

УДК 622.281.74

А.О. НОВИКОВ, канд. техн. наук, доцент (ГВУЗ «ДонНТУ»), Донецк, Украина

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД, АРМИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ АНКЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ.

В статье изложены результаты лабораторных испытаний на обобщенное растяжение породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам.

У статті викладені результати лабораторних випробувань на узагальнене розтягування порідно-анкерних конструкцій, армованих за різними схемами.

In article results laboratory tests for the generalised stretching rock-anchor design, reinforced on various schemes are stated.

В условиях ежегодного повышения мировых цен на нефть и газ, запасы которых ограничены, уголь является главным энергоносителем в Украине, гарантом ее экономической независимости. От стабильности работы угольной промышленности во многом зависит работа базовых отраслей экономики – электроэнергетики и металлургии. Эффективность деятельности угольных шахт в первую очередь определяется себестоимостью угля, в которой до 45 % составляют затраты на поддержание горных выработок. Одним из перспективных направлений снижения этих затрат является внедрение новых технологий крепления выработок с использованием анкерных систем (АС). Это позволяет в 5-10 раз уменьшить расход металлопроката, бетона, леса; в 3-5 раз повысить производительность работ при креплении выработок; в 2-3 раза повысить темпы проходки; вдвое сократить затраты на крепление и поддержание выработок в рабочем состоянии в период их эксплуатации.

В настоящее время объем применения АС для крепления выработок на шахтах Украины не превышает 1,0 %. Основной причиной сдерживающей широкое применение АС является недостаточная изученность влияния, создаваемых породно-анкерных конструкций, на геомеханические процессы, происходящие во вмещающем выработку породном массиве. Это, в свою очередь приводит к не пониманию роли АС в процессе поддержания выработки, не позволяет достоверно ограничить область их применения, разработать научно обоснованные нормы проектирования.

В этой связи, изучение закономерностей деформирования породных массивов, армированных с использованием анкерных систем для обеспечения устойчивости горных выработок является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность и безопасность горных работ.

Задачей исследований было изучение предельного и запредельного напряженно-деформированного состояния породно-анкерных конструкций при разгрузке, в условиях обобщенного растяжения.

Исследования проводились на установке для трехосного сжатия пород в ИФГП НАН Украины. Из цементно-песчаных смесей изготавливались кубические образцы с размером ребра 55 мм, которые моделировали участок породного массива объемом в 1 м³ с прочностью 30-50 МПа. Образцы армировались по различным пространственным схемам (рис.1). Укрепляющий эффект от анкеров обеспечивался силами сцепления цементно-песчаной смеси со стержнем анкера. Испытания на выдергивание металлической проволоки из затвердевшей смеси показали, что процесс извлечения стержня (вытягивание из образца) начинается при усилии от 93 до 121 Н, что обеспечивает соблюдение условия силового подобия.

Первоначально в образцах создавалось гидростатическое поле напряжений, имитирующее глубину заложения 800, 1200 и 1600 м. Затем, в направлении действия напряжений σ_3 производилась полная разгрузка с поддержанием величин напряжений σ_1 и σ_2 на первоначальном уровне. В дальнейшем, по специально разработанной программе рассчитывались средняя величина действующих напряжений, средние относительные деформации, величина остаточной прочности, предельные и остаточные относительные деформации в направлении разгрузки, относительное изменение объема, энергии изменения формы и объема, модули деформации, упругости, сдвига и спада. Для оценки характера разрушения горных пород, армированных различными пространственными схемами анкерования, использовался критерий Нодаи-Лоде.

Предельное состояние образцов определялось по одному из четырех ниже приведенных критериев:

- достижение максимального значения касательными напряжениями;
- превышение предельных относительных деформаций ε_1 при разгрузке образца;
- резкое снижение величины модуля сдвига;
- перегибу графика, характеризующего изменение относительного объема образца ($\Delta V/V$).

Результаты исследований представлены на рис. 2.

