

Йорг Кристиан Штернагель



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЕЙ В  
ТЕХНОЛОГИИ МИКРОТОННЕЛИРОВАНИЯ**

**Специальности: 25.00.20 - "Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная  
теплофизика"**

**25.00.22 - "Геотехнология (подземная, открытая,  
строительная)"**

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

**МОСКВА 2006**

Работа выполнена в Московском государственном горном университете

*Научный руководитель*

профессор, доктор технических наук Баклашов Игорь Владимирович

*Официальные оппоненты:*

доктор технических наук Одинцев Владимир Николаевич,  
кандидат технических наук Куликов Юрий Николаевич

Ведущая организация – ОАО «Горнопроходческих работ №1» (г. Москва)

Защита состоится «25» марта 2006 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета Д-212.128.05 при Московском государственном горном университете по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 6

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного горного университета

Автореферат разослан «20» февраля 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

профессор,  
доктор технических наук  
Крюков Г.М.

2006 А  
4040

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Технология микротоннелирования, как самая современная наукоёмкая технология подземного строительства, за тридцатилетний период развития значительно расширила область своего применения: от прокладки трубопроводов малого диаметра без присутствия людей на небольших глубинах и в слабых грунтах до проходки тоннелей большого диаметра (до 4,5 м) с присутствием людей в скальных породных массивах по трассам глубокого заложения с большой протяженностью и со сложной траскторией. Можно утверждать, что технология микротоннелирования сегодня находится на новом этапе развития. За последние годы расширилась практика микротоннелирования и в России. По состоянию на 2004 г. в России работало более 40 микротоннелепроходческих комплексов, из них 24 комплекса диаметром от 0,4 м до 2,0 м в г. Москве. Если в 2000 г. сооружалось 3 км тоннелей по технологии микротоннелирования, то в 2004 г. - 15 км.

Мировая практика свидетельствует о том, что применение технологии микротоннелирования в более сложных горно-геологических условиях потребовало создания новой техники: разрушающих механизмов по скальным породам, мощных домкратных установок, более совершенных навигационных систем управления проходческими комплексами. Совершенно очевидно, что при проходке по жёстким скальным породам на криволинейных трассах значительно возрастают монтажные продольные нагрузки на обделку от воздействия домкратных установок.

Как показывает практика микротоннелирования, в том числе и российская, стали более частыми случаи разрушения обделки от воздействия монтажных нагрузок. Основная причина таких аварийных ситуаций состоит в том, что конструктивные решения обделок неадекватно отражают фактические условия их нагружения, так как существующие нормы проектирования обделок построены на идеализированных схемах нагружения и в этом смысле отстают от развития техники микротоннелирования. Отсюда необходимо проведение специальных научных исследований как теоретического, так и экспериментального характера, которые бы объясняли особенности деформирования и разрушения обделки при микротоннелировании в жёстких скальных породах, на больших глубинах, по

РОС. ФЕДЕРАЦИЯ  
БИБЛИОС.

С.Петербург

09 300 акт/62

криволинейным трассам большой протяжённости, т.е. в горно-геологических условиях, характеризующих новый этап развития и применения технологии микротоннелирования. С этой точки зрения тема диссертационных исследований является актуальной.

**Цель работы** состоит в геомеханическом обосновании методики прогнозирования усилий продавливания, напряжённого состояния и особенностей разрушения обделки при микротоннелировании с конечным выходом на разработку рекомендаций по конструированию обделки.

**Идея работы** заключается в том, что при развороте обделки на криволинейных участках микротоннелирования в жёстких скальных породах и её деформировании совместно с окружающим породным массивом со стороны последнего возникают значительные по величине поперечные реактивные нагрузки, которые превосходят нагрузки от горного давления и в конечном итоге могут быть причиной разрушения обделки.

**Основные научные положения, разработанные лично соискателем, и их новизна:**

1. Деформированное состояние породного массива и обделки, возникающее при её развороте на криволинейных участках микротоннелирования, увеличивает дополнительные монтажные усилия продавливания не более чем на 30%, в то время как без учёта этих деформаций увеличение усилий продавливания может достигать 70%.

2. Напряжённо-деформированное состояние породного массива, обделки и определяющие их монтажные усилия продавливания на криволинейных участках микротоннелирования нелинейно возрастают с увеличением отношения модуля деформации массива  $E_m$  к модулю деформации бетона обделки  $E_b$ , при этом наибольшая тенденция увеличения этих параметров наблюдается в диапазоне изменения указанного отношения  $0 < E_m / E_b \leq 0,01$ .

3. Основные параметры продавливания (лобовое сопротивление забоя  $R_0$ , удельное сопротивление трения на прямолинейных участках  $q$  и дополнительные усилия продавливания на криволинейных участках  $R_2$  микротоннелирования) могут быть определены по специально разработанной методике экспериментальных

замеров давлений в главной и промежуточной домкратных станциях на первом прямолинейном и следующим за ним криволинейном участках микротоннелирования.

