

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

В. Э. КОТЛЯРЕВСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОШАРНИРНЫХ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ
КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ
В ВЕСОМОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

(05.481. Основания, фундаменты и подземные сооружения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1970

НТБ
ДНУЖТ

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В. Э. КОТЛЯРЕВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
МНОГОШАРНИРНЫХ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ
КРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ
В ВЕСОМОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

(05.481. Основания, фундаменты и подземные сооружения)

А в т о р е ф е р а т
диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1970

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научные руководители:

Доктор технических наук, профессор М. Н. Гольдштейн.
Кандидат технических наук, доцент В. А. Мизюмский.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор М. И. Розовский.
Кандидат технических наук, ст. научный сотрудник О. Ю. Антонов.

Ведущая организация — Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений.

Автореферат разослан

1970 г.

Защита диссертации состоится

в ноябре

1970 г.

на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 10, Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв просим направлять в двух экземплярах по адресу:

г. Днепропетровск, 10, Университетская, 2, Днепропетровский институт инженеров железнодорожного транспорта.

Ученый секретарь совета Б. М. Климовский.

НТБ
ДНУЖТ

Совершенствование конструкций обделок подземных сооружений, уменьшение расхода металла и других материалов, снижение стоимости и индустриализация строительства являются важными народнохозяйственными задачами, решение которых невозможно без развития методов расчета подземных конструкций в направлении максимального приближения расчетных схем к реальным условиям работы конструкций в массиве горных пород.

Основными конструктивными элементами для сооружения обделок тоннелей в СССР в последние годы стали сборные железобетонные блоки и тюбинги. По опубликованным данным в период с 1955 по 1962 г. тоннели из сборного железобетона составили 80% общей их протяженности. Замена чугунных тюбингов элементами из железобетона только по Ленинградскому метрополитену позволила получить экономию в металле до 85% и снизить стоимость строительства до 30%.

Из всего многообразия существующих конструкций сборных железобетонных обделок широкое распространение получают обделки из гладких блоков с сопряжением в продольных стыках по цилиндрическим поверхностям разных радиусов. При наличии сжимающей нормальной силы такой стык работает как шарнирное соединение. Экспериментальные исследования, проведенные на стенде ЦНИИС Минтрансстроя, показали высокую несущую способность и трещиностойкость обделки этого типа в отличие от обделок из железобетонных тюбингов с болтовыми соединениями и железобетонных блоков с плоскими стыками.

При сборке обделки с цилиндрическими стыками без перевязки швов, когда количество блоков в кольце больше четырех, образуется многошарнирная геометрически изменяемая система, напряженное состояние которой существенно отличается от напряженного состояния других типов обделок (как монолитных, так и сборных).

К указанному типу относятся: унифицированная обделка ЦНИИС для тоннелей метрополитенов; типовые конструкции обделок, разработанные ЦНИИПодземшахтостроем; обделка сооруженного в Киеве коллекторного тоннеля, напрягаемая распором в породе; обделки железнодорожных тоннелей и коллекторов, построенных в последние годы в Англии; кольцевая шарнирная временная крепь, применяемая в шахтном строительстве, и другие.

Широкое применение многошарнирных тоннельных обделок выдвинуло ряд проблем, связанных с исследованием напряженно-деформированного состояния геометрически изменяемых систем в массиве горных пород.

В настоящей работе проведено исследование напряженно-го состояния и устойчивости многошарнирных тоннельных обделок кругового очертания в весовой реологической среде.

Первая глава посвящена анализу существующих методов расчета и выбору расчетной схемы, которая была бы наилучшим приближением к реальным условиям взаимодействия обделки с массивом горных пород, обоснованию граничных условий на внешнем контуре обделки и метода решения поставленной задачи.

Результаты многочисленных наблюдений свидетельствуют о том, что реологические свойства присущи всем без исключения горным породам, включая скальные. На этом основании для аналитических исследований процессов, происходящих при взаимодействии подземных конструкций с массивом горных пород, принят аппарат теории наследственности.

