

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОДАТЛИВОЙ ТРЕХЗВЕНЬЕВОЙ КРЕПИ ДЛЯ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

Е. Э. Ярош, старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

**Аннотация.** Приводится обоснование использования сборной блочной крепи тоннелей и горных выработок, обладающей конструктивной податливостью. Ограниченно-податливый режим сборной крепи обеспечивается путем установки между сборными элементами сминающихся прокладок заданной толщины. Предложена методика расчета крепей на устойчивость. В данной статье представлено обоснование использования податливой трехзвеневой крепи для перегонных тоннелей метрополитена. Рассматривается применение сборной блочной крепи, обладающей конструктивной податливостью, в тоннелестроении и горных выработках. Ограниченно-податливый режим сборной крепи достигается путем установки специальных сминающихся прокладок заданной толщины между сборными элементами. Такой подход позволяет обеспечить необходимую устойчивость и безопасность тоннеля. В статье также предлагается методика расчета податливой трехзвеневой крепи для оценки ее устойчивости. Это исследование имеет важное практическое значение для инженеров и проектировщиков, занимающихся разработкой и строительством метрополитена, позволяя улучшить технические характеристики и надежность подземных сооружений.

**Ключевые слова:** крепь тоннелей, жесткий режим работы крепи, податливый режим работы крепи, пластичский шарнир, скользящий шарнир, сборная крепь, монолитная крепь, подработка, грузонесущая способность крепи, забутовка закрепного пространства.



Ярош  
Елена Эдуардовна

Известно, что метрополитен представляет собой сеть различных подземных сооружений, основной объем строительно-монтажных работ и протяженность выработок приходится на перегонные тоннели. Обделки (или крепи) этих выработок представляют собой либо бетонные, либо железобетонные, либо побенговые (железобетонные или металлические). Все эти крепи относятся к так называемым «жестким конструкциям», т.е. их несущая способность должна соответствовать величине горного давления с учетом региональных условий, в соответствии коэффициента запаса. Учитывая, что часть перегонных тоннелей проходят либо в грунтовых массивах со слабыми строительными характеристиками грунтов (Харьковский метрополитен), либо в обводненных грунтах (Днепропетровский метрополитен), либо на достаточных глубинах (станция Киевского метрополитена «Арсенальная» — глубина заложения выработок 105,5 м), крепи этих выработок должны иметь высокую несущую способность (более 200 кН, м<sup>2</sup>). Особенность Донецкого метрополитена объясняется тем, что территория г. Донецка (центральная часть города) относится к IV группе подработки. При этом в горном массиве до глубины 500-700 м происходит вялотекущее уплотнение. Кроме того, уплотнение в некоторых местах может быть неравномерным из-за оставленных при отработке ряда плит угольных пластов целиков или бутовых полос. Это приведет к неравномерному смещению контура выработки, причем расчетные нагрузки будут превышать величину  $\gamma H$  ( $\gamma$  — осредненный удельный вес пород горного массива;  $H$  — глубина заложения выработки). Кроме того, наибольшее смещение горных пород будет в арочной части выработки. Следует учесть, что в выработках даже при небольшой глубине (более 30 м) смещение контура будет неравномерным: самое большое — в сводовой части выработки (за счет расслоения слоистых осадочных горных пород), при чем наибольшая составляющая этого смещения, а значит и нагрузка на крепь, будет зависеть от угла падения горных слоев; меньшее — на вертикальные элементы конструкции крепи (за счет разрушения горных пород типа «дилатансия»).

Дилатантность горных пород — это их свойство изменять свой объем и форму при механическом воздействии, особенно под действием сжатия. Дилатантность является одной из основных механических характеристик горных пород и имеет

важное значение в инженерной геологии и горном деле. Когда горные породы подвергаются сжатию, они обычно сопротивляются сжатию, изменяя свою форму и объем. Некоторые породы проявляют сжимаемость, при которой они сокращаются в объеме, а другие породы проявляют дилатантность, при которой они увеличиваются в объеме.

