

**К ВОПРОСУ О ВОЗНИКНОВЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

В роботі розглянуто питання про виникнення та існування природного напруженого стану у гірському масиві. Зроблено аналіз підходів до пояснення виникнення горизонтальних напружень під дією вертикальних зусиль. Підкреслено некоректність пояснення цього явища з позицій класичної теорії пружності. Вказано можливі напрямки ймовірного пошуку теорій, що можуть дати відповідь на питання про виникнення горизонтальних розтягуючих напружень під дією вертикальних навантажень.

**ON THE TENSILE STRESS CREATION IN STRATA**

Present paper is devoted to the tensile stress creation problem caused by compress and shear efforts. Made detail problem analyze to explanation of tensile stress creation caused by compress efforts. Emphasized on non-correct approach to phenomena explanation with classic elastostatic position. Pointed out possible directions to solve the problem of tensile stress creation caused by compress efforts.

Увеличение добычи полезных ископаемых тесно связано с увеличением интенсивности ведения горных работ. Знание и умение определять напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зоне ведения очистных работ позволяет обоснованно определять их темпы и направления .

Появление дополнительных напряжений в результате ведения горных работ существенно меняет и без того сложное напряженное состояние. Действие же горизонтальных растягивающих напряжений неизбежно приводит к появлению трещин отрыва уменьшающих несущую способность целиков и других охраняемых сооружений, приводит к дополнительным нагрузкам на крепь и снижает темпы ведения очистных работ.

Проблема обоснования появления горизонтальных растягивающих напряжений под действием сжимающих нагрузок давно привлекает исследователей [1-7, 9-2].

Авторы этих работ применяли для объяснения этого эффекта весь имеющийся в их распоряжении арсенал методов от классической механики твердого тела вплоть до физики твердого тела.

Представляется интересным и актуальным рассмотреть более подробно природу их возникновения и проанализировать корректность объяснения их появления с позиций классической теории упругости.

Земная кора в целом и верхняя ее часть, в которой ведутся горные работы, подвержена действию различных механических силовых полей, т.е. находится в некотором напряженном состоянии. Сила тяжести порождает вертикальную составляющую  $\sigma_y$  гравитационного силового поля, которая численно равна

$$\sigma_y = \gamma \cdot H$$

где:  $\gamma$  – объемная масса горной породы;  $H$  – глубина залегания горной породы от дневной поверхности

Совокупность гравитационных напряжений с учетом изменения глубины и плотности пород, а также прочностных и деформационных их свойств образуют поле гравитационных напряжений. В механике горных пород гравитационные силы принято именовать горным давлением. Принято считать при этом, что:

- напряженное состояние массива горных пород однородно и имеет статический характер; породы, находясь длительный период под напряжением должны проявить свойство релаксации. Это приводит к равенству по величине компонент напряжений. Горизонтальная компонента напряжений при этом равна

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda \cdot \gamma H$$

где:  $\sigma_x, \sigma_z$  – величины горизонтальных напряжений;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора ( отношение напряжений возникающих в результате реакции со стороны вмещающих пород к гравитационным)

$$\lambda = \frac{\sigma_R}{\sigma_y}$$

Если относительно вертикальных напряжений в горных массивах сложилось единое мнение о гравитационной природе горного давления, то относительно горизонтальных напряжений имеются самые противоречивые мнения.

Наиболее распространенной формулой расчета коэффициента бокового распора является формула, полученная А.Н. Динником [12], для упругой сплошной изотропной среды исходя из предположения о наличии сжимающих горизонтальных напряжений

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

где:  $\nu$  – коэффициент поперечной деформации породы.

Выражение (1) получено из условия равенства нулю поперечной деформации, т.е. из предположения, что горный массив зажат в обойме, материал стенок которого имеет абсолютную жесткость. Это обеспечивает изменение значения бокового распора от нуля (безнапорного) до единицы (гидростатического). Принято считать, что случай гидростатического распределения напряжений может быть реализован для монолитных пород на большой глубине, позволяющей достичь перехода горной породы в пластическое состояние.

Наряду с существованием гидростатических напряженных состояний, объяснимых с позиций А.Н. Динника, обнаружены случаи существования горизонтальных напряжений, превышающих вертикальные в 2-8 раз. Эти горизонталь-

ные напряжения называют тектоническими, считая, что они порождены ротационными движениями Земли, приливными волнами в литосфере, сейсмическими процессами, движениями магматических масс.