4. Прогнозные оценки напряжённого состояния обделки и её разрушения свидетельствуют о том, что определяющими прочностью обделки являются монтажные продольные нагрузки и возникающие от их воздействия реактивные поперечные нагрузки на обделку со стороны породного массива при её развороте, которые могут быть причиной образования трещин, наклонных к продольной оси обделки, и смятия торцевых сечений, а также образования продольных трещин на внутренней поверхности в боках обделки, что подтверждается экспериментальными исследованиями на объектах микротоннелирования.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются:**

- использованием апробированных методов геомеханики и механики подземных сооружений для определения напряжённо-деформированного состояния породного массива, обделки и особенностей разрушения обделки тоннелей;
- удовлетворительной сходимостью (с погрешностью не более 10%) расчётных оценок усилий продавливания с фактически измеренными;
- сходимостью прогнозных оценок разрушения обделки с фактически наблюдаемыми при микротоннелировании;
- положительными результатами внедрения рекомендаций по расчёту арматурных каркасов в практику проектирования железобетонных обделок в России.

**Методы исследований:** анализ и обобщение существующего опыта проектирования и производства работ при микротоннелировании; теоретические исследования усилий продавливания и напряжённо-деформированного состояния породного массива и обделки методами геомеханики и механики подземных сооружений; экспериментальные исследования на объектах микротоннелирования; расчётное обоснование арматурных каркасов железобетонных обделок.

**Научное значение работы** заключается в развитии существующих представлений о геомеханических процессах, формирующих реактивные

поперечные нагрузки на обделку со стороны породного массива при её развороте на криволинейных участках микротоннелирования.

**Практическое значение** работы состоит в разработке методики прогнозирования усилий продавливания, напряженно-деформированного состояния и особенностей разрушения обделки при микротоннелировании.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Результаты работы реализованы в расчётном обосновании несимметричных арматурных каркасов железобетонных обделок диаметром 1200, 1500, 2000 мм, выпускаемых ООО «Завод специальных железобетонных труб».

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались в сентябре 2005 г. на семинаре Российского общества по внедрению бестраншейных технологий, на семинарах в учебно-исследовательском центре «Геомеханика» МГГУ и на заседаниях кафедры ФГПИП МГГУ в 2004 и 2005 г. г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано пять работ.

**Объём работы.** Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит список литературы из 54 наименований, 23 рисунка и 19 таблиц.

### **Основное содержание работы**

В первой главе приведен краткий обзор современного производственного опыта по технологии микротоннелирования, находящейся сегодня на новом этапе своего развития, для которого характерны: глубокое заложение тоннелей (до 25 м); проходка в скальных грунтах; сооружение тоннелей большого диаметра (до 4,5 м); трассы большой протяжённости без промежуточных колодцев, но с применением промежуточных домкратных станций; трассы сложной криволинейной конфигурации с радиусами кривизны до 100 м; домкратные станции большой мощности (до 1500 т). Иными словами, новый этап развития технологии микротоннелирования характеризуется более сложными горно-геологическими условиями.

Наиболее показательным в этом отношении и вместе с тем наиболее сложным проектом зарубежного микротоннелирования является тоннель Сео-Чо, пройденный в Южной Корее: тоннель с наружным диаметром 3,04 м имеет длину всего лишь 798 м, но его трасса представляет самую сложную конфигурацию-5

криволинейных участков с различными радиусами кривизны, минимальный из которых 200 м; стартовая шахта находится на глубине 45 м в жёстких скальных породах, а приёмная шахта выходит в подвал здания, поскольку её невозможно разместить на незастроенной территории.

В российской практике самые большие проекты микротоннелирования по криволинейным трассам в сложных горно-геологических условиях осуществлены при сооружении подземных переходов магистральных нефтепроводов под р. Невой. Первая очередь трубопровода диаметром 2,5 м длиной 774 м была сооружена в 2001 г. в 40 км от С-Петербурга с использованием комплекса AVN 2000D. Вторая очередь длиной 778 м сооружена в 2003 г. тем же комплексом по трассе с участками уклона до 7° и радиусами кривизны 1500 м в вертикальной плоскости. Проходка осуществлена с 6 промежуточными дократными станциями и креплением тоннеля железобетонными трубами.

Мировая и отечественная практика свидетельствуют о том, что современная постоянно развивающаяся техника микротоннелирования позволяет реализовать самые сложные проекты. Вместе с тем зафиксированы более частые случаи разрушения обделки, основная причина которых заключается в том, что в более сложных горно-геологических условиях конструктивные решения обделок неадекватно отражают реальные условия их нагружения и деформирования.

Далее в первой главе приведен анализ существующих исследований по прогнозированию усилий продавливания на криволинейных трассах в жёстких скальных породах. Первая постановка такой задачи приведена в работах известного немецкого учёного M.Scherle, где схематически представлено распределение усилий продавливания между отдельными элементами обделки, когда они входят в криволинейный участок трассы. M.Scherle записывает определённое соотношение между геометрическим, деформационными и силовыми параметрами обделки, а также вводит правильную гипотезу о распределении бокового отпора со стороны породного массива по закону треугольника при развороте обделки. Однако при этом не делает выводов относительно количественной оценки усилий продавливания на криволинейной трассе.