Механизм дилатантности связан с внутренними свойствами горных пород и их структурой. Когда породы подвергаются сжатию, между гранями породы возникают внутренние трещины или пористость увеличивается. В результате этого процесса объем породы увеличивается, что приводит к дилатантному поведению.

Дилатантность горных пород имеет практическое значение в различных отраслях, включая горную промышленность, строительство подземных сооружений и геотехническую инженерию. При планировании и строительстве тоннелей, шахт, скважин и других подземных сооружений необходимо учитывать дилатантность горных пород, так как она может влиять на стабильность и безопасность сооружений.

Для измерения дилатантности горных пород используются различные методы, включая лабораторные испытания на образцах пород и наблюдения в полевых условиях. Инженерные геологи и геотехнические инженеры проводят детальные исследования дилатантности горных пород, чтобы определить их механические свойства и принять соответствующие меры для обеспечения безопасности и стабильности сооружений. Кроме изменения объема и формы при сжатии, дилатантность горных пород также может проявляться при других типах механического воздействия, таких как растяжение, изгиб и кручение. В каждом случае дилатантность проявляется как увеличение объема материала при приложении напряжений. Дилатантность горных пород может быть связана с различными факторами, включая их минеральный состав, структуру, пористость и водонасыщенность. Некоторые породы, такие как песчаники и гравелиты, обычно проявляют высокую дилатантность из-за наличия частиц с промежутками между ними, что позволяет им перемещаться и изменять свою форму. Другие породы, такие как аргиллиты и глины, могут проявлять дилатантность из-за своей структуры и наличия глинистых минералов, которые могут расширяться при воздействии напряжений.

Важно отметить, что дилатантность может влиять на различные инженерные аспекты. Например, при проектировании и строительстве подземных сооружений, таких как тоннели или шахты, дилатантность горных пород может привести к увеличению деформаций и трещин вокруг сооружения. Это может потенциально повлиять на его стабильность и безопасность. Поэтому инженеры должны учитывать дилатантность горных пород при разработке соответствующих стратегий и методов укрепления и поддержания стабильности подземных сооружений. Для более точного измерения дилатантности горных пород проводятся лабораторные испытания, такие как испытания на компрессионную дилатометрию или испытания на трехосное сжатие. Эти методы позволяют оценить изменение объема и формы породы

при различных условиях нагрузки. Кроме того, при полевых исследованиях могут быть использованы геофизические методы и инструменты, такие как георадар или активные сейсмические исследования, для оценки дилатантности горных пород в естественных условиях. В целом, понимание дилатантности горных пород является важным аспектом инженерной геологии и геотехнического проектирования. Оно помогает инженерам принимать правильные решения при планировании и строительстве сооружений, чтобы обеспечить их безопасность и стабильность в условиях, где дилатантные породы присутствуют.

Учитывая изложенное, следует отметить, что содержание выработок Донецкого метрополитена в эксплуатационном состоянии требует особых подходов при выборе типа крепи. При этом крепь должна быть податливой в вертикальном направлении и дешевле, чем мощные жесткие крепи. К таким крепям относятся металлические арочные трехзвеньевые крепи, которые в больших объемах применяются в Донбассе. К тому же в этом регионе имеется достаточная производственная база для изготовления.

В конструктивном плане эта крепь представляет собой сооружение из трех элементов: верхняк (несущая конструкция, т.к. на нее приходится наибольшая нагрузка) и две стойки, на которые опирается верхняк. Оба нижних конца верхняка и верхние концы стоек соединяются внахлестку и закрепляются.

Применение податливых крепей целесообразно для строительства выработок метрополитена в сложных инженерно-геологических условиях. Согласно классификации [1] к сложным инженерно-геологическим условиям относятся подрабатываемые территории, что наиболее характерно для Донбасса и, в частности, для г. Донецка. При строительстве любых зданий или сооружений в Донбассе необходимо учитывать, что горный массив во многих районах был подработан горными выработками или подрабатывается в настоящее время. Поэтому маркшейдерские службы, при оценке горно-геологических условий, определяют категорию подработки от I до IV (или от Iк до IVк для крутопадающих угольных пластов).