Подводя итоги проблеме о возникновении горизонтальных напряжений в горных породах акад. М.В. Курленя [9] пишет «О механизме формирования повышенных тектонических напряжений в верхних горизонтах земной коры в геологической литературе высказан ряд гипотез, что подчеркивает неясность природы рассматриваемого феномена. Стало ясно: напряжения, обусловленные тектоническими силами рассчитать невозможно. Их необходимо измерять».

Анализируя результаты испытаний горных пород на сжатие, нельзя не обратить внимание на следующее обстоятельство. Под термином “прочность при сжатии, предел прочности при одноосном сжатии” понимают те сжимающие напряжения, при которых материал начинает разрушаться, т.е. разделяться на части по трещинам, теряет свою несущую способность. Как следует из теоретической кривой зависимости энергии связи молекул разрушаемого тела, для разрушения тела необходимо растягивающее напряжение большей величины, чем минимальная энергия молекулярного притяжения. При сжатии межмолекулярные силы отталкивания растут, увеличивается потенциальная энергия упругой деформации, но минимум энергии необходимой для преодоления сил связи не возникает.

Понятно, что процесс растяжения приводит к такому ослаблению сил молекулярных связей, при которых не происходит их рекомбинация и отрыв становится устойчиво фиксируемым явлением. Поскольку на практике при сжатии горных пород наблюдается разделение целого на части, то напрашивается естественный вывод о том, что истиной первопричиной этого являются растягивающие напряжения, возникающие при действии сжимающих сил.

Многие исследователи [1-7, 9] указывали, что судя по характеру деформирования в нагруженном твердом теле возникают растягивающие напряжения которые не обнаруживаются методом сечений, в частности, разрушение отрывом при сжатии не может быть объяснено с позиций классической теории упругости. Все они осознали необходимость создания такой модели процесса деформирования твердых тел которая могла бы объяснить причину возникновения растягивающих напряжений при сжимающих нагрузках. В этом направлении следует отметить работу Б.К. Нореля [3], где собран и получен в лабораторных испытаниях обширный экспериментальный материал, подтверждающий разрушение отрывом как в естественных условиях так и на образцах. Попытки объяснить наблюдаемые эффекты в рамках теории упругости не привели к успеху.

Непреодолимым постулатом теории упругости стало утверждение, согласно которому поперечные деформации при сжатии возникают без наличия соответствующих напряжений.

В работах сотрудников ИГТМ НАНУ Кирничанского Г.Т. и Усаченко Б.М. [6, 7] выход из затруднения и объяснения возникновения растягивающих напряжений под действием сжимающих, находился в создании специальной фе-

номенологической модели процесса разрушения, основанной на термофлуктуационной теории прочности твердых тел [4]. В работе Одинцова В.Н. [5] для объяснения отрывного разрушения горных пород применен деформационный критерий. В условиях пространственного напряженно-деформированного состояния главная компонента деформации растяжения может быть принята за критерий разрушения горной породы при действии сжимающих напряжений. При достижении предельной деформации растяжения в породе происходит отрыв.

Основным недостатком рассматриваемого подхода автор считает отсутствие учета микроструктуры горной породы, эффект в которой, по его мнению, является причиной отрыва при сжатии. Так авторы работ [1,5-9,13] рассматривая эффект возникновения растягивающих напряжений под действием сжимающих нагрузок полагают, что это явление не может быть объяснено с позиций классической теории упругости.

Однако появляются работы [10,11] авторы которых в рамках классической теории упругости пытаются обосновать концепцию появления растягивающих напряжений под действием сжимающих нагрузок. Для анализа возможности или невозможности появления растягивающих напряжений тщательно рассмотрим условия равновесия твердого тела. Так из необходимого и достаточного условия равенства нулю вектора сил и главного момента сил вытекает, что компоненты тензора напряжений должны удовлетворять, в общем случае, трем дифференциальным условиям равновесия и трем условиям на поверхности. В тензорном виде это имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{,m}{}^{mk} + \rho F^k &= 0 \\ T_n{}^m &= \sigma^{km} \cdot n_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Принимается, что соглашение о суммировании по повторяющимся индексам выполняется. Любое состояние среды удовлетворяющее уравнениям равновесия в объеме и на поверхности, называется статически возможным [8]. Выполнение этих уравнений является необходимым условием равновесия. Для определения истинного напряженно-деформированного состояния этих уравнений недостаточно, то есть должны быть сформулированы физические законы, определяющие поведение среды под действием сил. Все эти соотношения представляют собой полную систему уравнений теории упругости в напряжениях. Они выражают тот факт, что из всех статически возможных напряженно-деформированных состояний, фактически в упругом теле реализуется такое состояние, которому соответствуют деформации удовлетворяющие условиям сплошности.

