

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ПОРОД НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРЕПИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

*Деев П.В., Цуканов А.А.*

*Тульский государственный университет, г.Тула*

**Ключевые слова:** массив пород, горная выработка, крепь, напряженное состояние.

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования влияния границы раздела пород с разными деформационными характеристиками на напряженное состояние крепи горной выработки. Получены зависимости максимальных напряжений, возникающих в бетонной крепи, от положения границы раздела относительно выработки и отношения модулей деформации контактирующих слоев пород. В качестве инструмента расчета используется метод, основанный на аналитическом решении соответствующей плоской контактной задачи теории упругости. Приводятся примеры расчета.

## INFLUENCE OF ROCK INTERFACE ON STRESS STATE OF MINE ROADWAY SUPPORT

*Deev P.V., Tsukanov A.A.*

*Tula State University, Tula*

**Keywords:** rock mass, mine roadway, support, stress state.

**Abstract.** The influence of the interface of rocks with different deformation properties on the stress state of a mine roadway support is studied. The dependences of maximal stresses in the concrete lining on the location of the interface relatively to the mine roadway and the ratio of the deformation moduli of the rocks are obtained. The method based on the analytical solution of the corresponding plane contact problem of the theory of elasticity is used. Examples of the design are given.

При расчете крепи горных выработок и обделок тоннелей, как правило, используется упрощенная модель массива пород, не учитывающая реальных особенностей его строения. Так, существующие аналитические методы расчета подземных сооружений [1, 2] в качестве модели массива принимают однородную изотропную линейно-деформируемую среду, что значительно упрощает решение соответствующих контактных задач. В то же время в определенных условиях влияние особенностей строения массива пород может оказаться весьма существенным и привести к значительному росту нагрузки на сооружение, разрушению крепи и даже обрушению выработки.

Методы численного моделирования, в частности, получивший наибольшее распространение метод конечных элементов, позволяют использовать модели, учитывающие широкий спектр реальных характеристик вмещающего массива пород. Однако применение указанных методов для выполнения многовариантных расчетов в научных и практических целях

сталкивается со значительными трудностями, связанными с особенностями формирования расчетной схемы и необходимости проверки достоверности получаемых результатов. Определение условий, при которых реальные особенности массива будут оказывать значительное влияние на напряженное состояние подземных конструкций, а также оценка степени этого влияния, являются задачами, имеющими большое значение для горного дела и строительства.

Одной из особенностей горного массива, способной оказать влияние на напряженное состояние крепи выработок, является его неоднородность. Наличие вблизи выработки слоев слабых пород может привести к росту напряжений в подземной конструкции, поэтому в некоторых случаях данный фактор необходимо учитывать при расчете крепи. В работах [3, 4] были предложены методы учета влияния неоднородного строения массива пород на напряженное состояние обделок круговых тоннелей. Для оценки напряженного состояния крепи выработки произвольного поперечного сечения, испытывающей влияние границы раздела пород с разными деформационными характеристиками, на кафедре механики материалов ТулГУ разработан метод расчета [5], в основе которого лежит решение плоской задачи теории упругости о напряженном состоянии некругового кольца, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой среде, состоящей из двух полубесконечных областей с общей прямолинейной границей (рис. 1).