В более поздней работе японского исследователя Teruhisa Nanno рассматривается продавливание обделки по криволинейной трассе с малым радиусом кривизны в слабых илистых грунтах и обсуждается величина необходимого бокового отпора грунта при развороте обделки, которая должна формироваться горизонтальной составляющей горного давления. Если последняя не обеспечивает необходимого бокового отпора, автор предлагает агрегатный метод продавливания, который заключается в установке между элементами обделки регулирующих устройств в виде винтовых домкратов. При этом снижается величина дополнительных усилий продавливания на криволинейных участках трассы. Такое техническое решение заслуживает самого пристального внимания, хотя его реализация представляется достаточно сложной. Подводя итог анализу работы Teruhisa Nanno, следует заметить, что изложенные в ней рекомендации построены для конструкции обделки без деревянных прокладок, обычно применяемых в европейской практике микротоннелирования, в том числе и в России, и по сути дела выполняющих роль регулирующих устройств при развороте элементов обделки. Кроме того, усилия продавливания на криволинейной трассе определяются только из условия статического равновесия системы «обделка-породный массив», без учёта деформаций породного массива.

Наиболее обстоятельные исследования по усилиям продавливания на криволинейных трассах и возникающим при этом монтажным нагрузкам на отдельные элементы обделки изложены в работах немецкого исследователя Уве Рёсслера. Дополнительные усилия продавливания, по мнению автора, возникают от появления дополнительных усилий сопротивления трения на контактирующей с породным массивом боковой поверхности обделки при её развороте. В работе впервые построены расчётные выражения для распределения монтажных стыковых нагрузок на криволинейной трассе и доказано, что максимальные по величине монтажные стыковые нагрузки возникают при входе элемента обделки в первый от стартовой шахты криволинейный участок. В качестве критических замечаний по работе Уве Рёсслера можно привести следующие: расчётные выражения построены только из условия статического равновесия и деформации окружающего массива не рассматриваются; не представляется возможным оценить силовое воздействие деформируемого массива на обделку и возникающее от этого воздействия



увеличение усилий продавливания на криволинейных участках трассы: полученные оценки увеличения усилий продавливания являются завышенными.

В первой главе также приведен анализ существующих исследований и рекомендаций по оценкам прочности и трещиностойкости обделки. В приведённом анализе не обсуждаются исследования по трещинообразованию известных учёных (Черепанова Г.П., Одинцева В.Н. и др.). Анализ построен по существующим нормативным рекомендациям для железобетонных труб, которые на сегодняшний день являются основным видом обделки в технологии микротоннелирования. Анализируются нормативные выражения для расчёта продольных и поперечных сечений железобетонной обделки, делаются выводы о пока ещё неиспользованных резервах несущей способности обделки при конструировании её арматурных каркасов, которые корреспондируются с работами специалистов по проектированию железобетонных конструкций подземных сооружений (Борисова В.Н., Куликова Ю.Н. и др.). При этом обращается внимание на необходимость более детальных расчётов трещиностойкости обделки с учётом всех компонентов её напряжённого состояния, соотношение между которыми может изменяться при различном сочетании монтажных и эксплуатационных нагрузок.

**Вторая глава** занимает центральное положение в диссертации, в ней приведено геомеханическое обоснование процессов нагружения обделки на криволинейных трассах микротоннелирования. Особенности этих процессов заключаются в следующем. Монтажные нагрузки, их величины и эксцентриситеты следует анализировать для всех элементов обделки, определяя при этом наиболее нагруженный элемент, поскольку эти параметры нагружения зависят от кривизны трассы, расстояния от домкратной установки и самое главное от механических свойств окружающего породного массива, которые могут существенно изменяться по трассе микротоннелирования. Монтажные нагрузки, передаваемые через деревянные прокладки между элементами обделки, имеют различные эксцентриситеты даже в пределах одного элемента обделки, так как в торцевых поперечных сечениях деревянные прокладки передают только сжимающие напряжения, а в остальных поперечных сечениях обделки возникают как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Следующая особенность монтажных нагрузок в их многократном повторении, или цикличности и, кроме

того, монтажные нагрузки, формируемые главным образом усилиями сопротивления трения по боковой поверхности обделки, полностью не релаксируют при снятии давления со стороны домкратных установок. Главная особенность монтажных нагрузок на криволинейных трассах заключается в их зависимости от контактного давления окружающего породного массива при развороте обделки, величина которого в свою очередь зависит от деформационных свойств породного массива и должна определяться из условия совместности деформаций обделки и породного массива.

Далее во второй главе проанализированы особенности деформирования и распределения напряжений в элементах обделки, которые существенным образом зависят не только от величины монтажных и эксплуатационных нагрузок, но также от возможных сочетаний этих нагрузок с учётом появления боковых контактных нагрузок со стороны породного массива при развороте обделки, т.е. контактных нагрузок монтажного происхождения.

Если анализировать все компоненты напряжённого состояния обделки в цилиндрической системе координат (главные нормальные напряжения осевые  $\sigma_z$ , радиальные  $\sigma_r$  и окружные  $\sigma_\theta$ ), в наиболее неблагоприятном сочетании они находятся в торцевом сечении обделки, где действуют максимальные по величине монтажные продольные и поперечные нагрузки монтажного происхождения.