Как видно из (рис.2), все графики $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$, полученные при испытаниях породно-анкерных конструкций на обобщенное растяжение, имеют три характерных участка: участок равномерного всестороннего сжатия до напряжений, имитирующих заданную глубину, участок разгрузки в направлении анкерования до некоторого значения σ_3 , при котором происходит разрушение и участок до полной разгрузки от напряжений σ_3 (запредельное деформирование). Если параметры, характеризующие напряженно-

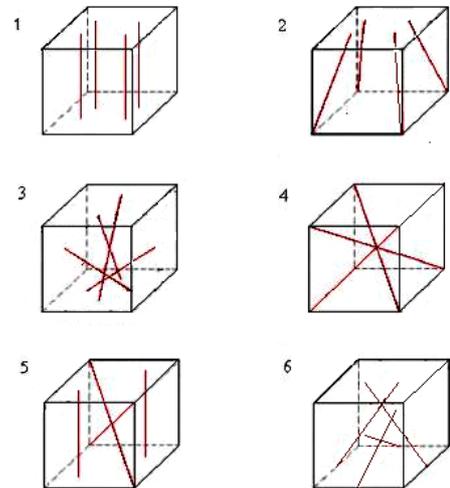


Рис.1 – Схемы армирования образцов

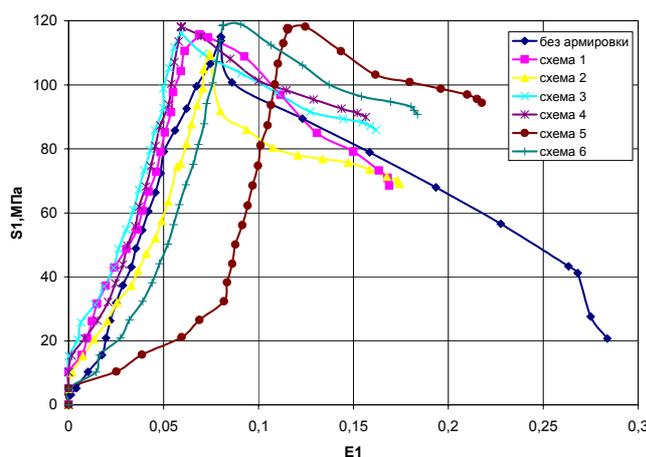


Рис.2 – Диаграммы «напряжение-деформация» для породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

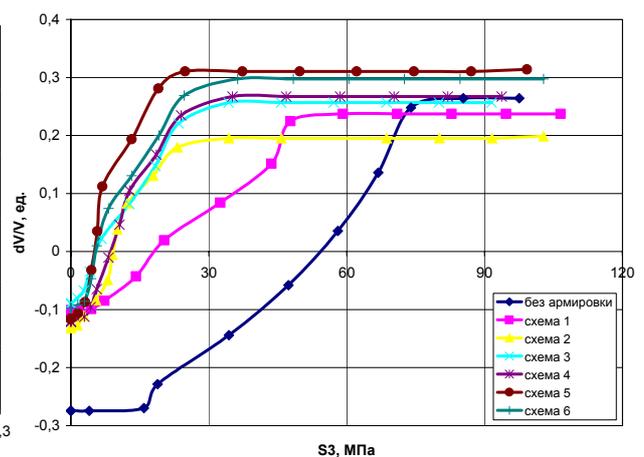


Рис. 3 – Графики изменения относительных объемных деформаций ($\Delta V/V$) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области запредельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