Для установления граничных условий на внешнем контуре обделки проведен анализ имеющихся данных натурных наблюдений. Непосредственные измерения величины и направления равнодействующих горного давления (работа А. М. Басовской в сб. «Вопросы горного давления», вып. 13, изд. СО АН СССР, 1962), ряд экспериментально-теоретических работ (см. В. А. Лыткин и А. Н. Драновский, «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1965, № 1) свидетельствуют о наличии касательных напряжений на контуре сопряжения обделки с массивом пород. Подтверждением этому являются результаты измерений Б. Н. Виноградова (сб. статей ЦНИИС, № 31, М., 1959) и др., показавшие, что экспериментальные эпюры нормального контактного давления не уравновешены относительно горизонтального диаметра обделки.

Осуществляемое, как правило, нагнетание тампонажного раствора в заобделочное пространство, неровности оконтури-

вания выработки и шероховатость наружной поверхности железобетонных блоков при значительном нормальном давлении на обделку способствуют реализации сцепления внешнего контура обделки с массивом окружающих пород, что и принято в качестве граничного условия при решении контактной задачи.

Во второй главе проведено исследование наиболее общих закономерностей, присущих геометрически изменяемым системам, путем определения напряженного состояния мног шарнирных обделок в линейно податливой среде.

Рассмотрено влияние касательных напряжений на внешнем контуре обделки и «зоны отлипания» на части контура на величину и распределение усилий в сечениях. Полученные эпюры изгибающих моментов в случае принятия тех или иных допущений остаются качественно подобными, но существенно изменяются по величине (почти в 3 раза).

Анализ влияния количества блоков в кольце на напряженное состояние обделки показал, что с уменьшением угловых размеров блоков изгибающие моменты убывают по гиперболическому закону. Этот вывод находится в удовлетворительном соответствии с результатами экспериментально-теоретических исследований статической работы мног шарнирных сводов, проведенных О. Ю. Антоновым («Транспортное строительство», 1964, № 7).

При определении напряженного состояния обделки на основе механики сплошной среды существенную роль играет метод решения. Особенности деформированного состояния геометрически изменяемых обделок позволяют сделать вывод, что в основу решения контактных задач для этого типа обделок может быть положена вторая основная задача теории упругости.

Частное решение второй основной задачи теории упругости для невесомой бесконечной плоскости с круговым отверстием найдено в третьей главе. Граничные условия на контуре отверстия представлены в виде разложений радиальных и тангенциальных смещений контура L в тригонометрический ряд. Полученное методом Н. И. Мусхелишвили решение позволяет определить напряженное состояние бесконечной плоскости при заданных смещениях кругового контура и известном главном векторе усилий, приложенных к контуру L .

Приведен пример, который одновременно может служить достаточным подтверждением справедливости найденного решения. Для этой цели в качестве граничных условий исполь-

зованы формулы, определяющие смещения кругового контура, полученные С. А. Орловым («Исследования по теории сооружений», вып. 8, Госстройиздат, 1959) при решении задачи о напряженно-деформированном состоянии полубесконечной весомой упругой плоскости с круговым отверстием. Найденное по этим смещениям напряженное состояние совпадает с исходным, приведенным в работе С. А. Орлова.

В четвертой главе исследовано напряженное состояние многошарнирной обделки в весомом упругом массиве в условиях плоской деформации.

Решение найдено в предположении, что диск радиуса g , удаляемый из полуплоскости, мгновенно заменяется подкреплением в виде многошарнирного кольца, имеющего в недеформированном состоянии круговое очертание того же наружного радиуса g . Искомое напряженное состояние Ω весомой упругой полуплоскости, подкрепленной многошарнирным кольцом, представлено в виде суммы полей напряжений Ω_1 и Ω_2 , причем поле Ω_1 выражает напряженное состояние весомой полуплоскости при недеформированном контуре отверстия и, следовательно, соответствует природному состоянию массива. Тогда дополнительное поле Ω_2 выражает напряженное состояние в невесомой полуплоскости, вызванное смещениями контура L . При глубине заложения отверстия $h > 4g$ полуплоскость может быть заменена бесконечной плоскостью с круговым вырезом, т. к. на основании принципа Сен-Венана возмущение однородного поля быстро убывает по мере удаления от источника возмущения. В этом случае поле Ω_2 может быть найдено на основе решения второй основной задачи, полученного в третьей главе, для чего необходимо определить смещения контура L . Последние, при наличии сцепления обделки с окружающим массивом, определяются смещениями внешнего контура многошарнирного кольца.

