 5 МПа у порід середньої міцності і менше 1 МПа – у слабких. Опір розриву становить десяти долі й одиниці мегапаскалів.

Із наведених даних випливає, що скельні породи принципово відрізняються від напівскельних. Перші характеризуються більшою міцністю, у звичайних умовах деформуються тільки пружно, виявляючи крихкий характер руйнування. Другі наділені меншою міцністю, пружні деформації їх і за звичайних умов супроводжуються деформаціями залишковими, а руйнування має крихкопластичний або пластичний характер. Тому зовсім неправильно об'єднувати скельні й напівскельні породи в одну групу й говорити про «тверді» гірські породи взагалі.

До порід напівскельних слід відносити різновиди, що мають тимчасовий опір стисненню менший від 50 МПа, тому що тільки такі породи починають відрізнятися особливостями деформації і руйнування, несучою здатністю, стійкістю в укосах, підземних виробках і т.д.

На міцність скельних і напівскельних порід великий вплив справляють їхні текстурні й структурні особливості – шаруватість, сланцюватість, смугастість та ін. Анізотропія таких порід встановлена численними дослідженнями. У більшості випадків тимчасовий опір стисненню, спрямованому перпендикулярно до шаруватості, вищий, ніж вздовж шаруватості.

Із наведених даних також випливає, що межі міцності порід визначаються не лише міцністю власне породи і діючим навантаженням, але й умовами його прикладення. За численними дослідами можна зробити висновок, що міцність порід на стиснення приблизно у 2-5 разів більша від міцності на сколювання і у 20-50 разів більша від міцності на розтягування.

*Умови міцності.* Руйнування гірських порід відбувається тоді, коли зовнішні зусилля виявляються більшими від внутрішніх зусиль опору у породі. При граничних станах внутрішні зусилля врівноважують зовнішні і тому руйнування породи, так само, як і значних небезпечних деформацій, при цьому не відбувається. Для того, щоб виявити роль цих внутрішніх сил, у механіці гірських порід розглядають дію зовнішніх сил по відношенню до будь-якої, довільно вибраної площадки – перетину всередині породи. Дію будь-якої сили на таку площадку можна розкласти на дві складові: нормальну до площадки і дотичну до неї. Загальна, нормальна й дотична сили, віднесені до площадки розміром у одиницю площі, відповідно називають загальним  $\sigma$ , нормальним  $\sigma_f$  і дотичним  $\tau$  напруженнями.

Нормальній дотичні напруження, що діють у даній точці елементарної площадки, визначають міцність і стійкість породи у цій точці. При навантаженні породи і при її деформації в кожній її точці можна виділити елементарний об'єм, на три взаємно перпендикулярні грані якого, як на елементарні площадки, діють лише нормальні напруження, а дотичні відсутні. Цих трьох нормальних напружень досить для того, щоб скласти характеристику напруженого стану породи в даній точці. Такі нормальні напруження називають головними і позначають їх відповідно  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і  $\sigma_3$ .

Напрямки, по яких діють головні напруження, називають головними осями напружень.

Якщо два головних напруження дорівнюють нулеві, а діє лише одне головне напруження, то матиме місце одновісний, або лінійний, напружений стан. Відповідно може мати місце двовісне напруження, яке діє в площині, і тривісне, що розвивається в об'ємі, – об'ємний напружений стан.

Гірські породи в умовах природного залягання зазвичай перебувають в об'ємному напруженому стані. Він розвивається під впливом ваги мас, що залягають вище (гравітаційних сил) і тектонічних сил, у меншій мірі температурних градієнтів тощо.

Якщо на поверхню горизонтального перетину якогось об'єму породи площею  $F$  діє рівномірно розподілене навантаження  $P$ , то нормальне в цьому перетині напруження  $\sigma_f$  є водночас головним і дорівнює

$$\sigma_f = \sigma_1 = P / F . \quad (10.4)$$

Площа будь-якого іншого перетину, нахиленого до горизонту під кутом  $\alpha$ , дорівнює  $F_1 = F / \cos \alpha$ .

Обидві складові однієї сили  $P$ , орієнтовані нормально і по дотичній до цього перетину, відповідно дорівнюють

$$P_f = P \cos \alpha; \quad P_a = P \sin \alpha. \quad (10.5)$$

Тоді нормальні й дотичні напруження у випадку одновісного напруженого стану дорівнюють

$$\sigma_f = \frac{P_f}{F_1} = \frac{P \cos \alpha \cos \alpha}{F} = \sigma_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 (1 + \cos 2\alpha); \quad (10.6)$$

$$\tau = \frac{P_a}{F_1} = \frac{P \sin \alpha \cos \alpha}{F} = \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma_1 \sin 2\alpha. \quad (10.7)$$

Кут  $\alpha$ , що дорівнює  $\theta$ , прийнято називати кутом відхилення повного напруження  $\sigma_1$  від нормалі до площадки  $F_1$ .