деформированное состояние породно-анкерных конструкций и пород без армировки при нагружении на первом участке существенно не отличаются, то при разгрузке, значения параметров, характеризующих предельное и особенно запредельное состояние (остаточная прочность) рознятся до 4,5 раз. Следует отметить, что предельное состояние породно-анкерных конструкций (точка перегиба графиков $(\Delta V/V) = f(\sigma_3)$ на рис.3) наступает при разгрузке по оси 3 на величину от 59 до 89 % от первоначальной, что существенно больше, чем для не армированной породы (37 %). При этом, для породно-анкерных конструкций, значения нормальных напряжений в 3,5 раза, а максимальных касательных напряжений – в 3,6 раза выше, чем для не армированной породы. Предельные относительные деформации для конструкций, армированных по схемам 3-6, до 2,1 раза выше, чем для не армированной породы (для конструкций, армированных по схемам 1 и 2, они на 26 % ниже). Значения модулей объемной деформации, сдвига и упругости для породно-анкерных конструкций в предельном состоянии снижаются до 1,7 раза по сравнению с соответствующими величинами этих же параметров до разгрузки, оставаясь до 1,5 раза меньше, чем для не армированной породы. Это говорит о более интенсивном увеличении жесткости и ослаблении структуры армированных пород в предельном состоянии. В предельном состоянии дилатансия породно-анкерных конструкций на 9...40 % меньше, чем для не армированных пород. Отношение величины энергии формоизменения к энергии изменения объема для породно-анкерных конструкций в предельном состоянии увеличивается в 18,7 раза, по сравнению с не армированной породой, что говорит о большей энергоемкости их разрушения и объясняется эффективной совместной работой породы и анкеров по противодействию разрушению.

О характере разрушения и последующего запредельного деформирования породно-анкерных конструкций и не армированной породы говорят значения коэффициента Пуассона (коэффициента поперечных деформаций). Как видно из графиков, представленных на рис.4, значения коэффициентов поперечной деформации для конструкций, армированных по различным схемам, в предельном состоянии изменяются от 0,45 до 0,48 (0,46 для не армированной породы), что свидетельствует о хрупком характере разрушения. В отличие от не армированной породы, для которой коэффициент поперечной деформации остается практически постоянным до момента полной разгрузки от напряжений σ_3 , породно-

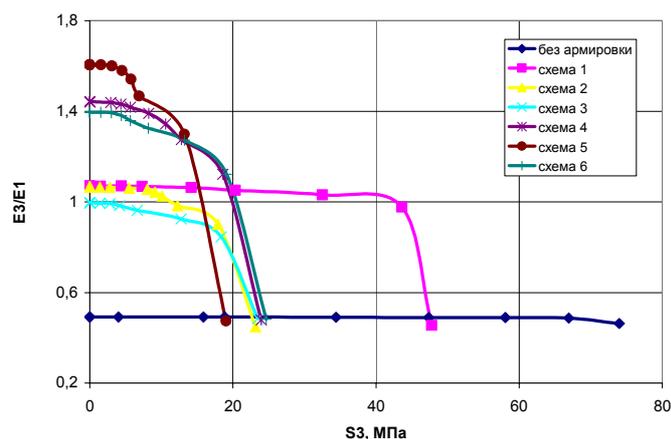


Рис. 4 – Графики зависимости коэффициента поперечных деформаций (ϵ_3/ϵ_1) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области запредельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

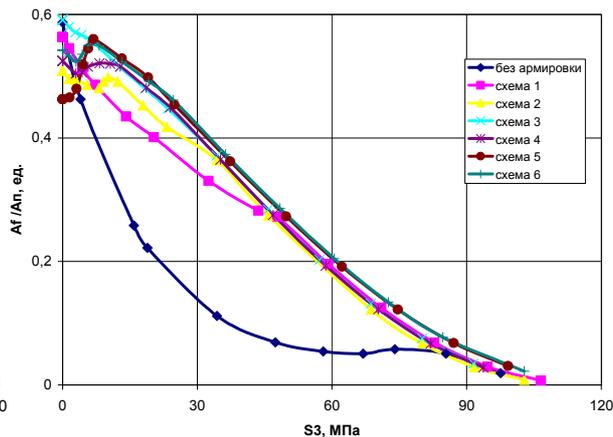


Рис.5 – Графики зависимости отношения энергии формоизменения к полной энергии деформирования (A_f / A_n) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

анкерные конструкции после достижения предельного состояния быстро переходят в область пластического деформирования.