В обделках рассматриваемого типа собственными деформациями блоков можно пренебречь по сравнению со смещениями контура как многошарнирной замкнутой цепи с жесткими звеньями. В дальнейшем показано, что такое допущение не вносит существенной погрешности, если модуль упругости породы значительно меньше модуля упругости материала обделки (что соблюдается для всех горных пород, исключая крепкие скальные).

Тогда смещения произвольной точки контура L , вызванные формоизменением многошарнирной обделки (смещение последней как жесткого целого можно не рассматривать,

т. к. оно не влияет на напряженное состояние), определяются кусочно-гладкими функциями параметров формоизменения b_n , количество которых n равно числу степеней свободы формоизменения мног шарнирного кольца. В качестве параметров b_n приняты радиальные смещения шарниров, в которых должны быть поставлены дополнительные связи, лишаящие систему геометрической изменяемости.

Найденное таким путем напряженное состояние Ω_2 содержит параметры b_n , численные значения которых подлежат определению.

Для нахождения параметров и усилий в сечениях обделки использован прием, предложенный С. А. Орловым при определении напряженного состояния сплошного кольца в упругом массиве (ссылку см. выше). Суть его заключается в том, что напряженное состояние массива определяется методами механики сплошной среды, в то время как усилия в обделке находятся методами строительной механики. Такой подход обеспечивает определенные преимущества перед обычно применяемыми методами решения контактных задач, так как позволяет определять без особых трудностей напряженное состояние конструкций с негладким внутренним контуром (ребристые обделки) и конструкций из неоднородного материала (железобетон).

Из рассмотрения условий статического равновесия блоков под воздействием контактного давления получено выражение, позволяющее определить параметры формоизменения b_n при известных геометрических характеристиках обделки. Найден в общем виде формулы для вычисления усилий (изгибающего момента и нормальной силы) в сечениях обделки. Быстрая сходимость указанных формул подтверждена непосредственным расчетом на ЭВМ.

Пятая глава посвящена исследованию напряженного состояния весомого упруго-наследственного массива, ослабленного выработкой кругового очертания. Ранее подобное исследование проведено М. И. Розовским (Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 12) при несколько иных предпосылках.

Результаты испытаний реологических свойств горных пород, проведенных Ж. С. Ержановым, Ф. А. Белаенко и В. Т. Глушко, М. Н. Гольдштейном, В. А. Мизюмским и другими, показали, что при нагрузках до 70-ти% от разрушающих ползучесть большинства пород следует закону, близкому к линейному. На этом основании в качестве основного уравнения состояния принято уравнение стандартного линейного уп-

руго-наследственного тела, «квазиупругопластичного» в формулировке А. Р. Ржаницына (Теория ползучести, Стройиздат 1968). Физические свойства породы приняты инвариантными во времени с экспоненциальным ядром ползучести. Для характеристики реологических свойств пород за основу принят коэффициент релаксации η , который может быть определен как отношение установившихся напряжений к начальным при испытании на простую релаксацию. Стабильность коэффициента релаксации для каждой категории пород подтверждена результатами многочисленных испытаний.

Решения поставленных задач для упруго-наследственного массива пород найдены на основании принципа Вольтерра путем применения преобразования Лапласа к соответствующим решениям теории упругости.