Із цих рівнянь випливає:

1. Нормальне напруження досягає максимального значення у перетині, по відношенню до якого стискаюче (розтяжне) зусилля  $P$  спрямовано перпендикулярно, оскільки при  $\alpha = 0$   $\cos^2 \alpha = 1$ . В цьому випадку нормальне напруження є головним, тобто діючим по головній осі:  $(\sigma_f)_{max} = \sigma_1$ .

За всіх інших значень кута  $\alpha$  (від 0 до 90°)  $\cos^2 \alpha$  менший від одиниці.

2. Дотичне напруження досягає максимального значення при такому орієнтуванні перетину, коли кут  $\alpha$  між нормаллю до перетину і напрямком повного стискаючого (розтяжного) зусилля дорівнює 45°. У цьому випадку  $\sin 2\alpha = 1$  і  $\tau_{max} = \sigma_1 / 2$ .

Кут  $\alpha$  дорівнює найбільшому куту відхилення –  $\theta_{max}$ . За всіх інших значень кута  $\alpha$   $\sin 2\alpha$  менший від одиниці.

Таким чином, в об'ємі гірської породи у найнесприятливішому стані перебувають перетини, по відношенню до яких діюче зусилля спрямовано по нормалі або під кутом, близьким до 45°, тобто перетини, в яких діють максимальні нормальні і дотичні напруження. Ось чому найбільша деформація порід при стисненні спостерігається у напрямку дії зусилля, а тріщини сколювання виникають вздовж перетинів, які утворюють з напрямком діючого зусилля кут, близький до 45°, тобто близький до кута  $\theta_{max}$ .

Деформації або руйнування гірської породи розвиваються в першу чергу в указаних напрямках, причому тільки в тих випадках, коли зовнішні сили більші від внутрішніх сил породи. Якщо внутрішні сили породи дорівнюють напруженням, викликаним зовнішніми зусиллями, то порода перебуває у граничному напруженому стані, тобто в стані, що безпосередньо передують її руйнуванню або значним деформаціям.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Поясніть відмінності між міцністю і деформацією гірських порід.
2. За яких умов відбувається руйнування природної структури гірської породи?
3. В чому полягають відмінності між пружними і пластичними деформаціями у породах?
4. Який стан породи називається першим граничним напруженим?
5. Що таке другий граничний напружений стан?
6. Поясніть умови міцності гірської породи.

### **11. Зміна міцності й деформаційності порід внаслідок високого всебічного тиску і температури.**

Як уже говорилося, гірські породи в умовах природного залягання зазвичай перебувають у об'ємному (всебічному) напруженні. Гравітаційні навантаження на платформах можуть досягати 120-150 МПа, а в геосинклінальних зонах 400-500 МПа і

більше. Тектонічні сили викликають напруження до кількох тисяч мегапаскалів. Температура осадових порід на платформах на великих глибинах у більшості випадків не перевищує 30-45°C, інколи досягає 85-90°C. У геосинклінальних зонах вона значно вища.

Дані про вплив всебічного тиску на властивості скельних і напівскельних порід показують, що при рівномірному всебічному стисненні, тобто при  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , у міцних порід виявляється пружна зміна об'єму, а у маломіцних і пористих порід – залишкова. Пружна зміна об'єму у міцних гірських порід навіть при великому всебічному стисненні (до 2000 МПа) є незначною в порівнянні з їхнім початковим об'ємом.

Коефіцієнт об'ємного стиснення  $\beta$  породи характеризує відносне зменшення об'єму при збільшенні тиску на 0,1 МПа:

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V}. \quad (11.1)$$

Знак «—» вказує на те, що додатному приросту тиску відповідає від'ємний приріст об'єму.

У більшості гірських порід коефіцієнт об'ємного стиснення складає  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  МПа, тобто при збільшенні тиску на 0,1 МПа об'єм гірських порід зменшується на декілька мільйонних або десятимільйонних часток від їх початкового об'єму. Цей коефіцієнт зменшується зі збільшенням тиску, а щільність порід збільшується. При зменшенні у складі гірських порід кількості кварцу, слюд і польових шпатів та збільшенні залізомагнезійних силікатів їхня стисливість зменшується. Кислі породи стискаються більше, ніж основні. Стисливість основних порід як при малих, так і особливо при великих тисках приблизно відповідає середній стисливості породоутворюючих мінералів. Все це показує, що структурні зв'язки у кислих породах більш податливі, ніж у основних.

При високому всебічному стисненні скельних і напівскельних порід помітно підвищуються їхні міцність, пружність і пластичність. В цьому випадку збільшення міцності порід проявляється в тому, що вони, не руйнуючись, витримують навантаження значно більші, ніж при нормальному тиску.