Так, при разгрузке от первоначального значения напряжения σ_3 на 62-84 %, все породно-анкерные конструкции, независимо от схемы армирования, пластически деформируются в плоть до полной разгрузки от напряжений σ_3 , что подтверждается величиной коэффициента поперечной деформации от 0,99 до 1,61 (менее 0,5 характерно для хрупко разрушающейся не армированной породы). О преобладании пластического характера деформирования у породно-анкерных конструкций в запредельной области говорят также графики зависимости отношения энергии формоизменения к полной энергии деформирования (A_f / A_n) от напряжений σ_3 при разгрузке, представленные на рис.5.

Для не армированной породы характерно преобладание хрупкого деформирования, связанного с постепенным накоплением трещин отрыва. По мере приближения к области полной разгрузки от напряжений σ_3 , происходит ускоренное замещение хрупкого деформирования к пластическому. При этом, в не армированной породе образуются трещины сложного сдвига, что значительно увеличивает степень ее дилатансии. Для породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, уже на начальной стадии разгрузки от напряжений σ_3 характерен ускоренный рост доли пластических деформаций в совокупной динамике их развития. Этот процесс протекает с практически постоянной интенсивностью вплоть до полной разгрузки конструкций от напряжений σ_3 , что приводит к тому, что их относительные остаточные деформации в направлении разгрузки до 1,7 раза больше, чем для не армированной породы. Кроме того, армирование позволило на 70% снизить относительное изменение объема на запредельном участке деформирования, происходящее от продолжающегося разрушения (разрыхления) по сравнению с не армированной породой. Это говорит об эффективности противодействия связанных анкерами пород в запредельном состоянии их дальнейшему разрушению.

Установлено, что запредельное деформирование породно-анкерных конструкций, армированных по схемам 1,2,5 и 6 и не армированной породы, происходит в области растяжения со сдвигом, а конструкций, армированных по схемам 3 и 4 - в области растяжения. По мере разгрузки от напряжений σ_3 в запредельной области деформирования происходит снижение прочности пород и породно-анкерных конструкций. Несмотря на примерно одинаковый градиент снижения напряжений σ_1 при уменьшении напряжений σ_3 для не армированной породы и породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, за счет больших значений предельных напряжений остаточные прочности конструкций от 3,1 до 4,5 раз больше, чем для породы. Так, остаточная прочность для лучшей конструкции, армированной по схеме 5 составляет 0,81 от первоначальной. Остаточные значения нормальных и касательных напряжений для породно-анкерных конструкций соответственно в 4,5 и 4,6 раза выше, чем для породы.

Как видно из графиков, представленных на рис. 7, при разгрузке не армированной породы и породно-анкерных конструкций в области запредельного деформирования (от точки перегиба графиков и вплоть до полной разгрузки от напряжений σ_3) происходит ускоренное снижение модуля объемной деформации, что характеризует увеличение их жесткости и снижение остаточной прочности. Более интенсивно этот процесс идет для конструкций, армированных по схемам 1-3, медленнее – для армированных по схемам 4-6. Остаточные значения модуля объемной деформации для породно-анкерных конструкций от 5,7 до 8,4 раза больше, чем для не армированной породы. Аналогичным образом происходит снижение значений модуля сдвига для не армированной породы и породно-анкерных конструкций в области запредельного деформирования – рис.8. Это характеризует процесс ослабления и уплотнения внутренней структуры материала конструкции, сопровождаемый снижением ее сопротивления действию касательных напряжений и нарастанием доли пластических деформаций.

Для породно-анкерной конструкции, армированной по схеме 5, на участке предельного деформирования, происходит увеличение модуля сдвига, и модуля упругости в 1,4 раза по сравнению с предельным значением. Для всех породно-анкерных конструкций остаточные значения модуля сдвига от 6,2 до 13,9 раза больше, чем для не армированной породы, что говорит о высокой эффективности сопротивления конструкций действию сдвиговых нагрузок за счет наклоненных к плоскости разгрузки анкеров. При этом, в материале конструкций распространяются трещины отрыва, что сопровождается минимальным его разрыхлением, при этом остаточная прочность снижается медленно, а модуль спада принимает минимальные значения. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований [1], выполненных в ИФГП НАН Украины.