При рассмотрении природного напряженного состояния в упруго-наследственном массиве оказалось, что распределение напряжений в нетронутом массиве может отличаться от диниковского, удовлетворяя при этом принципу симметрии физических свойств относительно произвольно ориентированной вертикальной плоскости (П. А. Журавлев и А. Ф. Захаревич, Записки ЛГИ, т. 39, вып. 3, Л., 1961).

Найденное в пятой главе напряженное состояние и смещения неподкрепленного контура выработки использованы в главе шестой в качестве граничных условий при определении напряженного состояния геометрически изменяемых тоннельных обделок в весоом упруго-наследственном массиве.

При этом напряженное состояние Ω массива пород, окружающих обделку, представлено в виде суммы полей Ω_1 и Ω_2 , где Ω_1 — природное напряженное состояние весоого упруго-наследственного массива. Дополнительное поле Ω_2 , в свою очередь, может быть подразделено на Ω_2' и Ω_2'' из которых Ω_2' — напряженное состояние невесоого массива, вызванное мгновенными упругими смещениями неподкрепленного контура отверстия, остающимися неизменными с течением времени, а Ω_2'' — поле напряжений в невесоом массиве, вызванное формоизменением многошарнирной обделки.

Принятые начальные и граничные условия соответствуют такому состоянию массива и обделки, при котором в выработку, пройденную в упруго-наследственном массиве, обделка вставляется свободно и без зазора сразу после реализации мгновенных упругих деформаций, вызванных образованием выработки.

Дополнительное поле напряжений Ω_2 найдено на основе принципа Вольтерра и решения, приведенного в третьей главе. Полученные формулы, определяющие контактные напряжения в преобразованном по Лапласу виде, по форме не отличаются от выражений, определяющих напряжения на контуре обделки в упругой среде. Это позволило для нахождения усилий в обделке воспользоваться результатами, полученными в четвертой главе.

Особенности геометрически изменяемых систем, заключающиеся в том, что их деформативные свойства целиком определяются свойствами пород, окружающих тоннель, ставят в качестве одной из первоочередных задач исследование деформативности и устойчивости многошарнирных обделок в реологических средах. Фактор времени играет в решении этого вопроса основную роль, поскольку постоянные обделки тоннелей рассчитаны на практически неограниченный срок службы. Однако критерии устойчивости шарнирных систем в массиве, предложенные к настоящему времени, не учитывают реологических свойств пород.

Наиболее рациональным подходом к исследованию устойчивости многошарнирных обделок отличается предложение О. Ю. Антонова исходить из устойчивости элементарных трехшарнирных арок, составляющих в совокупности кольцо обделки или свод. Но в этом случае необходимо найти величины смещений контура обделки.

Для определения смещений обделки на основе полученного решения достаточно найти закон изменения во времени параметров $b_n(t)$. Условие совместности смещений всех блоков обделки позволяет представить $b_n(t)$ в виде произведения некоторых постоянных l_n , определяемых геометрией системы, и общей для всех параметров функции $f(t)$. При $t \rightarrow \infty$ эта функция вырождается в функцию $f(\eta)$, по которой можно определить, как изменяются предельные величины смещений обделки при изменении коэффициента релаксации породы, независимо от конструкции многошарнирной обделки.

Найденная функция $f(\eta)$ обнаруживает тенденцию к резкому нарастанию при $\eta < 0,2$, а при $\eta = 0$ обращается в бесконечность.

Это означает, что в неустойчивых породах ($\eta < 0,2$) можно ожидать развития значительных смещений блоков обделки, что при малых угловых размерах блоков может привести к потере устойчивости элементарных трехшарнирных арок, составляющих обделку. При $\eta \rightarrow 0$ смещения контура приобретают незатухающий характер, что можно охарактеризовать

как потерю устойчивости многошарнирной обделки в целом.