Поэтому во второй главе приведен подробный анализ указанных выше поперечных нагрузок монтажного происхождения. Рассмотрена задача по определению максимальной величины радиального контактного давления из условия совместности радиальных перемещений угловой точки обделки и породного массива при развороте обделки на криволинейном участке трассы. В итоге построены расчётные выражения для первого и последнего элементов обделки на криволинейном участке, где контактное давление достигает максимальной величины

$$P_K = \frac{\left(\frac{l^2}{R} - U_0\right)}{\beta_G + \beta_M}, \quad (1)$$

и для остальных элементов обделки на криволинейном участке

$$P_k = \frac{\left( \frac{l^2}{2R} - U_0 \right)}{\beta_6 + \beta_m}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина элемента обделки;  $R$  – радиус кривизны трассы микротоннелирования;  $U_0$  – строительный зазор между внутренней поверхностью тоннельной выработки и внешней поверхностью трубчатой обделки;  $\beta_6$  и  $\beta_m$  – коэффициенты податливости соответственно бетона и породного массива, обратно пропорциональные соответствующим модулям деформации бетона  $E_6$  и породного массива  $E_m$ , для которых характерно соотношение  $E_6 \gg E_m$ .

Далее, следуя гипотезе распределения радиального контактного давления по боковой поверхности обделки по закону треугольника, определена равнодействующая этого давления которая, будучи умноженной на коэффициент трения по породной поверхности  $\mu$ , представляет выражение для соответствующего дополнительного усилия сопротивления трения на криволинейном участке трассы. Построены расчётные выражения для определения усилий продавливания при расположении головной секции комплекса на любом участке трассы микротоннелирования и расчётные выражения для определения продольных монтажных нагрузок (величины этих нагрузок и эксцентриситетов их приложения) на любой элемент обделки. Так, например, максимальное усилие продавливания на трассе микротоннелирования с  $K$  витками кривизны при выходе головной секции комплекса в приёмную шахту определяется выражением:

$$P = P_1 + P_2 + P_0 = \pi D_a L q + \frac{\pi D_a l \mu}{8(\beta_6 + \beta_m)} \left\{ \sum_1^K 4 \left( \frac{l^2}{R_{2n}} - U_0 \right) + \sum_1^K \left( \frac{L_{2n}}{l} - 2 \right) \left( \frac{l^2}{2R_{2n}} - U_0 \right) \right\} + P_0, \quad (3)$$

где первый член  $P_1$  суммы представляет усилие сопротивления трения на прямолинейной трассе такой же длины  $L$ ;  $D_a$  – внешний диаметр обделки;  $q$  – удельное сопротивление трения на прямолинейной трассе; второй член суммы представляет дополнительное усилие сопротивления трения на всех криволинейных участках  $2n$  с радиусом кривизны  $R_{2n}$  трассы микротоннелирования, имеющей  $K$  целых витков кривизны ( $n = 1, 2, 3, \dots, 2K, (2K + 1)$ ); третий и последний член суммы  $P_0$  представляет начальное усилие внедрения проходческого комплекса в породный забой.

Как следует из анализа расчётного выражения (3), усилие продавливания определяется:

- 1) геометрическими параметрами трассы микротоннелирования ( $L, K, L_{2n}, R_{2n}$ );
- 2) деформационно-геометрическими параметрами обделки ( $\beta_0, D_n, l, U_0$ );
- 3) механическими параметрами окружающего породного массива ( $q, \mu, \beta_m, P_0$ ).

Особое внимание уделено анализу влияния деформационного параметра  $\beta_m$ . В результате численных расчётов установлено, что учёт совместного деформирования обделки и породного массива даёт максимальные оценки дополнительного усилия продавливания на криволинейных участках трассы порядка 30%, что значительно меньше, чем без учёта совместного деформирования обделки и массива, как это было сделано в работах Уве Рёсслера.

Проанализировано влияние соотношения деформационных параметров обделки и породного массива, т.е. влияние отношений податливостей  $\beta_0 / \beta_m$  или соответствующих модулей деформации  $E_m / E_0$ . Установлено, что дополнительные усилия продавливания на криволинейных участках возрастают по нелинейному закону с увеличением отношения  $E_m / E_0$ . Наибольшая тенденция к увеличению усилий продавливания наблюдается в диапазоне изменений указанного отношения  $0 < E_m / E_0 \leq 0,01$ , где функциональная зависимость близка к линейной.

Проанализировано также распределение стыковых монтажных нагрузок, т.е. нагрузок сжатия в стыках между соседними элементами обделки, и соответствующих максимальных осевых напряжений в элементах обделки по криволинейным трассам микротоннелирования, и установлены следующие закономерности:

- 1) стыковые монтажные нагрузки распределяются по трассе, как зеркальное отображение распределения усилий продавливания;
- 2) максимальные осевые напряжения сжатия  $\sigma_z$  в торцевых сечениях элементов обделки наблюдаются при входе в первый от стартовой шахты криволинейный участок трассы и тем больше по величине, чем ближе расположен к стартовой шахте этот криволинейный участок;

- 3) максимальные осевые напряжения сжатия и растяжения  $\sigma_r$  в средних поперечных сечениях обделки наблюдаются также при входе в первый от стартовой шахты криволинейный участок, но по абсолютной величине они меньше соответствующих осевых напряжений сжатия в торцевых сечениях;
- 4) судя по этим оценкам осевых напряжений, наиболее нагруженным при проектировании обделки будет её элемент, расположенный при входе в первый от стартовой шахты криволинейный участок, когда головная секция проходческого комплекса находится у входа в приёмную шахту.