Помітно змінюється й характер руйнування порід. Гірські породи, крихкі за нормальних умов, стають пластичними при високому всебічному тиску. Так, наприклад, експерименти показали, що вапняк із міцністю на стиснення 260 МПа за звичайних умов проявляє лише пружні деформації і крихко руйнується, як тільки напруження досягнуть межі міцності й пружності. При всебічному тиску 1000 МПа зразок таких вапняків зминається на 50% висоти без розриву суцільності.

Спостереження ряду дослідників показали, що вплив температури на деформацію гірських порід (при підвищенні її до 200 і навіть до 500°C) є незначним. Однак слід гадати, що механічні деформації гірських порід, що супроводжуються більш значним підвищенням температури, повинні сприяти метаморфічним процесам. Цікаво зазначити, що на деформацію твердих гірських порід великий вплив справляє присутність у них порової води. Ця вода відіграє роль ніби мастила при інтергранулярних пересуваннях, вона полегшує розвиток пластичних деформацій. За відсутності води навіть у дуже пластичних породах поряд із пластичною деформацією проявляється й деформація крихка.

Важливо також враховувати, що рівномірний всебічний тиск і однобічний тиск, накладені на гірську породу, що перебуває в обстановці всебічного тиску, викликає зовсім різні ефекти. Одне всебічне стиснення підвищує щільність породи, знижує її проникність для розчинів і газів і підвищує температуру кристалізації мінералів. Накладення додаткового орієнтованого тиску підвищує проникність порід, знижує температуру кристалізації мінералів і істотно впливає на зміну мікроструктури і текстури гірських порід. В цьому випадку спостерігається поява катакlastичних структур, структур пластичної течії, кристалізаційної сланцюватості, виникнення орієнтовки мінералів. Різні мінерали мають різну здатність до пластичних деформацій. Так, наприклад, часто спостерігається, що в катакlastованих ділянках граніту зерна кварцу й польового шпату

роздріблені, в той час як листочки слюди не мають тріщин, вигнуті, пластично деформовані.

*Запитання для самоконтролю..*

1. За яких умов породи перебувають під впливом об'ємних напружень?
2. Що характеризує коефіцієнт об'ємного стиснення?
3. Яким чином всебічний тиск впливає на властивості гірських порід?

**12. Зміна фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних порід під впливом гідротермальних процесів та вивітрювання.**

Це так звані вторинні процеси. Породи, змінені гідротермальними процесами, зазвичай мають локальне поширення – на окремих ділянках або в межах певних зон, де вони піддавалися впливу гідротермальних розчинів. Однак зміни властивостей таких порід можуть поширюватися на більші глибини (сотні метрів) і проявлятися двояко. В одних випадках відбувається підвищення їхньої міцності, зменшення пористості – породи стають монолітними, підвищується їхня міцність. В інших випадках під впливом гідротермальних розчинів відбуваються розкладення порід, винесення нестійких компонентів, привнесення нових; у результаті метасоматозу змінюється їхній мінеральний склад, а це призводить до зменшення щільності, підвищення пористості і зниження міцності. Утворюються ділянки й зони послаблених порід, котрі становлять великий інтерес при інженерно-геологічній оцінці умов будівництва споруд. Виявлення й оконтурення таких послаблених ділянок і зон є найважливішим завданням при інженерно-геологічних вишукуваннях.

У зоні вивітрювання незмінених порід зазвичай утворюється щербенисто-глинистий елювій, тоді як у породах гідротермально змінених елювій суттєво глинистий, причому потужність зони інтенсивного вивітрювання тут значно більша.

Прикладів послаблення гірських порід під впливом гідротермальних процесів відомо порівняно багато. Характерним є район Красноярської ГЕС на Єнісеї. Тут граніти, що є основою споруд, у межах певних зон під впливом гідротермальних процесів зазнали істотних змін. Наприклад, міцність незмінених гранітів на стиснення складає 130 МПа, у гранітів слабо каолінізованих вона дорівнює 103 МПа і у каолінізованих – 60 МПа.

Наведені дані показують, що гідротермальні процеси можуть справляти значний вплив на зміну фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних порід.

Фізико-механічні властивості скельних і напівскельних порід змінюються і при вивітрюванні. Тут змінюються зовнішній вигляд порід, їхній фізичний стан і склад. Вивітрювання, на відміну від гідротермальних процесів, призводить до зміни порід і їхніх властивостей на більших площах, тобто має регіональне поширення, але розвивається головним чином у приповерхневих горизонтах Землі. Залежно від ступеня вивітрілості порід можна розрізнити певні стадії їхньої зміни, а в зоні вивітрювання виділяти підзони. Відповідно до цього і властивості порід – щільність, пористість, водопоглинання, водопроникність, міцність, тривкість і деформаційність – змінюються залежно від ступеня вивітрілості порід. На відміну від гідротермальних процесів вивітрювання завжди веде тільки до руйнування і розпушування порід, зниження їхньої щільності й міцності, до утворення ділянок і зон із більш низькими показниками фізико-механічних властивостей. В результаті скельні породи переходять у напівскельні, а при подальшому руйнуванні у сипкі незв'язні або м'які зв'язні.