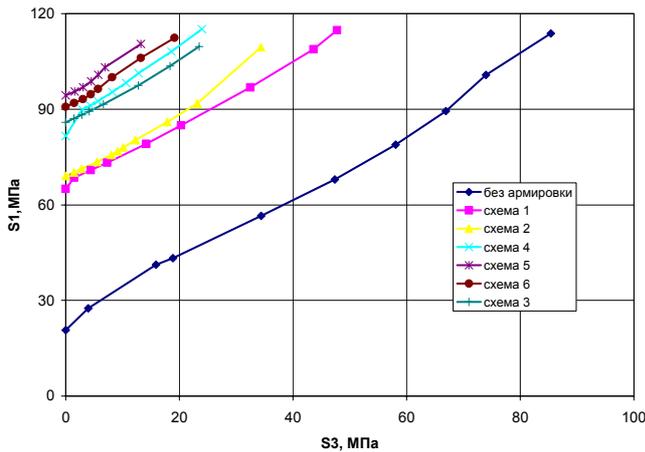


Рис.6 – Графики зависимости главных напряжений σ_1 от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области предельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

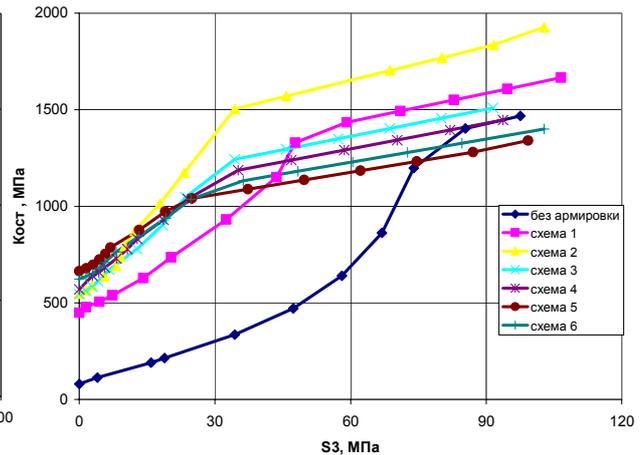


Рис.7 – Графики изменения модуля объемной деформации ($K_{ост}$) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области предельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

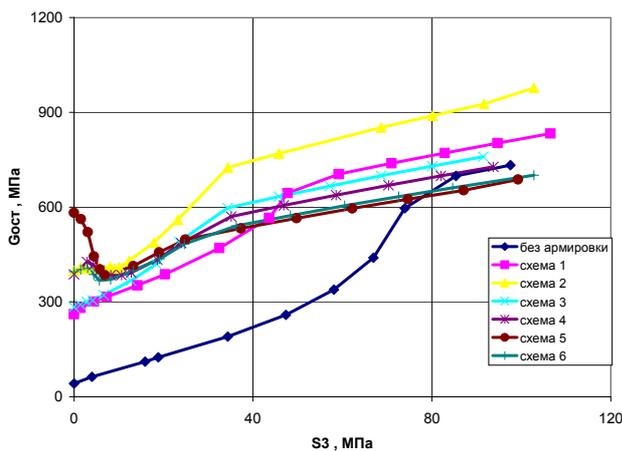


Рис.8 – Графики изменения модуля сдвига ($G_{ост}$) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области предельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

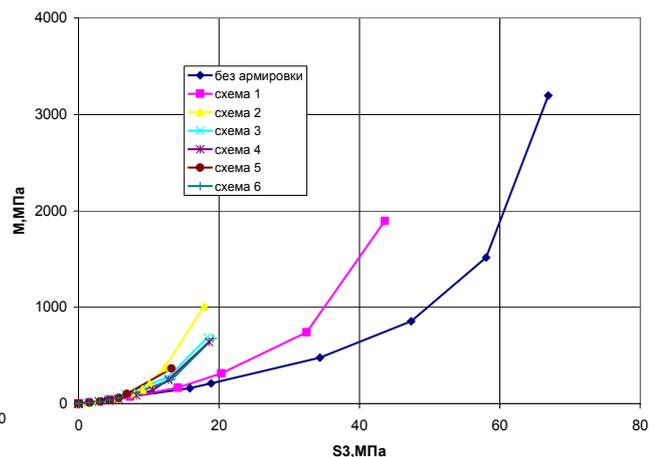


Рис. 9 – Графики изменения модуля спада (M) от напряжений σ_3 при разгрузке породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