От воздействия реактивных контактных напряжений радиального направления  $\sigma_r$  на внешней поверхности обделки, возникающих при её развороте под действием внецентренных стыковых монтажных нагрузок, в поперечных сечениях обделки появляются окружные нормальные напряжения  $\sigma_\theta$ , которые достигают максимальных значений вблизи торцевых поперечных сечений и могут быть как растягивающими, так и сжимающими в зависимости от рассматриваемых характерных поперечных сечений (торцевые, средние), продольных сечений обделки (свод, лоток, бок), рассматриваемого контура обделки (внешнего или внутреннего), а также в зависимости от пространственной ориентации трассы микротоннелирования (в горизонтальной, вертикальной или наклонной плоскостях). Таким образом, в расчётных точках элементов обделки под действием стыковых монтажных нагрузок возникает сложное напряжённое состояние с компонентами главных напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ , различными по величине и по знаку. При этом для них сохраняется общая закономерность: они увеличиваются по абсолютной величине с увеличением жёсткости породного массива, т.е. с увеличением отношения  $E_m/E_g$ . В качестве иллюстрации этих выводов ниже в таблице 1 приведены результаты численных расчётов максимальных усилий продавливания, монтажных нагрузок, их эксцентриситетов и соответствующих максимальных по абсолютной величине компонентов главных напряжений в характерных сечениях наиболее нагруженного элемента обделки с внутренним  $D_в=1,2$  м и внешним  $D_вн=1,5$  м диаметрами на трассе микротоннелирования с двумя

криволинейными участками в горизонтальной плоскости с радиусом кривизны 600м в зависимости от жёсткости породного массива.

Таблица 1- Максимальные усилия продавливания, монтажные нагрузки, их эксцентриситеты и соответствующие максимальные по абсолютной величине компоненты главных напряжений в наиболее нагруженном элементе обделки в зависимости от величины относительной жёсткости породного массива  $E_m/E_б$

№ п/п	Расчётные параметры монтажных нагрузок в зависимости от величины $E_m/E_б$	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1
1.	Усилие продавливания $P$ , МН	2,508	8,051	15,106	26,236	40,298
2.	Монтажная нагрузка $P_m$ , МН	2,193	6,845	12,743	21,796	33,756
3.	Абсолютный эксцентриситет монтажной нагрузки $X$ , м	0,565	0,450	0,315	0,315	0,315
4.	Осевое напряжение сжатия в торцевом сечении $\sigma_{z_{max}}$ , МПа	13,45	27,44	40,07	68,54	106,15
5.	Радиальное контактное напряжение сжатия в плоскости торцевого сечения $\sigma_{r_{max}}$ , МПа	0,10	0,40	0,67	1,45	1,97
6.	Окружные напряжения растяжения на внешнем контуре торцевого сечения в своде $\sigma_{\theta_{max}}$ , МПа	1,74	7,22	12,08	26,11	35,36
7.	Окружные напряжения растяжения на внутреннем контуре торцевого сечения в боку $\sigma_{\theta_{max}}$ , МПа	2,18	9,06	15,14	32,74	44,34
8.	Осевое напряжение сжатия в среднем поперечном сечении $\sigma_{z_{max}}$ , МПа	9,78	26,51	41,27	69,38	107,44
9.	Окружные напряжения растяжения на внешнем контуре среднего сечения в своде $\sigma_{\theta_{max}}$ , МПа	0,87	3,61	6,04	13,05	17,68
10.	Окружные напряжения растяжения на внутреннем контуре среднего сечения в боку $\sigma_{\theta_{max}}$ , МПа	1,09	4,53	7,57	16,37	22,17

Приведены также числовые оценки указанных выше компонентов главных напряжений в характерных продольных сечениях обделки от воздействия поперечных эксплуатационных нагрузок (горное давление, собственный вес обделки, «колёсные» нагрузки на поверхности) и от совместного воздействия поперечных эксплуатационных и продольных монтажных нагрузок при различной

жёсткости окружающего породного массива. Установлено, что в породных массивах малой жёсткости ( $E_m/E_0 \leq 0,001$ ) учёт эксплуатационных нагрузок может существенным образом изменить не только величину, но и знак компонентов напряжений от воздействия монтажных нагрузок, а в жёстких породных массивах ( $E_m/E_0 \geq 0,01$ ) влияние эксплуатационных нагрузок незначительно.