Горный массив под г. Донецком подработан практически полностью и представляет собой медленно (и неравномерно по площади) уплотняющиеся растресканные горные породы. Поэтому горно-геологические условия приравниваются к IV категории [2].

Метрополитен, вне зависимости от того является ли он подземным, неглубокого заложения или надземным, имеет сеть выработок: перегонные тоннели, станции метро, депо, ремонтные станции и другие. При строительстве этих сооружений необходимо разрабатывать соответствующие мероприятия по их защите от вредного влияния подработки, т.е. учитывать горизонтальные, вертикальные деформации и крен. Для подземных тоннелей, проходимых в пределах г. Донецка необходимо также учитывать горное давление, которое нагружает обделку (крепь) выработок. Причем наибольшие нагрузки будет испытывать сводчатая часть обделки. Величина этой нагрузки определяется весом горных пород в пределах свода обрушения (по Протодьяконову), ширина

которого на уровне свода обделки должна определяться с учетом углов откоса и высоты выработок. Расчеты показали, что равномерно распределенная нагрузка в основании свода обрушения колеблется в пределах 600–800 кН/м<sup>2</sup>. Чтобы противостоять таким нагрузкам, жесткие крепи (тубинги или монолитные железобетонные крепи) должны быть мощными. Более экономичными являются сборные крепи.

Это объясняется тем, что крепи, работающие в жестком режиме, в силу своих конструктивных особенностей, должны противодействовать деформациям приконтурной части массива, воспринимая при этом максимальные нагрузки. Податливые крепи, наоборот, создают условия для частичной деформации горных пород, снижая нагрузку и способствуя созданию системы «горные породы-крепь».

При расчете параметров жестких крепей необходимо решить осесимметричную геомеханическую задачу, после решения которой определяется нагрузка, в соответствии с которой подбираются элементы обделки с требуемыми прочностными характеристиками (главным образом элементы, соединяющие блоки) [3].

При расчете металлических сборных крепей, для того, чтобы они работали в податливом режиме, необходимо либо создать благоприятные условия работы верхняка [4], либо разработать конструкцию крепи (соотношение радиуса верхняка и радиуса закругления верхней части стойки), чтобы нормальная сила (N) в узле податливости (нахлестка верхняка и стойки) была больше сопротивления сил трения в скользящем шарнире [5].

При расчете блочных крепей необходимо обеспечить ограничено-податливый режим работы, который обеспечивается как за счет установки между блоками сжимающих прокладок, так и за счет изменения конфигурации крепи, это возможно при наличии шарнирного соединения отдельных блоков. Однако при этом необходимо решить задачу по определению максимально возможной величины податливости крепи до выхода нескольких блоков (не более трех) в сводчатой части, когда между нейтральными осями блоков будет прямая линия, так как при этом сборная крепь может потерять устойчивость и будет разрушена.

Несмотря на повышенный интерес известных ученых к избранной проблематике, исследование работы крепей (обделок) тоннелей метрополитена в условиях осесимметричной геотехнической задачи не теряет актуальности. Эти вопросы остаются нераскрытыми сполна, что требует их дальнейшего развития.

Целью данной работы является методика определения податливости блочной многошарнирной крепи без потери устойчивости обделки.

Устойчивость сборных многошарнирных крепей зависит, в основном, от двух факторов: допустимых перемещений шарниров в процессе деформации крепи и плотности (коэффициента постели) забутовки закрепленного пространства. Допустимые перемещения шарниров или деформационная характеристика крепи зависят от геометрических размеров крепи и сборных элементов и характеризуют способ-

ность конструкции изменять свою форму под действием горного давления без потери устойчивости, без потери эксплуатационных характеристик.