В случае отсутствия объемных сил условие на поверхности через компоненты тензора напряжений, для плоского случая, можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} P_{nx} &= \sigma_x \cdot n_x + \tau_{xy} \cdot n_y \\ P_{ny} &= \tau_{yx} \cdot n_x + \sigma_y \cdot n_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $P_{nx}$ ,  $P_{ny}$  – это проекции вектора усилий приложенных к поверхности рассматриваемого тела на произвольной площадке с нормалью  $n$ , на оси  $OX$  и  $OY$  соответственно;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  – компоненты тензора напряжений внутри тела;  $n_x$ ,  $n_y$  – косинусы углов между нормалью к поверхности  $n$  и соответствующими осями координат.

Уравнение (2,3) представляет собой уравнение равновесия для элементарного объема тела, которые выполняются и для упругой и для пластической модели деформирования. Напряженно-деформированное состояние любого изотропного и однородного тела, несомненно, должно им удовлетворять. Это значит, что этим телом может быть и металл и горная порода.

Поскольку параметры напряженно-деформированного состояния тела являются внутренними характеристиками рассматриваемого тела и непосредственное их измерение сильно затруднено или даже невозможно прямыми методами, то возникает желание для объяснения того или иного механизма деформирования принять гипотезу о наличии того или иного напряжения и закона его распределения.

Возникает вопрос, а если критерий, который позволит отбросить ложные посылки о наличии того или иного напряжения от реально в нем возникающих? Ответ утвердительный, да есть и этим критерием является выполнение условий равновесия на поверхности рассматриваемого тела, который известен как условие на поверхности. Другими словами, вы можете принять любые гипотезы о наличии и распределении тех или иных напряжений, но они непременно должны удовлетворять условиям на поверхности (3). Проверим, выполняется ли этот критерий при принятии гипотезы о наличии растягивающих горизонтальных напряжений при наличии сжимающих и касательных усилий на его поверхности.

Рассмотрим прямоугольный образец горной породы высотой  $H$  и шириной  $B$  находящейся под действием сжимающих усилий  $P_y$  и касательных напряжений  $T_{xy}$ , при этом выбираем правую систему координат с началом в левом нижнем углу образца. Будем полагать, что при этом возникают растягивающие напряжения  $\sigma_x$ . (смотри рис. 1а)