Далее во второй главе рассмотрены механизмы разрушения элементов обделки и рекомендации по их количественной оценке применительно к железобетонным трубам на основе российских нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций. Сформулированы рекомендации по расчёту прочности продольных сечений железобетонных труб и следующие из этих рекомендаций конструктивные предложения по проектированию несимметричных арматурных каркасов спиральной поперечной арматуры, когда её шаг для внутреннего каркаса меньше, чем для внешнего, менее нагруженного, что обеспечивает снижение металлоёмкости труб. Сформулированы также рекомендации по расчёту прочности поперечных сечений железобетонных труб, которые должны ограничивать не только величину монтажных продольных нагрузок, а также эксцентриситеты их приложения и соответствующие радиусы кривизны проектируемой трассы микротоннелирования. При расчёте по трещиностойкости железобетонных труб рекомендуется проверять не только продольные и поперечные сечения труб, но особенно наклонные сечения, где появление разрушений представляется наиболее вероятным от совместного действия монтажных и эксплуатационных нагрузок.

В третьей главе приведены результаты экспериментальной проверки рекомендуемой методики расчёта усилий продавливания и прочности обделки на криволинейных трассах микротоннелирования. Трасса микротоннелирования на экспериментальном объекте Фразенвег (г.Кассель, Германия) имела два криволинейных участка с радиусом кривизны  $R_{2n}=300$  м, тоннель крепился железобетонными трубами с внутренним диаметром  $D_i=2,0$  м и внешним  $D_a=2,4$  м, длиной  $l=3$  м с несимметричными арматурными каркасами. В качестве экспериментального участка общей длиной  $L=125$  м выбран первый прямолинейный участок длиной  $L_1=52,5$  м и начало следующего за ним криволинейного участка, где глубина заложения тоннеля изменялась от  $H=8,5$  м

до  $H=12,5$  м, а модуль деформации породного массива от  $E_d=8$  МПа до  $E_d=60$  МПа, причем граница более жёсткого породного массива совпадала с началом криволинейного участка. В замерных точках на экспериментальном участке с координатами в виде расстояний от стартовой шахты фиксировались в автоматическом режиме давления в главной и промежуточной домкратных станциях, первая из которых была включена на расстоянии 80 м от проходческого забоя.

Результаты экспериментальных замеров обработаны по специальной программе и представлены в виде методики прогнозирования параметров продавливания: по разности давлений в главной и промежуточной домкратных станциях в момент включения последней определено усилие внедрения проходческого комплекса в породный забой  $P_0$ ; по величине приращения давлений в главной домкратной станции на прямолинейном участке  $L_1$  определено удельное сопротивление трения  $q$ , что позволило оценить сопротивление трения на прямолинейном участке  $P_1$  такой же длины  $L$ , как весь экспериментальный участок. По геометрическим параметрам первого криволинейного участка и деформационным параметрам окружающего массива построены прогнозные оценки дополнительного сопротивления трения на криволинейном участке и в конечном итоге определены расчётные прогнозные оценки усилий продавливания в замерных точках, которые сопоставлены с фактически замеренными усилиями продавливания, что представлено в таблице 2. Судя по данным таблицы 2, расчётные усилия продавливания удовлетворительно, с погрешностью не более 10% в сторону их завышения, совпадают с фактическими усилиями продавливания.

Таблица 2 - Сопоставление расчётных и фактических усилий продавливания на экспериментальном участке объекта Фразенвег.

№ замеров	Расстояние до стартовой шахты, м	Расчётные усилия продавливания, МН	Фактические усилия продавливания, МН	Ошибка прогнозирования, %
1	33,4	2,007	2,120	-5,3
2	40,9	2,233	2,332	-4,2
3	61,2	4,129	3,816	+8,2
4	70,6	4,797	4,770	+0,6



Поскольку непосредственно перед входом в криволинейный участок (отметка 52,5 м) усилия продавливания не измерялись, они определены расчётным путём и составили  $P=3,096$  МН. Затем по изложенной во второй главе методике определены монтажные нагрузки, их эксцентриситеты, максимальные осевые  $\sigma_{\text{тmax}}$  и радиальные  $\sigma_{\text{рmax}}$  напряжения для всех элементов на экспериментальном участке и построено их распределение по трассе микротоннелирования, в результате чего установлено, что наиболее нагруженным является элемент обделки на отметке 52,5 м перед входом в первый криволинейный участок, т.е. наблюдается ранее установленная во второй главе закономерность.

Для указанного наиболее нагруженного элемента обделки определены компоненты максимальных по абсолютной величине главных нормальных напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ , в характерных сечениях и точках от совместного воздействия монтажных и эксплуатационных нагрузок и приведены в таблице 3, где растягивающие напряжения приняты отрицательными. При определении напряжений от эксплуатационных нагрузок принята глубина заложения  $H=10$  м и напряжения  $\sigma_z$  вычислены из условия плоского деформирования обделки, т.е.  $\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)$ , где  $\mu$  - коэффициент Пуассона бетона обделки.

Таблица 3- Максимальные по абсолютной величине компоненты главных нормальных напряжений в характерных сечениях и точках наиболее нагруженного элемента на экспериментальном участке от совместного воздействия монтажных и эксплуатационных нагрузок.