Загальновідомо, що зі збільшенням вивітрілості порід підвищується їхнє водопоглинання і відповідно знижуються характеристики фізико-механічних властивостей. Тому можна вважати водопоглинання показником вивітрілості порід. Цікавою є спроба знайти об'єктивний показник для оцінки ступеня вивітрілості граніту. Виходячи з положення, що найменш стійким у граніті є біотит і що двовалентне залізо (головним носієм його в



граніті є біотит) зовсім нестійке в зоні окислення, запропоновано використати відношення  $Fe^{3+} / Fe^{2+}$  в якості показника ступеня вивітрілості граніту. За даними досліджень керну колонкової свердловини, пройденої в граніті, була встановлена залежність зміни міцності гранітів від ступеня вивітрілості. Характерно, що у не вивітрілих гранітів відношення  $Fe^{3+} / Fe^{2+}$  складає в середньому 0,4. Зі зменшенням ступеня вивітрілості порід зменшується їхня пористість, підвищуються щільність, міцність і пружність.

В цілому вивітрювання веде до зниження будівельних властивостей порід, тому під час вишукувань завжди необхідно виділяти зону вивітрілих порід, досліджувати й оцінювати їхні властивості. Для цього крім якісних показників (зовнішнього вигляду, забарвлення, мінерального складу та ін.) цілком можуть бути використані різні кількісні показники, що характеризують їхні фізико-механічні властивості.

Для вивчення властивостей скельних і напівскельних порід застосовують різноманітні польові й лабораторні методи і методики досліджень, прилади й установки. Таке вивчення лише тоді є повноцінним, коли воно комплексне, тобто супроводжується детальним і повним вивченням їхніх петрографічних особливостей і геологічних умов залягання. Дані про властивості порід без петрографічних і геологічних знань мають незрівнянно менше значення, вони малонадійні, неповноцінні. Для будівельних цілей вивчення гірських порід повинно бути спеціалізованим, петрографічним. Відповідальні висновки і оцінка властивостей гірських порід не можуть базуватися на одиничних визначеннях, для цього вимагається необхідна кількість визначень, що забезпечує отримання обґрунтованих середніх характеристик порід, а також характеристик, які показують ступінь неоднорідності й мінливості їхніх властивостей. Такі характеристики повинні забезпечувати надійність інженерних розрахунків і рішень. Отже, число визначень повинно бути таким, щоб можна було застосувати методи математичної статистики для обробки й аналізу результатів досліджень властивостей гірських порід.

#### *Запитання для самоконтролю.*

1. Як позначається дія гідротермальних розчинів на властивостях порід?
2. В чому проявляється вплив вивітрювання на властивості гірських порід?

### **13. Додаткові спеціальні характеристики фізико-механічних властивостей скельних і напівскельних порід.**

Такі характеристики становлять інтерес поряд із основними при проектуванні та будівництві різних споруд, при виконанні геологорозвідувальних і гірничих робіт на родовищах корисних копалин тощо. Інколи їх називають виробничими, будівельними, геотехнічними або гірничотехнічними. В дійсності всі вони також виражають фізико-механічні властивості гірських порід, оскільки визначають їхній фізичний стан і опір впливу тих чи інших зусиль. Однак якщо основні характеристики необхідні для розв'язку найрізноманітніших будівельних та інших завдань, то додаткові використовують тільки для проектування й оцінки головним чином тих чи інших виробничих процесів. Кожна така характеристика застосовується залежно від виду будівельних або гірничих робіт в «індивідуальному» порядку. Тому їх правильніше називати додатковими спеціальними характеристиками фізико-механічних властивостей гірських порід. До числа таких характеристик відносяться: тривкість порід, твердість, стиранність, знос і абразивність, розробність, буримість, опір вибухам і різанню, розпушувальність, морозостійкість та ін.

*Тривкість гірських порід* характеризується їхнім опором руйнівним зусиллям. При її оцінці користуються головним чином класифікацією М.М.Протодьяконова. За цією класифікацією всі гірські породи розділяються на 10 категорій. Для кожної з них встановлений коефіцієнт тривкості, який характеризує породу водночас за ступенем опору стиснення, розробністю, буримістю, витратами вибухової речовини для руйнування, стійкістю і тиском на кріплення підземних виробок.