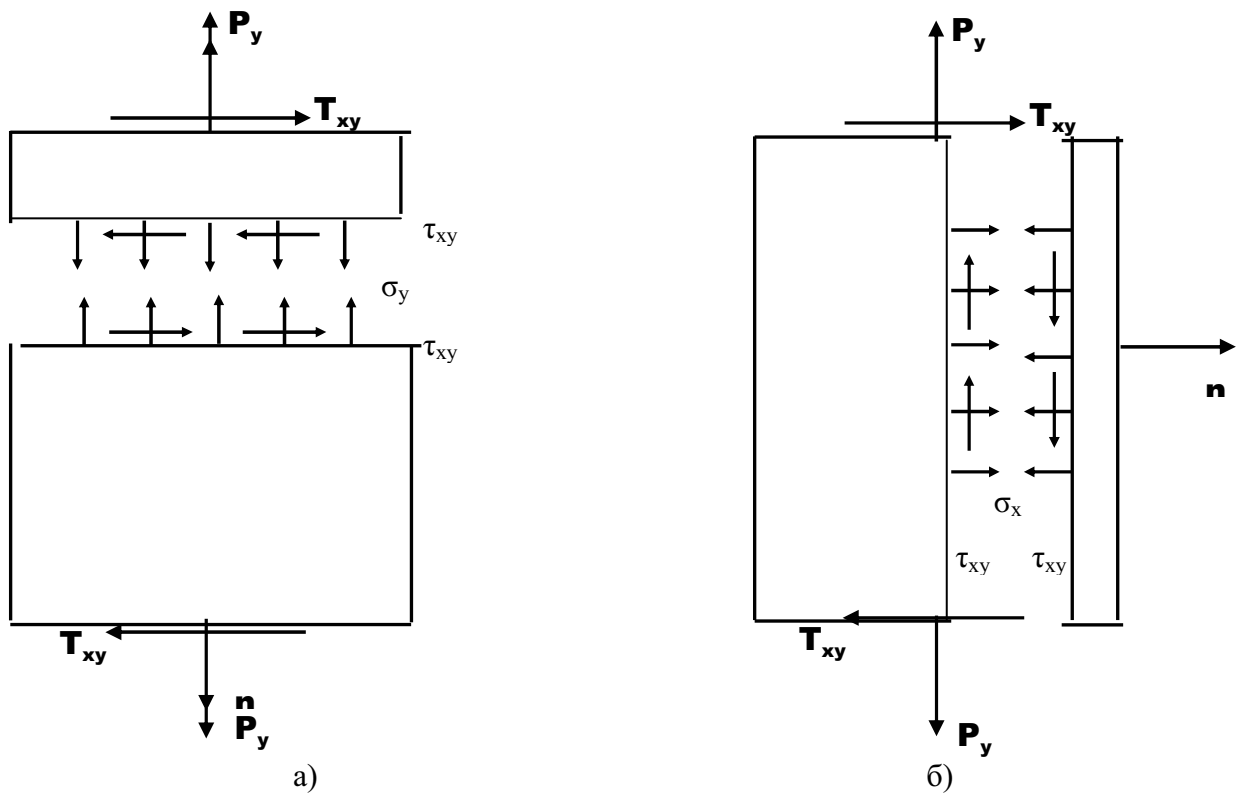


Рис. 1 – Реализация метода сечения для образца горной породы: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости.

Посмотрим, удовлетворится ли при этом условие на поверхности (3). Рассмотрим торец образца  $y=N$ . При этом нормаль  $n$  к этой площадке будет параллельна оси  $OY$ , и система (2) примет вид

$$\begin{cases} P_{nx} = \sigma_x \cdot \cos(90^0) + \tau_{xy} \cdot \cos(0^0) \\ P_{ny} = \tau_{xy} \cdot \cos(90^0) + \sigma_y \cdot \cos(0^0) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_{nx} = \tau_{xy} \\ P_{ny} = \sigma_y \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T_{nx} = \tau_{xy} \\ P_{ny} = \sigma_y \end{cases}$$

Что соответствует приложенным нагрузкам. Рассмотрим площадку  $x=B$ . Запишем условие на поверхности для этой площадки

$$\begin{cases} P_{nx} = \sigma_x \cdot \cos(0^0) + \tau_{xy} \cdot \cos(90^0) \\ P_{ny} = \tau_{xy} \cdot \cos(0^0) + \sigma_y \cdot \cos(90^0) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_{nx} = \sigma_x \\ P_{ny} = \tau_{xy} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T_{nx} = \sigma_x \\ P_{ny} = \tau_{xy} \end{cases}$$

Учитывая, что к боковой поверхности не приложено никаких усилий, т.е.  $P_{ny}=T_{nx}=0$ , окончательно получим

$$\begin{cases} 0 = \sigma_x \\ 0 = \tau_{xy} \end{cases}$$

Таким образом, наше предположение о появлении растягивающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  под действием сжимающих и касательных усилий, распределенных по любому закону, не подтвердилось. Это означает лишь то, что приняв их наличие мы нарушаем необходимые условия равновесия. А если это так то теперь мы вынуждены решать несколько иную задачу. Уравнения равновесия (2), при этом должны учитывать силы инерции и решение исходной задачи будет не таким тривиальным.

Несмотря на упоминание многих авторов о невозможности объяснения появления растягивающих напряжений под действием сжимающих и касательных усилий в рамках классической теории упругости появляются работы [10, 11] авторы которых пытаются их обосновывать, что, как показано выше, делать недопустимо.

Выход из положения авторы [6, 7] ищут в применении моделей деформирования отличных от моделей классической теории упругости. Так в работе [5] в качестве первопричины появления трещин отрыва и соответственно растягивающих напряжений автор полагает можно считать: структурную неоднородность материала; наличие пор и мягких включений; неоднородности типа «микротрещин сдвига»; неоднородность поля напряжений вызванных внутренними напряжениями в зернах минерала.

Развитие трещин связывается с образованием наведенной неоднородности материала в кончике трещины (крейз-зоны).

