Дисциплина «Механика горных пород»
для студентов ОП 6В07202 "Горное дело"

Лекция 7. Крепление горных выработок: типы, расчет параметров, выбор по классификациям

Цель лекции: Изучить основные типы крепи горных выработок, принципы их работы и области применения; освоить методики расчёта параметров анкерной крепи, набрызг-бетона и рамных конструкций; научиться выбирать тип и параметры крепи на основе рейтинговых классификаций (RMR, Q) и расчётных нагрузок; ознакомиться с современными технологиями крепления и мониторинга.

План лекции:

1) Назначение крепи и виды: анкерная, набрызг-бетон (торкрет), рамная (металлическая, железобетонная), комбинированная.

2) Анкерная крепь: типы анкеров (клиновые, распорные, канатные), несущая способность, длина, шаг установки, плотность.

3) Набрызг-бетон: толщина, армирование (сетка, фиброволокно).

4) Выбор типа и параметров крепи по рейтинговым классификациям (RMR, Q-system) и расчетным нагрузкам.

5) Современные технологии: податливая крепь, крепь из композитных материалов, системы мониторинга нагрузки.

1. Назначение крепи и виды крепления

Крепь горных выработок – искусственное сооружение, предназначенное для сохранения устойчивости выработки, предотвращения обрушения пород и обеспечения безопасных условий труда.

Основные функции крепи:

- воспринимать нагрузки от горного давления (вертикального и горизонтального);
- ограничивать деформации (сходимость) контура выработки в допустимых пределах;
- предотвращать вывалы отслоившихся блоков и кусков породы;
- обеспечивать длительную сохранность выработки на весь срок службы.

Классификация крепи по материалу и конструкции:

1.1. Анкерная крепь

Стальные, полимерные или углепластиковые стержни (анкеры), устанавливаемые в шпуры и закрепляемые в массиве. Создаёт подвеску и упрочнение приконтурной зоны. Применяется в скальных и полускальных породах.

1.2. Набрызг-бетон (торкрет)

Цементно-песчаная смесь, наносимая пневматическим способом на поверхность выработки. Образует тонкую (50–200 мм) оболочку, воспринимающую растягивающие напряжения и предотвращающую выветривание пород.

1.3. Рамная крепь

Металлическая (двутавровые балки, спецпрофили) или железобетонная рама, устанавливаемая с шагом 0,5–1,5 м. Применяется в слабых, неустойчивых породах (глины, уголь, сильнотрещиноватые породы). Бывает жёсткой (чугунные тюбинги) и податливой (с возможностью деформации).

1.4. Комбинированная крепь

Сочетание нескольких типов (анкеры + набрызг-бетон, анкеры + рамы). Наиболее эффективна для сложных горно-геологических условий.

2. Анкерная крепь: типы, расчёт параметров

2.1. Типы анкеров

- Клиновые (механические): закрепляются за счёт расклинивания стального клина в шпуре. Просты в монтаже, но чувствительны к вибрациям. Используются во временных выработках.
- Распорные (гидравлические или кулачковые): распорный элемент прижимается к стенкам шпура. Не требуют длительной выдержки.
- Канатные (сталеполимерные): из стальных канатов, заполненных цементным или полимерным раствором. Работают на растяжение. Применяются в зонах тектонических нарушений.
- Цементные (инъекционные): простой стержень, залитый цементным раствором. Самый надёжный вид для постоянной крепи (в шахтах, тоннелях).

2.2. Несущая способность

Несущая способность анкера определяется:

- прочностью стержня на разрыв (R_a, кН);
- прочностью закрепления в шпуре (сцепление с цементным камнем или трение);
- прочностью породы в зоне анкеровки.

Для простых расчётов несущая способность стального анкера диаметром d и временным сопротивлением σ_T:

$$P_a = \frac{\pi d^2}{4}\sigma_T(\text{кН})$$

Реальная несущая способность с учётом условий в шпуре принимается по паспорту крепления (обычно 100–300 кН для анкеров диаметром 20–25 мм).

2.3. Длина анкеров

Длина анкера должна перекрывать зону неупругих деформаций (ЗНД) и заглубляться в устойчивый массив на 0,5–1,0 м. Минимальная длина:

$$L = h_{\text{ЗНД}} + l_{\text{заглуб}}$$

Для предварительных оценок длину принимают:

- в слабых породах: 2,5–3,0 м;
- в средних: 2,0–2,5 м;
- в крепких: 1,5–2,0 м.

2.4. Шаг и плотность установки

Шаг анкеров (расстояние между ними в ряду и между рядами) назначают из условия, чтобы каждый анкер воспринимал нагрузку с площади $S = \text{шаг}^2$ (для квадратной сетки). Плотность (количество анкеров на 1 м²) обычно 0,5–2,0 шт/м².

Рекомендации по длине и шагу по рейтинговым классификациям:

RMR	Длина анкера, м	Шаг, м	Примечание
I–II (81–100)	1,5–2,0	2,5–3,0	локальные анкеры
III (61–80)	2,0–2,5	2,0–2,5	систематические
IV (41–60)	2,5–3,5	1,5–2,0	усиленная крепь
V (< 40)	3,5–5,0	1,0–1,5	специальные меры

3. Набрызг-бетон (торкрет)

Набрызг-бетон – бетонная смесь, наносимая на поверхность выработки под давлением сжатого воздуха. Образует тонкую, прочную и водонепроницаемую оболочку.