Коефіцієнт тривкості гірських порід залежить від їхнього петрографічного складу, фізичного стану – ступеня тріщинуватості, вивітрілості, вологості, міцності та ін. Найчастіше він визначається за тимчасовим опором стисненню порід

$$f_{\epsilon\sigma} = R_{ct}/100. \quad (13.1)$$

*Твердість* характеризується опором, який виявляє порода при проникненні в неї іншого тіла, тобто якого-небудь інструмента. Отже, твердість – це міцність породи на вдавлювання при місцевих контактних впливах. Вона залежить від твердості мінералів, з яких складається порода, від міцності структурних зв'язків у ній і від фізичного стану породи. При оцінці твердості мінералів зазвичай користуються шкалою Мооса. Розрізняють мікротвердість, тобто твердість окремих мінералів, і агрегатну твердість, тобто твердість породи в цілому.

Агрегатну твердість визначають шляхом вдавлювання штампа в зразок породи з двома плоскопаралельними шліфованими поверхнями. Замість агрегатної твердості часто визначають *контактну міцність* шляхом вдавлювання штампа у необроблену природну поверхню зразка гірської породи. Цей метод простіший і ближчий до реальних виробничих умов. Контактна міцність гірських порід може коливатися у досить широких межах, наприклад, від 3,2 МПа (філітовий сланець) до 29,0 МПа (кварцит).

Показники агрегатної твердості й контактної міцності використовуються при виборі гірничих і бурових інструментів.

*Стиранність, зношування і абразивність* є опосередкованими показниками тривкості гірських порід. Так, стиранність і зношування характеризують тривкість порід при використанні їх для шляхових цілей у вигляді щебеню для дорожнього баласту, покриттів, влаштування бруківок, як будівельного каменю для підлог, сходинок, як матеріалу для будівництва берегозміцнюючих споруд.

Визначення стиранності виконують шляхом випробування зразків породи на стандартному обертовому крузі для стирання. На такий круг у якості шліфувального матеріалу насипають кварцовий пісок відповідної величини або наждак. Після певного числа обертів круга зразок зважують і вимірюють. За втратою маси і зміною об'єму визначають його стиранність. Обчислення стиранності виконують за об'ємом і масою на одиницю поверхні, що третяся. Наприклад, при проектуванні доріг на ділянках з інтенсивним рухом стиранність порід повинна бути не більшою від 0,4 г/см<sup>3</sup>, а при слабкому русі не більшою від 2 г/см<sup>3</sup>. породи зі стиранністю, більшою від 2 г/см<sup>3</sup>, належать до слабких.

*Зношування* характеризує тривкість щебеню, виготовленого зі скельних і напівскельних порід, при випробуванні його в барабані Деваля. Наважка щебеню після випробування в барабані (після 10000 обертів) повинна мати втрату в масі (зношування – утворення дрібнозему) не більше від 4-10% (для дорожніх цілей залежно від класу доріг).

*Абразивність* гірських порід характеризує їхню здатність стирати контактуючі з ними поверхні будівельних і гірничих інструментів, машин і обладнання у процесі їхньої роботи. Абразивність гірських порід оцінюється середньою втратою маси циліндричного стрижня із вуглецевої сталі шляхом стирання його об породу при обертанні зі швидкістю 400 об/хв під осьовим навантаженням 1,5 МПа протягом 10 хв. Всі гірські породи за абразивністю поділяються на вісім класів – від дуже мало абразивних до у вищій мірі абразивних.

*Розробність* гірських порід характеризується опором їх руйнуванню в різних робочих процесах (копанні, бурінні, відбиванні, підриванні тощо). Розробність (видобувність) визначає спосіб і інструменти, якими слід користуватися при розробці гірських порід. Вона характеризується питомими витратами часу, енергії або витратами робочого інструменту на руйнування (розробку) одиниці об'єму породи. За будівельними нормами і правилами всі породи за розробністю поділяються на XVI категорій.

*Буримість* характеризує ступінь відносної опірності гірських порід руйнуванню інструментом у процесі буріння. Показником буримості прийнято вважати довжину

шпура, пробуреного за 1 хв чистого часу буріння за певних стандартних умов. Інший критерій – число хвилин чистого часу буріння 1 м шпура також за стандартних умов. Буримість порід залежить від їхніх фізико-механічних властивостей, розміру, форми і матеріалу бурового інструменту, режиму роботи, тобто енергії удару, кількості обертів, осьового тиску, якості й інтенсивності промивання і продування забою тощо. Показники буримості служать для нормування процесів буріння і класифікації порід за буримістю.

*Підривність* характеризує відносну опірність порід руйнуванню при розробці їх вибуховим способом (при вибуховому відбиванні). Показником підривності є витрата вибухової речовини в кілограмах на 1 м<sup>3</sup> гірської породи в умовах природного залягання. Гірські породи від V до XVI будівельних категорій, які розробляються частково або повністю вибуховим способом, розрізняються між собою за значенням питомої витрати вибухової речовини. Підривність порід залежить від їхнього складу і будови, фізичного стану, міцності, тривкості, а також від умов підривання (вибухової речовини, розміру заряду тощо).

*Опірність різанню* характеризує опір породи різанню гірничою машиною. Мірою опірності різанню служить витрата роботи, кількість зруйнованої породи і ступінь її подрібнення.