Так из линейной механики разрушения следует, что для предельно острой трещины максимальное напряжение становится бесконечно большим даже при конечных значениях приложенных напряжений. Следовательно, прочность при растяжении должна быть малой, что явно противоречит реальному поведению материала. Объяснение этого противоречия следует искать в том, что твердое тело, которое мы считаем сплошной средой, на самом деле им не является, а имеет зернистое строение. Тогда очевидно, что если элементарное перемещение при растяжении по величине близко к характерному размеру кристаллической решетки, то закон Гука не справедлив, так как вступают в действие силы межатомного взаимодействия, которые он не учитывает.

Кроме того, при приложении нормального макроскопически распределенного напряжения его распределение внутри твердого тела неоднородно. Как правило, существуют отдельные участки с высоким локальным напряжением, обусловленным концентрацией напряжений от различных неоднородностей структуры. Для концентраторов напряжений с характерной длиной близкой размеру кристаллической решетки следует учитывать тепловые колебания атомов, так как они способствуют возникновению разрушения и текучести. В области возникновения локальных концентраций тепловые колебания дают эффект возрастания локального напряжения [14]. Изучения процессов разрушения и текучести на этом уровне приводят к особенностям применения уравнений классической термодинамики. Обычно, классическую термодинамику применяют ко всей замкнутой системе. Однако если в интервале времени, когда один атом преодо-

леват энергетический барьер (происходит процесс разрушения кристалла), а в других частях этой системы подобного процесса не происходит, то в качестве системы необходимо рассматривать только одну локальную область в районе преодоления барьера. Понятно, что в этом случае необходимо пользоваться не уравнениями классической, а неравновесной термодинамики [14].

Основная особенность рассмотрения явлений такого масштаба состоит в учете неоднородностей, размерами которых классическая механика пренебрегает.

Классическая механика континуума опирается на основную идею: все материальные тела обладают непрерывными массовыми плотностями. В случае рассмотрения явлений или видов нагружений соизмеримых с размерами отдельных кристаллов это предположение нарушается. Кроме того, в подтверждение сказанного можно добавить, что если ищется реакция тела на внешнее физическое воздействие, характерный размер которого соизмерим со средним со средним размером зерна или молекулы (устье трещины), то атомные или молекулярные составляющие тела возбуждаются индивидуально.

Очевидно, что в этом случае классическая механика континуума, с ее определением материальной точки, уже не будет отвечать масштабу рассматриваемых явлений.

Таким образом, научное обоснование появления растягивающих напряжений и, соответственно, механизма разрушения трещинами отрыва может стать серьезной альтернативой широко распространенному механизму разрушения от касательных напряжений. Очевидно, что этот эффект не может быть объяснен использованием методов классической термодинамики и, по-видимому, необходимо использовать постулаты неравновесной термодинамики учитывающей массовые и тепловые потоки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций разрыва. – М.: Иностран. лит., 1955. – 444 с.
2. Введение в механику скальных пород/Под. Ред.Х.Бока. – М.: Мир, 1983. – 276 с.
3. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. – М.: Наука, 1983. – 128 с.
4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
5. В.Н. Одинцов. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. М.: ИПКОН РАН, 1996, - 166 с.
6. Криничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. Киев, Наук. думка, 1989. – 184 с.
7. Б.М. Усаченко. Геотехника подземно добычи гипса. Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с.
8. А.И.Лурье. Пространственные задачи теории упругости. М.: Гостехиздат, 1955 – 491 с.
9. Курленя М.В., Кулаков Г.И. Напряженное состояние породных массивов в верхних слоях земной коры // ФТПРИ, - 1998. - №3 – с. 3-9.
10. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Концепция расчета горизонтальных напряжений в горном массиве //Геотехническая механика, выпуск №5. – Днепропетровск: Полиграфист, 1998. – с.102-108.
11. Васильев Д.Л. Углы скола горных пород при одноосном сжатии//Сб. научн. тр. НТА Украина – 1999. - № 6, т.4 – с.22-23.
12. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи круглой шахты //Инженерный работник. – 1926. - №3. – с.1-12.
13. А.К. Эринген.Теория микрополярной упругости./Разрушение ред. Г.Либовец, т.2, М.: Мир, 1975, с.648-750.
- 14.Такео Екобори. Научные основы прочности и разрушения материалов.Киев.:Наукова думка,1978.-352 с.