3.1. Толщина набрызг-бетона

Толщина зависит от класса породы и пролёта выработки:

- Временная крепь (до 1 года): 50–100 мм.
- Постоянная крепь: 100–200 мм.
- В особо сложных условиях (большие пролёты, тектонические нарушения): до 300 мм.

По эмпирическим номограммам (например, по Q-system) для тоннелей рекомендуют:

- Q > 10 → без набрызг-бетона или 50 мм.
- Q = 1–10 → 100–150 мм.
- Q < 1 → 150–300 мм + арки.

3.2. Армирование

- Сварная сетка: из проволоки диаметром 4–6 мм, ячейка 100–150 мм. Повышает прочность на изгиб и предотвращает растрескивание.
- Фиброволокно (стальное или синтетическое): добавляется в бетонную смесь (0,5–1,5% от массы). Улучшает трещиностойкость, ударную вязкость, упрощает нанесение (не требует сетки).

Расчёт набрызг-бетона при действии равномерного давления p (МПа) на оболочку толщиной t(м) по формуле для цилиндрической оболочки (приближённо):

$$\sigma_{\text{бет}} = \frac{p \cdot R}{t} \leq f_{cd}$$

где R – радиус выработки (пролёт/2), f_{cd} – расчётное сопротивление бетона сжатию (обычно 10–20 МПа для набрызг-бетона).

4. Рамная крепь

Применяется в слабых породах, где анкерная и торкрет-крепи недостаточны.

- Металлическая рамная крепь из спецпрофиля (СВП – спецвременный профиль, двутавр, швеллер). Ставят податливые рамы (с возможностью смещения в замках) для разгрузки при растущем давлении. Шаг 0,5–1,0 м.
- Железобетонная рамная крепь – для капитальных выработок с большим сроком службы (стволы, околоствольные дворы). Высокая жёсткость, но не податлива.

Расчёт рамной крепи ведётся по методам строительной механики (расчёт статически неопределимой рамы) с учётом горного давления P. В инженерной практике используют типовые сечения с известной несущей способностью.

5. Выбор типа и параметров крепи по рейтинговым классификациям

5.1. По RMR (Bieniawski)

После определения класса массива (I–V) выбирают крепь согласно таблице (см. лекцию 3). Пример:

RMR	Класс	Крепь (пролёт 5–10 м)
81–100	I	Без крепи или локальные анкеры
61–80	II	Анкеры 2,5 м, шаг 2,5 м; торкрет 50 мм
41–60	III	Анкеры 3–4 м, шаг 1,5–2 м; торкрет 100–150 мм + сетка
21–40	IV	Анкеры 4–5 м, шаг 1–1,5 м; торкрет 150 мм, лёгкие арки
< 20	V	Тяжёлые арки, опережающая крепь, заиливание

5.2. По Q-системе (Barton)

Вычисляется показатель Q, затем для заданного эквивалентного пролета B по номограммам определяются тип и параметры крепи. Обобщённые рекомендации:

Q	Крепь
> 40	Без крепи
10–40	Анкеры длиной 2–2,5 м, торкрет 50 мм
4–10	Анкеры 2,5–3 м, торкрет 100–150 мм
1–4	Анкеры 3–4 м, торкрет 150–200 мм + сетка
0,1–1	Тяжёлая рамная крепь, опережающие анкеры

6. Современные технологии крепления

6.1. Податливая крепь

Используется в породах с ползучестью (соль, глины) и при горных ударах. Конструктивные решения:

- Рамы с фрикционными «скользящими» узлами (СП – скользящий податливый узел);
- Специальные анкеры с демпфирующими элементами (канатные анкеры с муфтами скольжения).

6.2. Композитные материалы

- Стеклопластиковые анкеры – не подвержены коррозии, высокая прочность на растяжение (до 1000 МПа). Хороши для углеразрезов, где искрообразование недопустимо.
- Углепластиковые анкеры – ещё более прочные, но дорогие.
- Фибробетон с полимерными волокнами для набрызга.

6.3. Системы мониторинга нагрузки

- Динамометры (тензометрические датчики) на анкерах – контроль усилий.
- Измерители конвергенции (экстензометры, шкалы с марками) – контроль смещений.
- Автоматизированные системы (цифровые датчики, передача данных на пульт) – для опасных объектов.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие основные типы крепи используются в горных выработках? В каких породах предпочтительна анкерная крепь, в каких – рамная?
2. Как определяются длина и шаг установки анкерной крепи? Что такое несущая способность анкера и от каких факторов она зависит?
3. Какие требования предъявляются к набрызг-бетону? Как влияет армирование (сетка, фиброволокно) на его эксплуатационные свойства?
4. По какой классификации (RMR или Q) и как выбирают тип и параметры крепи? Приведите пример для массива с RMR = 45 (класс IV).

5. Что такое податливая крепь и для каких условий она предназначена? Назовите современные композитные материалы для анкеров.

Рекомендуемая литература:

1. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications. – Wiley, 1989.
2. Barton N. et al. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mech. – 1974.
3. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – IMM, 1980.
4. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – Springer, 2004.
5. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: МГГУ, 2008.
6. Рекомендации по проектированию и креплению горных выработок (ВНИМИ).