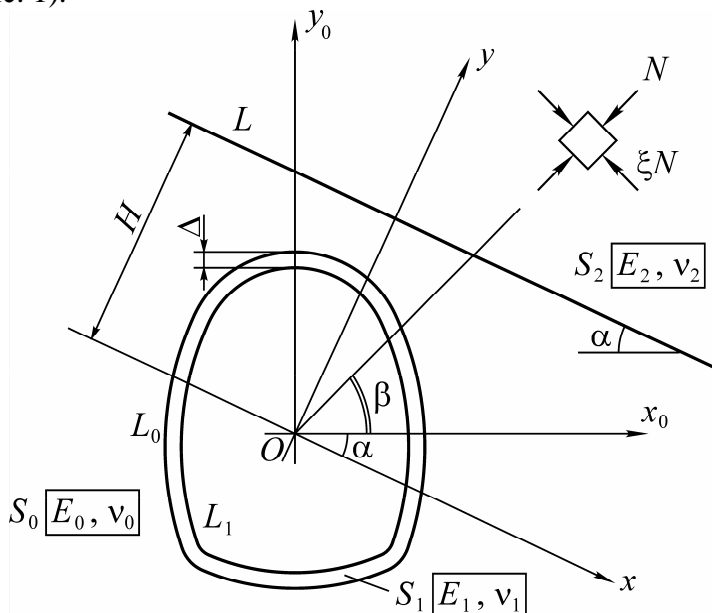


Рис. 1. Схема плоской задачи теории упругости, решение которой положено в основу используемого метода расчета

Крепь горной выработки моделируется кольцом  $S_1$ , подкрепляющим отверстие в полуплоскости  $S_0$ , имеющей общую границу  $L$  со средой  $S_2$ . В средах  $S_0$  и  $S_2$  имеется начальное поле напряжений, характеризующееся

параметрами  $N$ ,  $\xi$ ,  $\beta$ . Коэффициент  $\alpha^*$  введен для учета влияния отставания возведения крепи от забоя выработки при проходке [6]. Деформационные свойства рассматриваемых сред  $S_j$  ( $j = 0, 1, 2$ ) характеризуются модулями деформации  $E_j$  и коэффициентами Пуассона  $\nu_j$ . На линиях контакта  $L$  и  $L_0$  выполняются условия непрерывности векторов смещений и напряжений. Решение задачи получено с использованием теории функций комплексного переменного, в частности, комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили, конформного отображения и свойств интегралов типа Коши [7].

Ниже в качестве примера рассмотрена крепь горной выработки, поперечное сечение которой представлено на рисунке 2. Распределение напряжений в подземной конструкции получено при следующих исходных данных:  $E_0 = 10000$  МПа,  $E_1 = 20000$  МПа,  $E_2 = 1000$  МПа,  $\nu_0 = 0,3$ ;  $\nu_1 = 0,2$ ,  $\nu_3 = 0,35$ . Поле начальных напряжений принято гидростатическим ( $\xi = 1$ ), граница раздела пород, образующая с горизонталью угол  $\alpha = 45^\circ$ , проходит ниже и правее выработки, расстояние между центром выработки и границей составляет  $H = 2,4$  м.

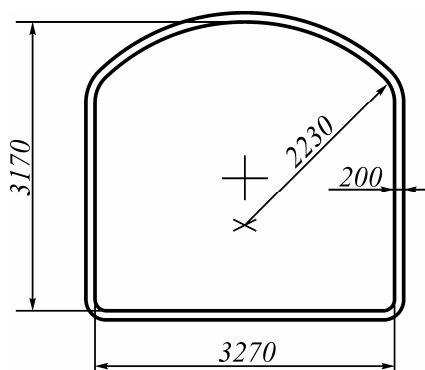


Рис. 2. Поперечное сечение крепи горной выработки

На рисунке 3 показаны эпюры нормальных тангенциальных напряжений  $\sigma_\theta/N\alpha^*$  на внутреннем и наружном контурах поперечного сечения крепи. Для сравнения пунктиром даны напряжения в крепи выработки, пройденной в однородном массиве, соответствующие значения напряжений приведены в скобках. Как видно из представленных результатов расчета, наличие границы раздела пород приводит к двукратному увеличению максимальных сжимающих напряжений в крепи и заметному изменению напряженного состояния практически всей подземной конструкции.

С целью определения условий, при которых граница раздела пород оказывает максимальное влияние на напряженное состояние крепи, выполнены многовариантные расчеты, в ходе которых изменялись угол наклона и положение границы относительно выработки, расстояние между центром выработки и границей и отношение модулей деформации контактирующих слоев пород. По результатам расчета построены

зависимости максимальных сжимающих и растягивающих напряжений в крепи от рассматриваемых факторов, представленные на рисунке 4.