Седьмая глава посвящена исследованию особенностей напряженного состояния многшарнирных обделок, обжатых распором в породе. Напрягаемые обделки обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с обычными типами обделок. Они предотвращают значительные осадки поверхности при сооружении тоннеля, из технологического цикла исключается нагнетание тампонажного раствора, которое часто усиливает неравномерность контактных давлений и вносит существенную неопределенность в напряженное состояние обделок. Создание предварительного обжатия увеличивает нормальные силы в сечениях обделки, что способствует исключению растягивающих усилий на части контура и позволяет ставить вопрос о замене железобетона блоками из неармированного или конструктивно армированного бетона.

Для выяснения особенностей напряженного состояния обделок, обжатых распором в породе, обладающие реологическими свойствами, принята следующая расчетная схема.

Распорный блок клиновидной формы, имеющий малые угловые размеры, первоначально свободно и без зазора вложенный в замке обделки, при вдавливании щитовыми домкратами увеличивает занимаемую им дугу на некоторую величину 2δ . Благодаря этому на величину 2δ увеличится в целом и длина контактирующего с породой контура. Возникающие на контуре обделки контактные напряжения найдены в граничных условиях второй основной задачи на основе решения, полученного в главе III, и принципа Вольтерра. Принятые в качестве граничных условий тангенциальные смещения контура обращаются в нуль на пересечении с вертикальным диаметром и достигают максимума (величины $\pm \delta$) в точках сопряжения распорного блока со смежными.

Естественно, что при задании граничных условий в этом виде контактные напряжения не будут распределены по контуру обделки равномерно. Неравномерность контактных давлений при создании напряжения указанным способом подтверждена экспериментальными исследованиями О. Ю. Антонова на стенде ЦНИИС и результатами натурных наблюдений Р. И. Евстигнеева, В. Г. Лапшина и С. А. Орлова («Транспортное строительство», 1969, № 12).

Найденное аналитически приближенное решение, определяющее установившиеся нормальные силы в сечениях, может быть представлено в виде произведения двух функций, одна из которых $\varphi(\theta)$ зависит только от угла наклона θ сечения к вертикали (отсчитывается от нижней точки обделки), а дру-

гая является функцией $f(\eta)$ коэффициента релаксации окружающей породы. Из полученного выражения подстановкой $\eta = 1$ можно определить величины нормальных сил в момент создания распора (начальные значения нормальных сил не зависят от реологических свойств породы, окружающей тоннель), а подстановкой фактического значения η — величины нормальных сил, остающихся в обделке по прошествии длительного промежутка времени.

Анализ функции $\varphi(\theta)$ показал наличие значительной неравномерности в распределении нормальной силы по длине контура обделки. При этом величина нормальной силы в лотке может оказаться недостаточной для погашения растягивающих напряжений, вызванных изгибающими моментами.

Первоначально созданные усилия убывают со временем до тех меньших величин, чем ниже коэффициент релаксации породы. При $\eta = 0$ усилия предварительного напряжения со временем исчезают полностью. Поскольку параллельно с этим в обделке будут развиваться усилия, вызванные активным (допредельным) давлением породы, в последнем случае в обделке установится состояние, не отличающееся от напряженного состояния ненапрягаемой обделки.

В общем случае со временем нормальные силы в обделке (с учетом активного давления) будут нарастать, перераспределяясь по контуру в сторону сглаживания первоначальной неравномерности, что удовлетворительно согласуется (не только качественно, но и количественно, в пределах точности исходных данных) с результатами натурных наблюдений, проведенных при сооружении Киевского коллектора.

В восьмой главе проведено сопоставление полученных результатов аналитических исследований, основывающихся на различных предположениях о свойствах массива пород, с данными натурных наблюдений.

Исследования напряженного состояния тоннельной обделки в натурных условиях проведены при сооружении тоннеля Харьковского магистрального коллектора в период с августа 1966 года по апрель 1968 года. Обделка тоннеля из сборного железобетона с наружным диаметром 3,94 м и внутренним 3,54 м собрана без перевязки швов. Каждое кольцо обделки состоит из шести одинаковых гладких блоков шириной 0,75 м и толщиной 0,2 м с цилиндрическими продольными бортами. Армирование блоков симметричное (общий коэффициент армирования 0,6%).