Установлено, что при разгрузке породно-анкерных конструкций от напряжений σ_3 , в запредельной области, при постоянной боковой нагрузке $\sigma_1 = \sigma_2$, наблюдается переход от хрупкого к более вязкому (квазипластическому) характеру деформирования, характеризующегося ускоренным снижением модуля спада по сравнению с не армированной породой (см. рис.9), возрастающими запредельными деформациями (рис.10) и сохранением высокой остаточной прочности (см.рис.2), что характерно для пластичных пород. Как видно из графиков, представленных на рис.9, значение модуля спада для породно-анкерных конструкций от 1,9 до 4,0 раз меньше, а относительные деформации в направлении разгрузки ϵ_3 (см. рис.10) от 11 до 65 % больше, чем для не армированной породы, что указывает на квазипластический характер их деформирования в запредельной области.

При разгрузке, не армированной породы от напряжений σ_3 на запредельном участке деформирования, происходит образование трещин сложного сдвига, что значительно увеличивает степень дилатансии материала при практически постоянном значении коэффициента поперечных деформаций. Плоскости разрушения, при этом, как правило, параллельны плоскости разгрузки. Для породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, при разгрузке в запредельной области, характерно распространение трещин отрыва, при этом происходит минимальное разрыхление (дилатансия) материала, увеличиваются значение коэффициента поперечных деформаций и относительные деформации в направлении разгрузки, при этом остаточная прочность снижается медленно, а модуль спада принимает минимальные значения.

Изменение вида деформационного состояния породно-анкерных конструкций при разгрузке в области запредельного деформирования и значения модуля спада показано на рис.11.

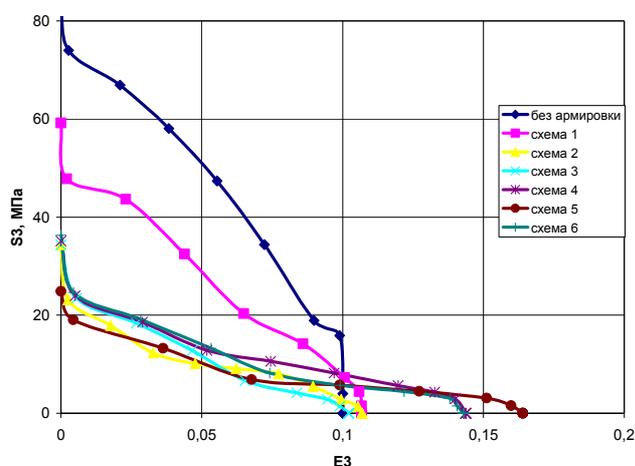


Рис.10 – Графики изменения напряжений σ_3 при разгрузке, на запредельном участке деформирования, от относительных деформаций ϵ_3 для породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

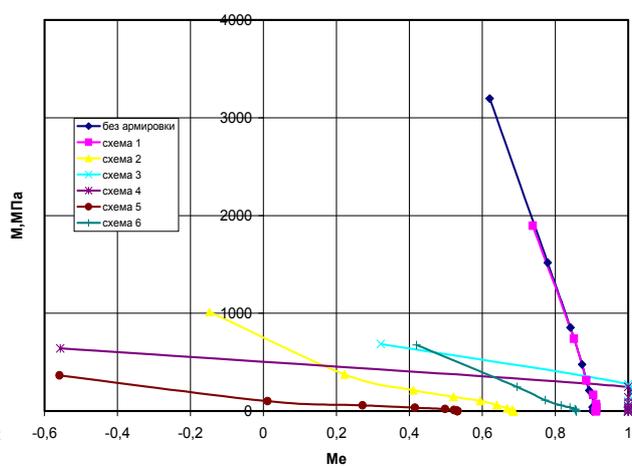


Рис.11 – Графики зависимости модуля спада (M) от вида деформационного состояния (μ_ϵ) породно-анкерных конструкций, армированных по различным схемам, в области запредельного деформирования при моделировании прочности пород 30 МПа и глубины заложения 1200 м.