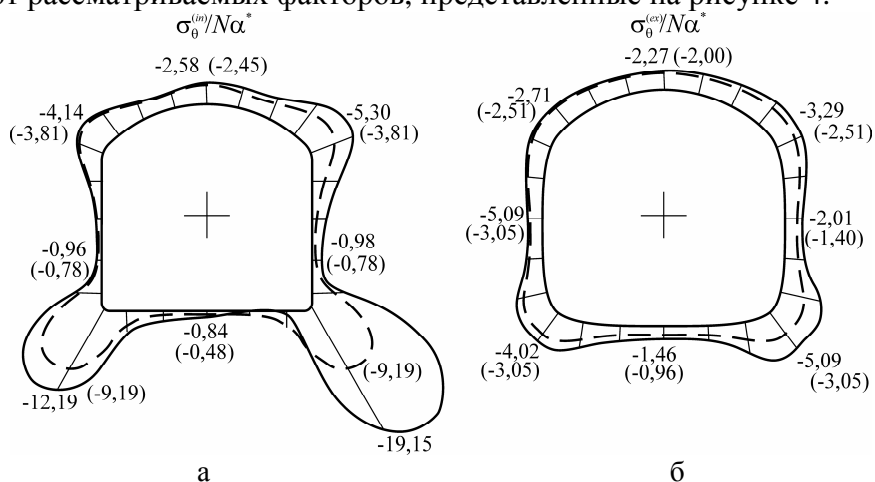


Рис. 3. Напряжения на внутреннем (а) и наружном (б) контурах поперечного сечения крепи

На рисунке 4 а даны зависимости максимальных сжимающих и растягивающих напряжений  $\sigma_{\theta}/N\alpha^*$  от угла наклона границы раздела к горизонтали  $\alpha$ . При изменении угла наклона граница поворачивалась относительно центра выработки. Таким образом, при  $\alpha = 0$  граница была расположена над выработкой, при  $\alpha = 90^0$  – справа от выработки, при  $\alpha = 180^0$  – под выработкой. Цифрами 1, 2, 3 обозначены зависимости максимальных сжимающих напряжений от угла  $\alpha$ , соответствующие случаям  $H = 2,4; 3,0; 4,0$ м, цифрами 4, 5 – зависимости максимальных растягивающих напряжений при  $H = 2,4$  и  $3,0$ . При  $H = 4,0$  м растягивающих напряжений в крепи не возникает. На рисунке 4 б, в представлены зависимости максимальных напряжений  $\sigma_{\theta}/N\alpha^*$  от расстояния до границы раздела  $H$  и отношения модулей деформации пород  $E_2/E_0$ . Цифрами обозначены зависимости, соответствующие следующим случаям: «1» –  $\alpha = 135^0$ , сжимающие напряжения; «2», «3» –  $\alpha = 180^0$ , сжимающие и растягивающие напряжения соответственно. Горизонтальная пунктирная линия соответствует максимальным напряжениям в крепи выработки, расположенной в однородном массиве.

Выполненные расчеты показали, что наиболее неблагоприятными являются случаи, когда граница раздела проходит ниже выработки горизонтально ( $\alpha = 180^0$ ) или под углом  $45^0$  к горизонтали ( $\alpha = 135^0$ ). В первом случае в лотковой части крепи возникают растягивающие напряжения, опасные для бетонной конструкции, во втором случае наблюдается значительный рост сжимающих напряжений в месте соединения лотка со стенками крепи (см. рис. 3).