*Розпушуваність*, тобто збільшення об'єму порід у результаті їхнього розпушування, подрібнення, перелопачування, екскавації при розробці, оцінюють коефіцієнтом розпушуваності  $K_p$ . Він являє собою відношення об'єму породи після розпушування  $V_p$  до об'єму її в умовах природного залягання  $V$ , тобто

$$K_p = V_p/V. \quad (13.2)$$

Розпушуваність порід залежить як від їхнього складу, так і від виробничих умов розробки, транспортування, способу вкладання у відвал, тривалості перебування у відвалі і т.д.

*Морозостійкість* є однією із важливих будівельних властивостей скельних і напівскельних порід. Вона характеризує їхню здатність зберігати фізичний стан (не руйнуватися) і тривкість за впливу від'ємних температур. При неодноразовому заморожуванні і розмерзанні в породах виникають напруження, які викликають руйнування. В результаті породи кришаться, розтріскуються, розшаровуються, вкриваються макро- і мікротріщинами, втрачають міцність.

Морозостійкість порід визначається прямими (безпосередні випробування порід у морозильних камерах шляхом 15- або 25-кратного їх заморожування й розморожування) і опосередкованими (коефіцієнт водонасичення і коефіцієнт розм'якшення) методами. Порода вважається морозостійкою, якщо після багаторазового заморожування не має зовнішніх ознак руйнування і деформацій і якщо її міцність знижується не більше ніж на 20-25%.

#### Запитання для самоконтролю.

1. Які характеристики властивостей порід відносяться до додаткових?
2. Що називається тривкістю гірської породи і від чого вона залежить?
3. Як визначаються стиранність, знос і абразивність порід?
4. Що означає термін «розробність гірської породи»?
5. Дайте означення морозостійкості гірської породи.

#### **14. Методи штучного покращання властивостей гірських порід.**

Методи покращання властивостей порід зазвичай спрямовані на відновлення їхньої монолітності й щільності, підвищення міцності і стійкості, зниження деформаційності і водопроникності. Вони полягають головним чином у цементації, глинизації та бітумізації, а для тимчасового покращання і заморожуванні.

*Цементація.* Цей метод полягає в тому, що в породи через спеціально пробурені свердловини після старанного їх промивання водою нагнітають цементний розчин. Він

проникає у тріщини й пустоти, тужавіє з породою, твердіє і додає їй монолітності, щільності, стійкості і міцності та значно знижує деформаційність і водопроникність. Цементацию найчастіше застосовують у наступних випадках.

1. Для покращання природних основ будівель і споруд. У цьому випадку перед зведенням фундаментів виконують площинну цементацию порід у дні котловану на глибину поширення додаткових напружень від ваги споруди.

2. Для підвищення стійкості гірських порід у підземних виробках і захисту їх від водопритоків. У цьому випадку також виконують площинну цементацию порід за облицювання підземної виробки, добиваючись щільного її прилягання до навколишніх порід, підвищення їхньої монолітності і стійкості і гідроізоляції підземних виробок від навколишнього середовища.

3. Для підвищення стійкості гірських порід в укосах виїмок, кар'єрів і стінках котлованів. У цьому випадку виконують місцеву або площинну цементацию. Порід для надання їм монолітності й стійкості.

4. При влаштуванні протифільтраційних завіс. У цьому випадку породи цементують на глибину вздовж певної зони, перегороджуючи шлях руху підземних вод. Так, наприклад, влаштовують протифільтраційні завіси під греблями і в їхніх примиканнях для попередження значних втрат води на фільтрацію і зменшення зважуючої дії води в основах споруд. Завіси влаштовують також вздовж певних ліній для попередження втрат води з водосховищ або для захисту котлованів, кар'єрів та інших глибоких виробок від притоку води.

Межа застосування цементации до певної міри визначається шириною тріщин. Встановлено, що тріщини, тонші від 0,15 мм, не можуть бути зацементовані, оскільки зерна цементу не можуть туди проникнути. З цих же причин цементация не застосовується для ущільнення пісків. Затвердіння цементного розчину повинно відбуватися одразу ж після заповнення ним тріщин і пустот у породі. Тому для цементации великотріщинуватих і кавернозних порід застосовуються розчини, які швидко тужавіють (з активними добавками), а для тонкотріщинуватих порід – такі, що тужавіють повільно.

*Глинизація.* Для зменшення водопроникності сильно тріщинуватих порід або з пустотами великих розмірів, де водопоглинання дуже велике (до 100 л/хв), застосування цементации може виявитися недоцільним. У цьому випадку вона може бути замінена глинизацією.