Деформационное состояние не армированных пород и породно-анкерных конструкций, армированных по схеме 1, при разгрузке от напряжений σ_3 в запредельной области изменяется в незначительных пределах (растяжение со сдвигом). Это связано с развитием в них трещин сложного сдвига, причем радиально расположенные при схеме арми-

рования 1 анкера, минимально сопротивляются этому процессу. Для других породно-анкерных конструкций, армированных по схемам 2-6, характерен более широкий диапазон изменения деформационного состояния (от сжатия со сдвигом до растяжения со сдвигом), что обусловлено эффективным вовлечением в совместную работу по противодействию деформирования наклонно расположенных анкеров и породы. Это позволяет ограничить процесс образования в конструкциях трещин сложного сдвига, приводящих к интенсивной дилатансии. При этом, деформирование материала конструкции сопровождается в большей степени с распространением трещин отрыва, при котором наблюдается медленное снижение остаточной прочности и минимальные значения модуля спада при существенно меньшей величине дилатансии. Кроме того, армирование по схемам 4 и 5 позволяет в наибольшей степени использовать несущую способность породно-анкерной конструкции за счет более позднего изменения благоприятного режима ее работы (от деформационного состояния «сжатие со сдвигом» до «растяжения со сдвигом») при разгрузке.

Установлено, что эффект квазипластичности (быстрое снижение величины модуля спада при разгрузке конструкции по сравнению с не армированной породой) в большей степени проявляется в менее прочных породах (30 МПа) и уменьшается по мере увеличения прочности.

При увеличении глубины заложения повышается уровень исходного объемного напряженного состояния породно-анкерных конструкций, что сказывается на характере запредельного их деформирования при разгрузке.

Запредельный участок деформирования начинается с ростом глубины при больших значениях напряжения σ_3 (т. е. при меньшем удалении забоя выработки от места установки анкерной системы), что в свою очередь обуславливает более медленное снижение модуля спада при разгрузке от напряжений σ_3 и более поздний переход конструкции в область квазипластического деформирования (интенсивное снижение модуля спада и возрастание запредельных деформаций наблюдаются при небольших значениях σ_3 , характерных для практически полной разгрузки). В свою очередь, большие значения модуля в начале участка запредельного деформирования, сразу после достижения конструкцией предельного состояния, обуславливают большую степень нарушения ее первоначальной внутренней структуры, что увеличивает степень дилатансии конструкции в области запредельного деформирования и снижает остаточную прочность. Так, с увеличением прочности пород с 30 МПа до 50 МПа, остаточная прочность породно-анкерных конструкций снижается на 8%. Это связано с увеличением степени дилатансии в конструкциях из более прочных пород на участке запредельного деформирования. При этом, относительные остаточные деформации конструкции в направлении разгрузки увеличились на 17 %, а значение коэффициента поперечных деформаций – в 1,5 раза.

Увеличение моделируемой глубины заложения породно-анкерных конструкций приводит к уменьшению их остаточной прочности. Так, при увеличении глубины заложения породно-анкерной конструкции, армированной по схеме 5, с 800 м до 1600 м, ее остаточная прочность при прочих равных условиях снизилась с 0,85 до 0,77 от первоначальной. Связано это с тем, что анкеры, имеющие на два порядка более высокие упругие свойства, чем порода, на этапе до предельного деформирования конструкции представляют собой концентраторы напряжений, которые в пределах своих областей влияния на массив, усиливают разрушение (степень разрыхления) пород. При увеличении моделируемой глубины заложения конструкций, влияние этого фактора усиливается, что в свою очередь и приводит к снижению остаточной прочности конструкции.