Опытный участок состоял из двух основных колец, которые служили для проведения измерений, и нескольких ограж-

дающих (буферных) колец, имеющих такую же схему сборки, как и основные и предназначенных для защиты последних от влияния смежных участков обделки.

Блоки, предназначенные для основных колец, были предварительно подготовлены для проведения измерений фибровых деформаций. С этой целью на внутренней поверхности каждого из блоков, в гнездах, высверленных в защитном слое бетона, были заделаны на цементном растворе два ряда марок с угловыми расстояниями между марками в ряду, равными 10° .

Для измерения фибровых деформаций обделки был использован механический компаратор с базой, равной расстоянию между смежными марками по хорде. Индикатор часового типа, встроенный в конструкцию компаратора, позволял снимать отсчеты с номинальной точностью 0,001 мм.

Тоннель, в котором проводились исследования, расположен на глубине 18 м от поверхности в толще плотных мергелистых глин.

Достаточно большое количество измерительных баз позволило при обработке экспериментальных данных и их сопоставлении с результатами аналитических решений применить статистические методы. За основу принята эпюра средних по двум кольцам относительных деформаций за время первых 63 суток с момента нагнетания тампонажного раствора.

Сопоставление данных натуральных наблюдений с результатами аналитических решений проведено для следующих расчетных схем:

I. Шестиблочная обделка, нагруженная равномерно распределенным вертикальным горным давлением и упругим отпором породы по всему контуру в соответствии с гипотезой Винклера.

II. Шестиблочная обделка, нагруженная той же вертикальной нагрузкой и равной ей реакцией породы снизу, а также радиальным отпором породы на части боковой поверхности симметрично относительно горизонтального диаметра обделки.

III. Шестиблочная обделка в весомом упругом массиве.

IV. Шестиблочная обделка в весомом упруго-наследственном массиве.

Степень соответствия перечисленных расчетных схем реальным условиям статической работы обделки в массиве пород проверена путем сопоставления средних квадратических отклонений между расчетными относительными деформациями внутреннего контура обделки, полученными аналитически, и

экспериментальными данными. По найденным средним квадратическим отклонениям определены коэффициенты вариации.

Из сравнения средних квадратических отклонений и коэффициентов вариации следует, что результаты расчета мног шарнирного кольца в весомом упруго-наследственном массиве наиболее близки к данным натурных наблюдений. Средняя величина коэффициента вариации 34,9% свидетельствует о более чем достаточном соответствии между последним аналитическим решением и экспериментальными данными, принимая во внимание неизбежный разброс последних и безусловное наличие не учтенных при решении факторов, влияющих на напряженное состояние обделки.

Расчетные схемы II и III дают существенно завышенные расчетные значения деформаций (а следовательно, и напряжений) и могут быть использованы лишь для качественной оценки напряженного состояния обделки.

Для расчетной схемы I величина коэффициента вариации превышает 100%, что является следствием не только количественного, но и качественного несоответствия между расчетным напряженным состоянием и данными натурных наблюдений. Это различие особенно отчетливо проявляется в пределах нижнего полукольца. Учитывая некоторое качественное подобие результатов расчета для всех перечисленных расчетных схем в пределах верхнего полукольца обделки, где и находится один из максимумов эпюр изгибающих моментов, первую расчетную схему, обладающую наибольшей простотой, можно рекомендовать для качественного анализа общих закономерностей, присущих геометрически изменяемым обделкам.

В процессе расчета шестиблочной обделки выяснилось, что величина и распределение нормальной силы в сечениях практически не зависят от конкретных параметров обделки. Это дает основание рекомендовать для практических расчетов достаточно простую приближенную формулу, по которой можно определить нормальную силу в сечениях обделок кругового очертания любой конструкции (как шарнирных, так и монолитных)

$$N_0 = \frac{3(1 - \eta)}{[1 + (1 - 2\nu)\eta][3 - (1 - 2\nu)\eta]} r \gamma h \left\{ 1 + \frac{1}{2m} \cos \theta - \right. \\ \left. - \frac{\eta [3 + 2(1 - 2\nu)^2 \eta]}{3[1 + 2(1 - 2\nu)\eta]} (1 - 2\nu) \left(\cos 2\theta + \frac{1}{4m} \cos 3\theta \right) \right\},$$

где ν — коэффициент Пуассона, $m = h/r$.