Наибольшей устойчивостью обладают блочные крепи с плоским примыканием сборных элементов. Такие крепи допускают без потери устойчивости перемещения со стороны кровли до 120–240 мм и со стороны блоков – до 100–160 мм в зависимости от величины сечения. Крепи удовлетворительно выдерживают нагрузки при забутовке закрепного пространства материалом, получаемым при проходке выработки.

Расчетная схема определения стенки устойчивости блочной крепи представлена на рисунке 1 и основана на том, что конструкция теряет устойчивость при раскрытии нескольких шарниров в сводчатой части выработки.

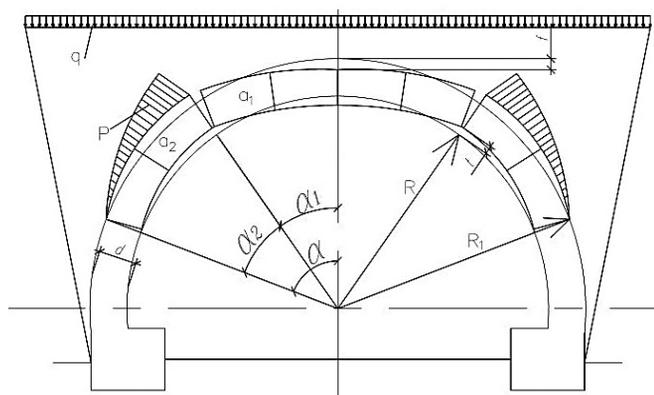


Рис. 1. Схема к расчету устойчивости блочной крепи

Грузонесущая способность крепи по такой схеме определяется по формуле:

$$q \leq \frac{2pm_2 l \cos \beta}{3a_1 \sin^2 \beta \cos \gamma} \quad (1)$$

где  $p$  – отпор забутовки, определяется из компрессионной характеристики забутовочного материала;

$l$  – размер блоков по внешней дуге;

$\beta, \gamma$  – угловые параметры крепи.

Их значения могут быть найдены из зависимости боковых перемещений контура крепи на допустимую величину.

$$t = \sqrt{[(a_1 - k\delta) \sin \beta - R \sin \alpha_1]^2 + [R - f - (a_1 - k\delta) \cos \beta - R \cos \alpha_1]^2} \quad (2)$$

$$f = R_1(1 - \cos \alpha) - (a_1 - k\delta) \cos \beta - \sqrt{a_2^2 - [R_1 \sin \alpha - (a_1 - k\delta) \sin \beta]^2} \quad (3)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{[R_1 \sin \alpha - a_1 \sin \beta]}{a_2} \quad (4)$$

где  $t, f$  – боковые и вертикальные перемещения крепи;

$R, R_1$  – соответственно радиусы крепи в свету и в черне;

$\delta, k$  – суммарная толщина и коэффициент податливости прокладок;

$a, a_1, a_2$  – линейные параметры верхней и боковой секции блоков, определяемые по зависимостям.

$$a_1 = \sqrt{R_1^2 + R^2 - 2R_1 \cdot \cos \alpha_1} \quad (5)$$

$$a_2 = \sqrt{R_1^2 + R^2 - 2R_1 \cdot \cos \alpha_2} \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – центральные углы секций крепи.

Значение угла  $\beta$  в зависимостях (2) и (3) в процессе работы сборной крепи изменяется в пределах  $\beta_0 \leq \beta \leq 90^\circ$ , поэтому при расчете допустимой на крепь нагрузки по формуле (1) углы  $\beta$  и  $\gamma$  должны быть приняты с учетом их соответствия боковому перемещению крепи на допустимую величину  $[t] \leq 0.5t_{\text{макс}}$ . Максимально возможные перемещения контура крепи имеют место при  $\beta = 90^\circ$ . Минимальное значение угла  $\beta$  определяется из выражения:

$$\beta_0 = \arccos \frac{1}{2} \left( \frac{R_1}{a_1} + \frac{a_1}{R_1} - \frac{R^2}{R_1 \cdot a_1} \right) \quad (7)$$

Количество блоков в секциях, необходимое для определения центральных углов секций  $a, a_1, a_2$ , находим по формуле:

$$\beta_0 = \frac{2}{\varphi} \arccos \frac{R}{R+d} \quad (8)$$

где  $\varphi$  – центральный угол блока;  
 $d$  – толщина блока.