Аналогичные результаты были получены при испытаниях породно-анкерных конструкций, армированных по другим схемам, при моделировании прочности породы 40 и 50 МПа и глубины заложения 800, 1200 и 1600 м. Они позволяют сделать следующие выводы.

Установлено, что конструкции достигают предельного состояния при разгрузке от радиальных напряжений на величину от 59 до 91 % от первоначальной (для не армированной породы при разгрузке на 25-47 %). При этом, значения модулей объемной деформации, сдвига и упругости снижались в 2,8 раза по сравнению со значениями до разгрузки (для не армированных пород снижение составляло в 1,8 раза), оставаясь по величине до 2,3 раза меньше, чем для не армированной породы. Предельные значения нормальных и максимальных касательных напряжений были в 4,8 раза выше, а предельные относительные деформации конструкций в 1,3 раза меньше, чем для не армированной породы. Относительное изменение объема для конструкций из пород с прочностью до 30 МПа в предельном состоянии до 1,7 раза меньше, а из пород прочностью 40 МПа и более – до 2,4 раза выше, чем для не армированной породы. Отношение величин энергии формоизменения и энергии изменения объема для конструкций в предельном состоянии в 30 раз больше, чем для не армированной породы, что свидетельствует о большей энергоемкости их разрушения и объясняется эффективной совместной работой породы и анкеров по противодействию ему.

Установлено, что анкерование меняет механизм разрушения пород. При разгрузке, под углами до 30 град.(теоретическое значение угла $45^\circ \pm \varphi/2$) к плоскости разгрузки образуются плоскости разрушения, по которым оно происходит в результате отрыва со сдвигом или отрыва.

При дальнейшей разгрузке конструкций (запредельный участок), происходит их быстрый переход в область квази-пластического деформирования с коэффициентом поперечной деформации от 0,7 до 2,2, снижение значений модуля деформации и модуля сдвига до 2,2 раза по сравнению с предельными значениями (за исключением конструкций, армированных по схемам 4, 5 и 6), причем их остаточные (при полной разгрузке) значения до 22,2 раза выше, чем для не армированной породы. Для породно-анкерных конструкций, армированных по схемам 5,6,2 и 4, на участке запредельного деформирования, происходит увеличение модуля сдвига до 6,8 раза по сравнению с предельным значением, что говорит о повышении сопротивления конструкции действию сдвиговых нагрузок за счет наклоненных к плоскости разгрузки анкеров. Остаточные значения нормальных и касательных напряжений для конструкций до 4,7 раза выше, а остаточная прочность до 5 раз выше, чем у не армированной породы и составляет от 0,31 до 0,85 от начальной. Относительные остаточные деформации породно-анкерных конструкций в направлении разгрузки достигают 0,23 (до 2,5 раз больше, чем для не армированной породы). Запредельное деформирование всех породно-анкерных конструкций и не армированных пород происходит в области растяжения со сдвигом, при этом, относительные изменения объема от продолжающегося разрушения (разрыхления) пород уменьшаются до 97 % по сравнению с не армированной породой. Это говорит об эффективности противодействия связанных анкерами пород в запредельном состоянии их дальнейшему разрушению.

Аналогичные результаты были получены при испытаниях реальных образцов глинистого сланца, отобранных из непосредственной кровли пласта m_5^{1b} шахты «Добропольская», которые показали их хорошую сходимость с результатами исследований, проведенных на моделях (расхождение не превышает 20%).

Таким образом, в результате испытаний было установлено, что размещение в породах пространственной совокупности армирующих элементов позволяет изменять величину параметров, характеризующих структурно-механические и деформационные свойства массива, создавая препятствия разрушению, дает возможность управлять процессами деформирования и разрушения пород. Это позволило сформулировать новую научную концепцию применения анкерных систем (АС), позволяющую максимально использовать несущую способность породного массива, основанную на выборе такой схемы армирования при минимальном количестве анкеров, чтобы массив не разрушался или разрушался в заданных пределах.

Библиографический список

1. **Разрушение горных пород** в объемном поле сжимающих напряжений./ Алексеев А.Д.,Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168с.