В заключение проведено исследование области применимости полученного решения. Анализ изменения максимальных касательных напряжений τ_{\max} при сооружении тоннеля показал, что при проведении выработки τ_{\max} резко возрастают до значений, превышающих бытовое давление на данной глубине. В случае быстрого закрепления выработки τ_{\max} со временем значительно снижаются.

В ближайшей окрестности контура незакрепленной выработки касательные напряжения могут достигнуть условного предела текучести породы, что приведет к развитию деформаций вязко-пластического течения. Неизбежным следствием длительного течения горных пород явится нарушение их сплошности и снижение прочности в окрестности выработки, в результате чего граница области вязко-пластического течения будет распространяться в глубь массива.

Этот процесс, по-видимому, и является основной причиной развития весьма значительного горного давления в случаях несвоевременного или некачественного (не обеспечивающего надежного контакта между обделкой и породой) закрепления выработки.

В работе приведены эпюры, позволяющие определить предельную глубину, превышение которой требует учета физической нелинейности свойств горных пород при определении напряженного состояния обделки. Эта глубина колеблется от нескольких десятков метров для глинистых пород до сотен и тысяч метров для пород скальных.

ВЫВОДЫ

Аналитические и экспериментальные исследования взаимодействия многошарнирных обделок тоннелей с массивом горных пород позволили сделать следующие выводы.

1. Для улучшения напряженного состояния (снижения величин изгибающих моментов) многошарнирной геометрически изменяемой тоннельной обделки в однородном изотропном массиве целесообразно вести монтаж таким образом, чтобы в лотке и шельге свода обделки находился стык блоков (шарнир).

2. Величина изгибающих моментов и эксцентриситет приложения нормальной силы существенно зависят от количества блоков в кольце геометрически изменяемой обделки. Максимальные эксцентриситеты с уменьшением угловых размеров блоков снижаются по закону, близкому к гиперболическому.

3. Подбором надлежащего количества блоков в кольце геометрически изменяемой обделки можно добиться исключения растягивающих напряжений в сечениях, повысив тем самым несущую способность обделки без увеличения расхода материалов. На основании проведенного исследования можно заключить, что при толщине блоков 20 см растягивающие напряжения в сечениях будут отсутствовать при количестве блоков в кольце более восьми. При этом железобетонные блоки могут быть заменены блоками из неармированного или конструктивно армированного бетона.

4. Неравномерность распределения напряжений на неподкрепленном контуре выработки и наружном контуре обделки сглаживается при уменьшении коэффициента релаксации пород и увеличении коэффициента Пуассона. Нормальные контактные напряжения нарастают при уменьшении коэффициента релаксации, достигая полного веса столба вышележащих пород при $\eta = 0$.

5. Максимальные изгибающие моменты в сечениях блоков обделки, находящейся в весоом упруго-наследственном массиве, возникают при значениях коэффициента релаксации, близких к 0,4, убывая до нуля при $\eta = 0$ и $\eta = 1$. Величина изгибающих моментов существенно зависит от коэффициента Пуассона горных пород.

6. Величина коэффициента Пуассона пород, обладающих реологическими свойствами, оказывает незначительное влияние на распределение нормальных сил в сечениях обделки, благодаря чему это распределение приближается к равномерному. При уменьшении коэффициента релаксации от единицы до нуля нормальные силы в сечениях обделки нарастают по закону, близкому к линейному.

В неустойчивых породах, коэффициент релаксации которых близок к нулю, напряженное состояние геометрически изменяемой обделки и сплошного кольца идентично.