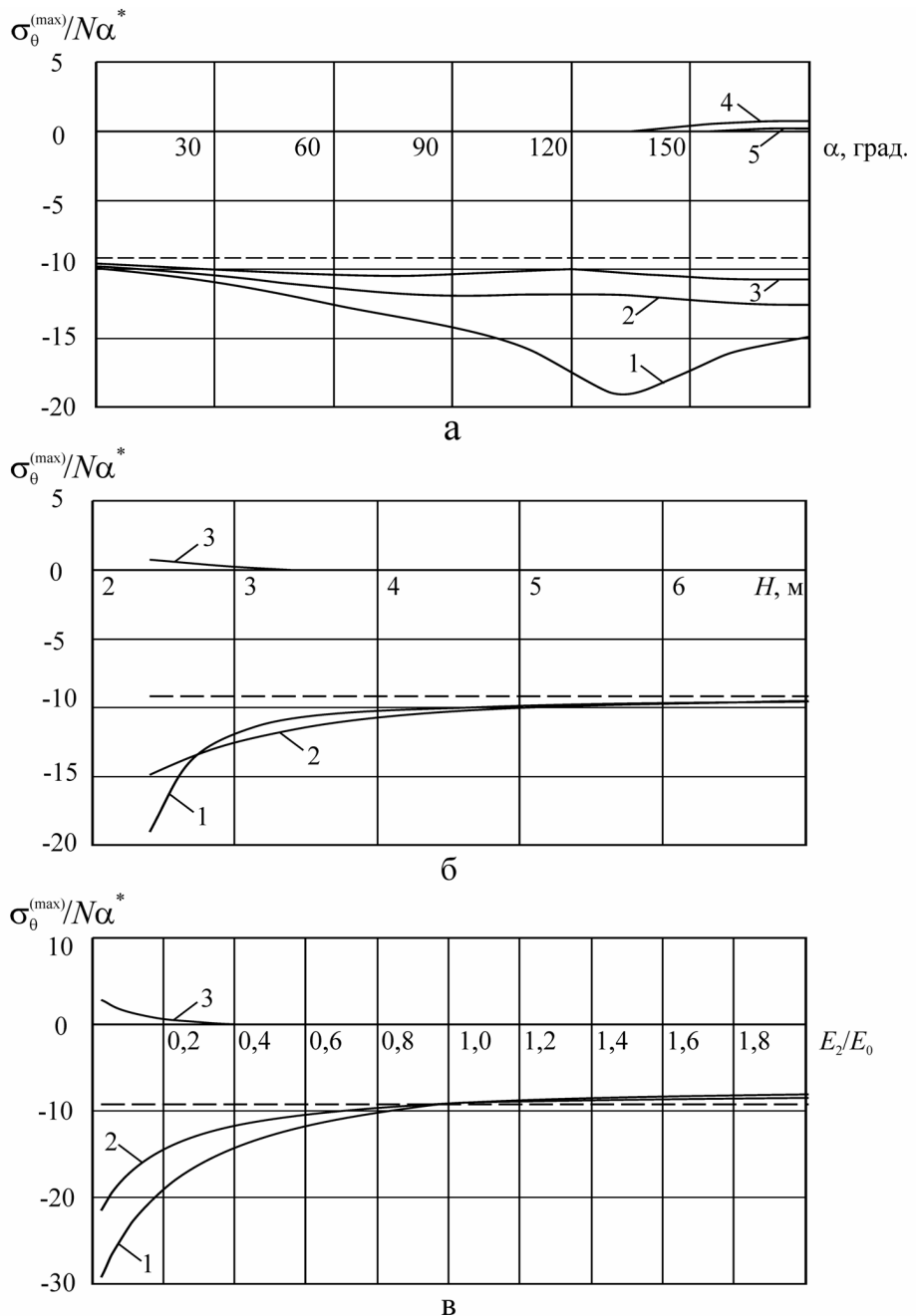


Рис. 4. Зависимости максимальных сжимающих и растягивающих напряжений от угла наклона границы раздела (а), расстояния до границы (б) и отношения модулей деформации пород (в)

Согласно зависимостям, представленным на рисунке 4 б, влияние границы раздела пород на напряженное состояние крепи становится заметным в случае, если расстояние между границей и центром сечения выработки не превышает 6 м, что составляет примерно 2 характерных размера сечения.