Если количество блоков, найденное по формуле (8), окажется нечетным, то их число в верхней и боковой секциях крепи будет равно:

$$m_1 = 0.5(m-1) \quad (9)$$

$$m_2 = 0.5(m+1) \quad (10)$$

При четном количестве блоков, найденном по формуле (8)

$$m_1 = m_2 = 0.5m \quad (11)$$

Зная количество блоков в секциях  $m_1$  и  $m_2$  можно легко определить центральные углы секций:

$$\alpha_1 = m_1 \varphi \quad (12)$$

$$\alpha_2 = m_2 \varphi \quad (13)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (14)$$

Если нагрузка на крепь известна, то характеристика забутовки (коэффициент постели), необходимая для обеспечения нормальной работы крепи в устойчивом режиме, определяется по формуле:

$$k \geq \frac{3qa_1 \sin^2 \beta \cos \gamma}{2m_2 f [t] \cos \beta} \quad (15)$$

где  $[t]$  – допустимые перемещения боковых шарниров крепи.

## ВЫВОДЫ

1. В сложных инженерно-геологических условиях (подрабатываемые территории, грунтовые массивы, сложенные слабыми или сильносжимаемыми грунтами) при проходке различных тоннелей возможны значительные смещения грунтов, которые могут привести к деформациям крепи и нарушению эксплуатационного состояния выработки.

2. Применение крепей, работающих в сложных инженерно-геологических условиях, неэффективно, т.к. они должны обладать высокой грузонесущей способностью, что приводит к их удорожанию.

3. Податливые крепи в этих условиях менее материалоемкие.

4. К податливым крепям относятся блочные сборные железобетонные крепи или металлические шахтные крепи.

## Список литературы

1. ДБН В.1.1-5-2000. Дома и сооружения на подрабатываемых территориях и проседающих грунтах / часть 2. дома и сооружения на проседающих грунтах / Госстрой Украины. – Киев. – 2000. – 67 с.
2. Лысиков, Б. А. и др. Строительство метрополитена и подземных сооружений на подрабатываемых территориях. – Донецк: ООО «Норд-компьютер», 2003. – 300 с.
3. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: «Недра», 1989. – 270 с.
4. Дружко, Е. Б. Расчет сборной блочной крепи тоннелей и горных выработок на устойчивость / Дружко Е. Б., Фролов Э. К., Оглоблин В. Ф. // - Строительство, реконструкция и эксплуатация конструкций и сооружений железнодорожного транспорта. – Донецк: ДонИЖТ, 2011. – С. 134-136.
5. Извещение КЭП 2-96 «Об изменении технических условий ТУ 390.2070792.001-88 Крепи электрические податливые. КЭП.10.09.1996». – Макеевка: ДонГАСА, 1996. – 5 с.
6. Шумовский, В. П. О некоторых новых решениях защиты зданий от неравномерных осадок оснований. – В кн.: Фундаменты и подземные сооружения. Киев: Вища школа. – С. 78-85.
7. Рекомендации по защите эксплуатируемых жилых и гражданских кирпичных и крупноблочных зданий на подрабатываемых территориях. – Изд. Донец, Промстройинипроекта Госстроя СССР. Донецк, 1976. – 141 с.
8. Рекомендации по расчету многократно подрабатываемых зданий и сооружений на воздействие деформаций земной поверхности с учетом реологических свойств грунтов основания. – Изд. Донец, Промстройинипроекта Госстроя СССР. Донецк, 1977. – 141 с.
9. Временные рекомендации по проектированию зданий повышенной этажности на подрабатываемых территориях в Донецком угольном бассейне. Киев: Будівельник, 1969. – 141 с.