Метод глинизації полягає в тому, що в породу через спеціально пробурені свердловини нагнітають глинистий розчин зі щільністю 1,20-1,40 г/см<sup>3</sup> під тиском 2,0-3,0 МПа. Під таким тиском вода з глинистого розчину відтискається і відбувається спресування глинистого матеріалу в тріщинах і пустотах. Наступне його набрякання ще більше покращує тампонування тріщин і пустот і знижує водопроникність порід.

*Бітумізація гаряча.* Для зменшення водопроникності сильно тріщинуватих порід, а також порід із пустотами великих розмірів, водоносних, де підземні води рухаються з великою швидкістю, застосування цементации і глинизації недоцільне й не вигідне. В цьому випадку гарні результати дає метод гарячої бітумізації. Суть його полягає в тому, що через спеціально пробурені свердловини в породу нагнітають бітум із температурою 150-180°C. Заповнюючи тріщини й пустоти в породі, він витісняє воду, застигає, і порода стає водонепроникною. Ефект значний і тривалий, бітум не розмивається, він є стійким у будь-якій агресивній воді навіть при великих швидкостях її руху.

*Штучне заморожування.* Метод застосовується як для скельних і напівскельних, так і особливо для закріплення нестійких водоносних сипких незв'язних і м'яких зв'язних порід. Суть методу наступна. По контуру котловану, гірничої виробки або тунелю бурять ряд свердловин на відстані 0,8-1,5 м одна від одної, до необхідної глибини (на 3-5 м глибше від проектної глибини заморожування). Заморожування порід виконують охолодженням до температури -20°C і нижче розсолем (CaCl<sub>2</sub>, NaCl, MgCl<sub>2</sub> та ін.). Розсіл циркулює у заморожуючих колонках, що встановлені в свердловинах. Розсол

охолоджується у спеціальних холодильних установках. Штучним заморожуванням створюється міцний і водонепроникний замкнений контур на час виконання будівельних або гірничих робіт. Після завершення робіт заморожування припиняють і породи відтають природним шляхом.

Наступна група методів поширюється на сипкі незв'язні породи.

*Осушення.* Цей спосіб застосовують для: 1) підвищення стійкості порід, запобігання спливанню, розрідженню, сповзання, розвитку суфозійних процесів; 2) попередження зволоження, обводнення або засолення порід; 3) захисту котлованів, виїмок, кар'єрів, шахт і підземних споруд від затоплення підземними водами; 4) захисту підземних частин споруд від агресивної дії підземних вод. Розв'язання цих завдань вирішується за допомогою будівництва різних дренажів. Дренажі знижують рівні підземних вод на певну глибину або перехоплюють потік підземних вод на шляху фільтрації. Дренаж може бути постійним або тимчасовим, на час виконання будівельних робіт.

Дренажі розрізняють за конструкцією – відкриті, закриті, трубчасті, галерейні та ін.; за розташуванням у породі – горизонтальні, вертикальні, комбіновані, спеціальні; за розташуванням у плані – головні, кільцеві, берегові, площинні (систематичні); за гідравлічними особливостями – досконалі (повністю пронизують водоносний шар) і недосконалі (пронизують частково).

*Механічне ущільнення.* Шляхом дії на породу укочуванням, трамбуванням або вібрацією досягають щільнішої упаковки часток у породі, зменшення пористості і підвищення щільності скелету. Це підвищує її опір зсуву і стисканню, тобто стійкість і несучі здатності. Застосовується для підготовки основ для промислових і цивільних споруд, шляхових і аеродромних покриттів, будівництві насипів, гребель, дамб, при підготовці територій для забудови на намитих або насипаних породах.

*Тампонування і кольматація глинизацією.* Ці методи застосовують для зменшення водопроникності пісків та інших сипких уламкових порід. Тампонування глинизацією застосовують головним чином для ущільнення грубоуламкових щербенистих, галечникових і валунних порід із тією ж метою, що й при глинизації скельних і напівскельних порід. Кольматування, тобто вмивання тонко дисперсних глинистих часток у пори порід або покриття їх із поверхні тонким глинистим шаром, застосовують для зменшення водопроникності пісків.

*Покращання гранулометричними добавками.* Цей метод застосовують для надання піщаним і глинистим породам більшої щільності, стійкості і міцності при будівництві земляних споруд і особливо шляхових і аеродромних покриттів. Суть методу полягає у підборі і приготуванні оптимального гранулометричного складу породи. Склад породи змінюється штучним чином шляхом введення як великих скелетних добавок (гравію, грубо- і великозернистого піску), так і добавок тонких, заповнюючих (пилуватих і глинистих). Як показує практика, породи оптимального гранулометричного складу, ущільнені до максимальної щільності при оптимальній вологості, є найміцнішими і стійкими як у сухому, так і водонасиченому стані.