Растягивающие напряжения в крепи выработки не возникают, если расстояние до границы превышает 3,5 м.

Из зависимостей, представленных на рисунке 4 в, следует, что отношение модулей деформации контактирующих слоев оказывает существенное влияние на величину максимальных напряжений в крепи выработки. При низком модуле деформации слоя, лежащего в почве выработки, величина максимальных сжимающих напряжений в крепи может в 3 раза превышать максимальные напряжения, полученные в случае однородного массива. Если же модуль деформации пород почвы выработки выше модуля деформации пород остального массива, имеет место незначительное снижение напряжений в подземной конструкции.

Выполненные исследования показали, что наличие вблизи выработки слоя пород с модулем деформации меньшим, чем у пород вмещающего массива, может привести к существенному росту напряжений в крепи выработки, при этом величина и характер влияния границы раздела пород в значительной мере зависят от взаимного расположения границы раздела и выработки.

#### **Список литературы**

1. Анциферов С.В., Саммаль А.С., Деев П.В. Развитие теории и аналитических методов расчета подземных сооружений на сейсмические воздействия // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2017. № 3 (29). С. 13-14.
2. Фотиева Н.Н., Булычев Н.С., Фирсанов Е.С., Деев П.В. Оценка несущей способности обделок параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 3. С. 359-363.
3. Фотиева Н.Н., Афанасова О.В. Расчет круговой крепи подземных сооружений в неоднородном массиве на действие собственного веса пород // Подземное и шахтное строительство. 1991. № 2. С. 22.
4. Саммаль А.С., Анциферов С.В., Павлова Н.С. Математическое и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива, сложенного двумя типами пород, в окрестности напорной круговой выработки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 7. С. 37-44.
5. Деев П.В., Петрухин М.А., Цуканов А.А. Расчет крепи капитальной горной выработки, расположенной в тектонически активном районе // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Том 5. – № 1. – 2018. – С. 31-36.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учеб. для вузов. – 2-е изд. – М.: Недра, 1994. – 270с.
7. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708с.

#### **References**

1. Antsiferov S.V., Sammal A.S., Deev P.V. Development of the theory and analytical methods for calculating underground structures for seismic impacts // Natural and man-made risks. Safety of structures. 2017. № 3 (29). P. 13-14.
2. Fotieva N.N., Bulychev N.S., Firsanov E.S., Deev P.V. Evaluation of the bearing capacity of parallel tunnel linings of arbitrary cross-section // Mining information and analytical Bulletin. 2009. № 3. P. 359-363.

3. Fotieva N.N., Afanasova O.V. Calculation of the circular support of underground structures in an inhomogeneous array on the effect of the own weight of rocks // Underground and mine construction. 1991. № 2. P. 22.
4. Sammal' A.S., Antsiferov S.V., Pavlova N.S. Mathematical and computer modeling of the stress-strain state of a mountain massif composed of two types of rocks in the vicinity of a pressure circular mine // News of higher educational institutions. Mining journal. 2018. № 7. P. 37-44.
5. Deev P.V., Petruhin M.A., Tsukanov A.A. Calculation of the support of a capital mining mine located in a tectonically active area // Fundamental and applied issues of mining Sciences. – Vol. 5. – № 1. – 2018. – P. 31-36.
6. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures: textbook. for universities. – 2nd edition. – М.: Nedra, 1994. – 270p.
7. Muskhelishvili N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. – М.: Science, 1966. – 708p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Деев Петр Вячеславович</b> – доктор технических наук, доцент, dodysya@yandex.ru	<b>Deev Petr Vyacheslavovich</b> – doctor of technical sciences, associate professor, dodysya@yandex.ru
<b>Цуканов Александр Александрович</b> – аспирант, dekartkeyn@mail.ru	<b>Tsukanov Alexander Alexandrovich</b> – postgraduate student, dekartkeyn@mail.ru
Тульский государственный университет, Тула, Россия	Tula State University, Tula, Russia

*Получена 10.12.2020*