Характерные сечения обделки	Компоненты напряжений, МПа	Внешний контур обделки		Внутренний контур обделки	
		В боку	В своде или лотке	В боку	В своде или лотке
Торцевое	$\sigma_r$	0,71	0,20	0,00	0,00
	$\sigma_\theta$	16,48	-11,13	-35,26	41,38
	$\sigma_z$	17,14	1,70	14,19	-1,3
Среднее	$\sigma_r$	0,40	0,20	0,00	0,00
	$\sigma_\theta$	6,50	-2,81	-14,13	18,14
	$\sigma_z$	5,85	3,44	8,18	0,44

Судя по знакам и величине окружных напряжений  $\sigma_{\theta}$ , эксплуатационные нагрузки не изменили качественную картину напряжённого состояния обделки, определяемую в основном монтажными нагрузками. Изменения произошли только в количественной оценке напряжений.

Затем была выполнена экспериментальная проверка прочности и трещиностойкости обделки на объекте Фразенвег, которая заключалась в следующем. По российским нормативным рекомендациям произведены расчёты прочности и трещиностойкости обделки на воздействие внутренних усилий и напряжений, определяемых данными таблицы 3, и сопоставлены с фактически наблюдаемым механическим состоянием и особенностями разрушения обделки на экспериментальном участке объекта Фразенвег. В результате расчётов для железобетонной обделки с её конструктивными параметрами установлено:

- 1) прочность нормальных поперечных сечений и продольной арматуры на воздействие монтажных нагрузок обеспечивается;
- 2) прочность продольных сечений и спиральной поперечной арматуры на воздействие эксплуатационных нагрузок обеспечивается;
- 3) трещиностойкость продольных сечений на воздействие эксплуатационных нагрузок обеспечивается;
- 4) прочность продольных сечений и спиральной поперечной арматуры на одновременное воздействие эксплуатационных и монтажных нагрузок обеспечивается;
- 5) трещиностойкость продольных сечений на одновременное воздействие эксплуатационных и монтажных нагрузок не обеспечивается, что фиксируется на фотографиях внутренней поверхности в боку обделки после проходки тоннеля на криволинейном участке, поскольку растягивающие окружные напряжения  $\sigma_{\theta}$  на внутреннем контуре в боку обделки от монтажных нагрузок оказываются значительно больше по абсолютной величине, чем сжимающие напряжения от эксплуатационных нагрузок, особенно вблизи торцевых поперечных сечений;
- 6) нормальные к оси обделки трещины не образуются;

7) наклонные к оси обделки трещины образуются в первую очередь в горцевом сечении при воздействии монтажных и эксплуатационных нагрузок в лотке и своде, что приводит к сколу в сторону внутренней поверхности обделки и что фиксируется на фотографиях обделки тоннеля.

По совокупности выполненных оценок можно утверждать следующее:

- прочность конструкции арматурного каркаса обеспечивается на воздействие монтажных и эксплуатационных нагрузок;
- трещиностойкость железобетонных труб не обеспечивается, особенно вблизи торцевых сечений;
- прогнозные расчётные оценки прочности и трещиностойкости обделки подтверждаются наблюдениями и инструментальными замерами механического состояния и особенностей разрушения обделки на объекте Фразенвег.

В четвертой главе рекомендуемая методика геомеханического прогнозирования параметров продавливания и рекомендации по проектированию арматурных каркасов железобетонных труб реализованы в разработке проектных решений железобетонных обделок производимых на ООО «Завод специальных железобетонных труб», с внутренним диаметром 1200, 1500, 2000 мм и рекомендуемых к производству железобетонных труб с внутренним диаметром 1400 мм. В рекомендуемых проскных решениях реализована рассмотренная в п.2.3 конструкция обделок с несимметричным арматурным каркасом. Основные конструктивные параметры таких обделок представлены ниже в таблице 4, где приведены общее количество спиральной арматуры  $A_s$  (см<sup>2</sup>/м) и её шаг во внутреннем  $l$  (см) и во внешнем  $l'$  (см) каркасах для различных глубин заложения. В таблице 5 представлены результаты расчётов продольной арматуры для труб тех же диаметров по рекомендуемой методике с указанием предельно допустимого максимального эксцентриситета монтажной нагрузки  $e_{0max}$  (м) и соответствующего предельно допустимого минимального радиуса кривизны трассы микротоннелирования  $R_{min}$  (м), помимо обычно приводимой в проектах допустимой продольной монтажной нагрузки  $N_{доп}$  (т).

Таблица 4 - Рекомендуемые конструктивные параметры железобетонных труб с несимметричным арматурным каркасом с внутренним диаметром  $D_i=1200, 1400, 1500, 2000$  мм.

Глубина заложения трубы, (м)	Расчётные параметры	Внутренний диаметр труб (мм)			
		1200	1400	1500	2000
6	$A_{s_1}(\text{см}^2/\text{м})$	6	5,3	9,0	6,6
	$l_1(\text{см})$	14,0	14,0	9,0	10,5
	$l_2(\text{см})$	20,0*	20,0*	14,0	20,0*
10	$A_{s_1}(\text{см}^2/\text{м})$	6,7	5,7	11,0	6,6
	$l_1(\text{см})$	12,0	13,0	7,5	10,5
	$l_2(\text{см})$	18,5	20,0*	11,0	20,0*
15	$A_{s_1}(\text{см}^2/\text{м})$	8,1	6,5	12,0	7,8
	$l_1(\text{см})$	10,0	11,5	7,0	9,0
	$l_2(\text{см})$	15,0	20,0*	10,0	20,0*
20	$A_{s_1}(\text{см}^2/\text{м})$	8,5	7,0	13,0	8,6
	$l_1(\text{см})$	10,0	10,5	6,5	8,0
	$l_2(\text{см})$	14,0	20,0	9,0	19,0

\* Шаг арматуры 20,0 см принят по конструктивным соображениям как максимально допускаемый

Таблица 5 - Результаты расчётов прочности поперечных сечений и продольной арматуры железобетонных труб с внутренним диаметром  $D_i=1200, 1400, 1500, 2000$  мм.