*Бітумізація холодна.* Застосовується для зменшення водопроникності пісків шляхом нагнітання в них бітумних емульсій через спеціальні ін'єктори, заглиблені в породу. Бітумні емульсії складаються із розчину тонко дисперсних однорідних бітумних часток розміром, у 25-40 разів меншим від середнього розміру часток породи. Емульсії, коагулюючи в товщі піску з відділенням води, заповнюють пори породи, зв'язують її і знижують водопроникність. Спосіб застосовується головним чином для влаштування протифільтраційних завіс і огорожень. Холодна бітумізація може застосовуватися спільно з гарячою бітумізацією для заповнення тонких тріщин у скельних і напівскельних породах і надання їм повної водонепроникності.

*Силікатизація дворозчинна.* Цей метод застосовують для закріплення пісків і надання їм механічної міцності, стійкості і водонепроникності шляхом цементації твердіючими гідроокисами кремнекислоти. Через свердловини-ін'єктори в породу

почергово нагнітають рідке скло (силікат натрію  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) і хлористий кальцій. Рідке скло витісняє з пор воду. Наступним нагнітанням розчину хлористого кальцію витісняють із них рідке скло. Плівки рідкого скла, що залишаються на поверхні зерен породи, вступають у реакцію з  $\text{CaCl}_2$ :



Гель

В результаті цієї реакції утворюється гідрогель кремнекислоти, який поступово твердіє і цементує пісок.

*Закріплення синтетичними смолами.* Це різні полімерні сполуки – карбомідні, фурфурол-анілінові, епоксидні тощо. Їхня дія проявляється в цементації породи і в наданні їй міцності, стійкості і водонепроникності. Після нагнітання в породи утворюється гель, що перетворює пісок на міцний водостійкий і водонепроникний моноліт.

*Електроосмотичне осушення.* Застосовується для осушення м'яких водо насичених глинистих порід – глин, суглинків, супісків, дрібно- і тонкозернистих пісків, тобто порід водонепроникних або слабководонепроникних, які практично не наділені водовіддачею. Суть методу полягає в наступному. Якщо два електроди занурити в глинисту породу і пропускати через неї постійний електричний струм, то почнеться рух води до катода, оскільки молекули води здебільшого мають позитивний заряд. Це явище отримало назву електроосмосу завдяки тому, що односторонній рух води через пористе середовище відбувається під впливом різниці потенціалів електричного струму.

При електроосмосі із породи виділяється не лише вільна іммобілізована і капілярна вода, але частково і фізично зв'язана. У зв'язку з цим збільшується ефективна пористість породи і як наслідок цього підвищується водонепроникність (у суглинках в 10-12 разів, а в глинах до 100 разів). Спостереження показують, що при електроосмосі розвиваються явища електрофорезу, тобто рух від'ємно заряджених глинистих і колоїдних часток до анода, та інші фізико-хімічні процеси. Так, наприклад, при переміщенні води від анода до катода переносяться й розчинені в ній різні іони. В результаті цього в катодній зоні спостерігається виділення й накопичення важкорозчинних солей, які ущільнюють і цементують породу. Таке закріплення породи поступово поширюється від катода до анода. Досліди показують, що всі ці процеси незворотні, порода зберігає надані їй властивості і після припинення дії постійного електричного струму.

*Електрохімічне закріплення.* Воно також ґрунтується на використанні явища електроосмосу. Через спеціальні свердловини-ін'єктори в анодній зоні вводяться розчини різних солей, рідкого скла або полімерних сполук. Подається струм. Розчини поширюються внаслідок різниці потенціалів електричного струму від анода (+) до катода (-). При взаємодії їх із породою, а також завдяки розвитку обмінних і електролітичних процесів і осушення, відбувається ущільнення і цементація порід, підвищуються їхня міцність, водостійкість і стійкість.

*Термічне закріплення.* Цей метод застосовується для закріплення лесових порід і усунення в них просадних властивостей. Основою його є термічна обробка – обпалювання порід. Перший спосіб: у пробурену свердловину нагнітають повітря, розжарене до 600-800°C у спеціальних агрегатах. Другий спосіб: здійснюють спалювання горючої суміші (газу, солярки, нафти тощо) безпосередньо у свердловині. Цей спосіб вважається більш простим і економічно вигідним.

Практика показує, що зона обпаленої породи поширюється в радіусі 1,0-1,2 м від свердловини. «Стовпи» обпаленої породи можуть зливатися між собою або існувати окремо.

#### Запитання для самоконтролю.

1. На покращання яких властивостей спрямовані вказані методи?
2. В чому полягає метод бітумізації порід?

3. Поясніть механізм дії методу глинизації на породи.
4. Для чого може використовуватися штучне заморожування порід?
5. Як здійснюється електроосмотичне осушення порід?
6. Якими способами виконується термічне закріплення порід?

**Список рекомендованої спеціальної літератури**

1. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. – Л.: Недра, 1984. – 511 с.
2. Сергеев Е.М. Инженерная геология. – М.: Изд-во МГУ, 1978.– 384 с.
3. Грунтоведение. Под ред. акад. Е.М.Сергеева. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 392 с.