7. Деформации обделки практически не влияют на распределение и величину нормальных сил в сечениях обделки, благодаря чему нормальные силы в сечениях круговых обделок любой конструкции (включая сплошное кольцо) могут быть определены с достаточной для практических расчетов точностью по приближенной формуле, приведенной выше.

8. В породах, коэффициент релаксации которых близок к нулю, смещения геометрически изменяемой обделки со временем могут стать неограниченными, что можно охарактеризовать как потерю устойчивости обделки в целом.

9. При значениях коэффициента релаксации $\eta < 0,2$ воз-

можно весьма значительные смещения многошарнирной обделки, которые, при малых угловых размерах блоков, могут привести к потере устойчивости элементарных трехшарнирных арок, составляющих обделку. Такие породы можно охарактеризовать как неустойчивые.

Сборку обделок в неустойчивых породах целесообразно вести с перевязкой швов, поскольку в этом случае агрегат из нескольких колец обделки приобретает собственную жесткость за счет усилий, остающихся от обжатия обделки в продольном направлении щитовыми домкратами.

10. Нормальная сила, создаваемая при напряжении обделки распором в породе путем задавливания клинового блока, быстро убывает по мере удаления сечения от распорного блока. Поэтому для повышения несущей способности напрягаемой обделки в целом целесообразно применение лотковых блоков более мощной (по сравнению с нормальными) конструкции.

11. Усилия, создаваемые при напряжении обделки распором в породе, убывают со временем. Величина остающихся в обделке усилий тем меньше, чем ниже коэффициент релаксации окружающих пород. При $\eta = 0$ напряжения распора со временем исчезают полностью.

12. Методы расчета геометрически изменяемых тоннельных обделок в линейно податливой среде, в весомой упругой среде и в весомом упруго-наследственном массиве приводят к результатам, различающимся как количественно, так и качественно. Последний метод расчета дает наилучшее и достаточно близкое соответствие между результатами аналитического решения и данными натурных наблюдений.

13. С целью предотвращения развития значительных деформаций в массиве и увеличения горного давления, выработка, пройденная в скальных породах, должна надежно закрепляться возможно скорее даже при небольших глубинах заложения. При значительных глубинах (составляющих сотни и тысячи метров) этот вывод следует распространить и на скальные породы.

14. Трудоемкость вычисления контактных напряжений и усилий в геометрически изменяемых обделках по полученным формулам относительно не велика; структура формул удобна для программирования на ЭВМ.

Ожидаемый порядок усилий может быть определен на основании приведенных в работе эпюр и графиков без детального статического расчета обделки.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Котляревский В. Э., Особенности напряженного состояния сборных железобетонных тоннельных обделок без перевязки швов. Тезисы докл. первой республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, 1969.

2. Котляревский В. Э., Исследование напряженного состояния геометрически изменяемых тоннельных обделок в весомай упругой полуплоскости. Материалы юбилейной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров ж.-д. транспорта, Днепропетровск, 1970.

3. Котляревский В. Э., Экспериментально-теоретическое исследование напряженного состояния геометрически изменяемых систем в весомай упругой полуплоскости. Сб. трудов ДИИТа «Геотехника в строительстве», вып. 4, Днепропетровск, 1970.

4. Котляревский В. Э., Напряженное состояние многшарнирной тоннельной обделки в весомай упруго-наследственной полуплоскости. Сб. трудов ДИИТа «Геотехника в строительстве», вып. 4, Днепропетровск, 1970.

5. Мизюмский В. А., Котляревский В. Э., Исследование напряженного состояния тоннельной обделки из железобетонных блоков в натурных условиях. Сб. «Экспериментальные исследования инженерных сооружений», № 4, изд. «Промінь», Днепропетровск, 1969.

НТБ
ДНУЖТ

БТ 14815. Подписано к печ. 1. IX 1970 г. Бум. 60x84^{1/16}. Объем 1 п. л.
Заказ № 7599. Тираж 200

Городская типография № 3 областного управления по печати
г. Днепропетровск-2, ул. Фрунзе, 6.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