$D_b(\text{мм})$	$D_a(\text{мм})$	$A_s(\text{м}^2)$	$N_{\text{длин}}(\text{т})$	$\xi_{\text{сиг}}$	$e_{0 \text{ max}}(\text{м})$	$(e_{0 \text{ max}} / D_a)$	$R_{\text{сиг}}(\text{м})$
1200	1495	0,624	750	0,518	0,420	0,280	600
1400	1780	0,948	1150	0,524	0,492	0,276	745
1500	1780	0,721	850	0,507	0,532	0,300	605
2000	2500	1,766	2600	0,643	0,502	0,200	1225

Сопоставление существующего и рекомендуемого количества спиральной арматуры  $A_s$  для труб одного диаметра, даже с учётом рекомендуемых сгущений арматуры на концевых участках труб обнаруживает, что общее количество

спиральной арматуры может быть уменьшено на 30-40% и соответственно снижена стоимость обделки.

### Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения по прогнозированию геомеханических процессов деформирования и разрушения обделки в технологии микротоннелирования, имеющие существенное значение для повышения экономической эффективности подземного строительства.

Основные научные выводы и практические результаты заключаются в следующем:

1. Современный этап развития технологии микротоннелирования характеризуется проходкой тоннелей большого диаметра (до 4,5 м), с присутствием людей, в скальных грунтовых массивах по трассам глубокого заложения (до 25 м), большой протяжённости и со сложной криволинейной траекторией.
2. Разработаны геомеханически обоснованные рекомендации по определению усилий продавливания на криволинейных трассах микротоннелирования, учитывающие совместное деформирование породного массива и обделки при её развороте.
3. Напряжённо-деформированное состояние элементов обделки на криволинейных участках существенным образом зависит от соотношения жёсткости обделки и окружающего породного массива и увеличивается с увеличением отношения модуля деформации массива  $E_m$  к модулю деформации бетона  $E_b$ : в этом смысле при отношении  $E_m/E_b \leq 0,01$  окружающий массив можно характеризовать как грунтовой, при отношении  $E_m/E_b > 0,01$  – как скальный.
4. Разработаны методические рекомендации по прогнозированию разрушений обделки от возникновения продольных монтажных нагрузок, поперечных эксплуатационных нагрузок и при совместном действии этих нагрузок, при этом установлено, что определяющими являются продольные монтажные нагрузки.

5. По прогнозным оценкам наиболее вероятная локализация и характер разрушений обделки: образование наклонных к продольной оси обделки трещин и смятие в торцевых поперечных сечениях; образование продольных и наклонных трещин на внутренней поверхности в боку обделки.
6. Разработаны методические рекомендации по определению основных параметров продавливания на основании экспериментальных данных по замерам усилий, развиваемых в основной и промежуточной домкратных установках на объектах микротоннелирования.
7. Сформулированы рекомендации по экспериментальным наблюдениям за разрушением обделки на объектах микротоннелирования.
8. Разработаны рекомендации по расчёту продольной и поперечной спиральной арматуры железобетонных обделок при проектировании арматурных каркасов с несимметричным армированием.
9. Рекомендации по расчёту арматурных каркасов внедрены в практику проектирования железобетонных обделок, производимых в России, что позволяет одновременно снизить материалоемкость обделок и вероятность аварийных ситуаций.

**Основные положения диссертации отражены в следующих  
опубликованных работах:**

1. Баклашов И.В., Штернагель Й.К. Усилия продавливания обделки и её деформирование на криволинейных трассах микротоннелирования в скальных породных массивах.- ТИМР, РОБТ.- 2005.- №2.-С. 15-18.
2. Баклашов И.В., Штернагель Й.К. Напряжённо-деформированное состояние и разрушение обделки на криволинейных трассах микротоннелирования. -ТИМР, Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. - 2005.- №1-2. -С. 7-10.
3. Штернагель Й.К. Экспериментальная проверка методики расчёта усилий продавливания на криволинейных трассах микротоннелирования. -ТИМР, РОБТ.- 2005.- №6.-С. 22-24.
4. Штернагель Й.К., Ресслер У., Баклашов И.В. Прогнозирование и экспериментальная проверка напряжённого состояния и разрушений обделки при микротоннелировании. -ТИМР, Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций.- 2005.- №3-4.-С. 20-24.
5. Баклашов И.В., Штернагель Й.К. Статические расчёты в технологии микротоннелирования на современном этапе. -Строительная инженерия.- 2005.- №11.-С. 36-41.

Подписано в печать 17.01.06.

Формат 60 x 90/16

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ № 4

---

Типография Московского государственного горного университета,

Москва, Ленинский проспект, 6

2006A

4040

■-4040