

К РАЗРАБОТКЕ ГЕОКОМПОЗИТНЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Сформульовано основні принципи використання геокомпозитних конструкцій для створення елементів комбінованих охоронних систем гірничих виробок.

TO WORKING OF A GEOCOMPOSIT SECURITY SYSTEMS OF EXCAVATIONS

The basic principles of use of geocomposit designs for creation of elements of the combined security systems of excavations are formulated

Проблема поддержания горных выработок в сложных горно-геологических условиях имеет два аспекта: технический и экономический. Мировой и отечественный опыт показал, что основным путем решения технической стороны проблемы является создание комбинированных охранных систем возрастающего сопротивления, позволяющих поддерживать выработку в безаварийном состоянии на каждом этапе ее эксплуатации. Особенно актуально это для выемочных выработок угольных шахт, характеризующихся изменением геомеханических условий на протяжении всего срока службы.

Элементы комбинированной охранной системы могут быть классифицированы по типу их взаимодействия с породным массивом. По указанному классификационному признаку они могут быть разделены на три категории. К первой из них относятся элементы, взаимодействующие с массивом по контуру охраняемой выработки. Для элементов второй категории взаимодействие полностью или частично происходит непосредственно в породном массиве. Зачастую они создаются с использованием материалов, обладающих пенетрирующими или адгезионными свойствами. При нанесении на поверхность они или проникают в тело конструкции, или образуют поверхностный слой заданной толщины, сцепленный с материалом конструкции. Элементы третьей категории образуют совместно с обрабатываемым материалом объемную конструкцию.

Наиболее характерным элементом комбинированной охранной системы, относящимся к первой категории, является рамная крепь. Экономически целесообразные схемы крепления не позволяют достичь распределенной по поверхности выработки реакции отпора крепи свыше 0,1 МПа, что в 100-200 раз ниже уровня действующих в массиве напряжений. И на данном этапе и в ближайшем будущем такая крепь будет в условиях больших глубин выполнять в основном ограждающую функцию.

Элементы, относящиеся ко второй и третьей категориям, имеют больше потенциальных возможностей. Их главная функция сводится к формированию вокруг выработки грузонесущей оболочки. Одним из перспективных направлений для решения данной задачи является создание искусственных геокомпозитных структур.

Решение задачи комплексного применения перечисленных выше элементов с учетом их взаимного влияния в пространственно-временном континууме создает предпосылки для разработки конструктивных и технологических параметров применения искусственных геокомпозитных структур для крепления горных выработок, подземных и заглубленных объектов различного назначения.

По определению композитные (композиционные материалы) – это гетерогенные системы, состоящие из двух или более фаз, причем размеры включений одних компонентов в другие должны быть на макроскопическом уровне [1]. Основная среда носит название матрицы, а включения часто называют армирующими элементами. Если матрицей является геосреда, то подобный объект носит название геокомпозит.

Термин «геокомпозит» в настоящее время ассоциируется преимущественно со специальными средствами укрепления грунта и выветрелого скального массива в строительстве [2-4]. В широком смысле понятие «геокомпозит» подразумевает армированный грунтовый или скальный массив. В информации коммерческого и рекламного характера под геокомпозитами (геокомпозитными конструкциями) понимают более узкую категорию объектов – сами армирующие элементы в виде сеток, решеток и т. п. Сведения о применении некоторых видов геокомпозитов в наземном строительстве представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Применение геокомпозитных материалов в наземном строительстве

| Сфера применения | Назначение материала | Наименование материала | Фирма-производитель |
|--|--|--|-----------------------------|
| гидротехническое строительство | обустройство дренажных сооружений | геополотно «Пинема» | ОАО «Пинема» (Беларусь) |
| дорожное строительство | укрепление выветрелых скальных откосов | георешетка ENKAMAT-S | AKZO (США) |
| | укрепление дорожного полотна | георешетка ГЕО ОР | МИАКОМ (Россия) |
| | | георешетка Tensar SS. | Tensar international (США) |
| промышленное и гражданское строительство | укрепление грунта под промышленными объектами и коммуникациями | георешетки ParaGrid и MacGrid WG, высокопрочный геосинтетик ParaLink | Massaferri (Великобритания) |

Непосредственное использование технологий укрепления породного массива с применением геокомпозитов, апробированных для наземного строительства, неэффективно, а в ряде случаев и невозможно. Необходимо учитывать особенности использования геокомпозитов на подземных объектах:

ограничение технологического оборудования по массогабаритным показателям и необходимость использования его для шахт, опасных по газу и пыли, в искровзрывобезопасном исполнении;

возведение и эксплуатация геокомпозитных конструкций в агрессивной шахтной среде;

повышенные требования к негорючести и нетоксичности геокомпозитной конструкции в целом или отдельных ее компонентов;

относительно небольшой срок эксплуатации (например, при креплении одноразово используемых подготовительных выработок).

В классической композитной структуре управление ее свойствами осуществляется подбором характеристик матрицы и армирующего элемента. Применительно к геокомпозитам возможности такого управления сужаются, поскольку матрица-геосреда уже обладает заданными природой свойствами и зачастую не такими, какие были бы необходимы для создания эффективной геокомпозитной системы. У специалистов имеется только возможность выбора параметров армирования, которая также ограничивается технологическими возможностями в силу специфики подземного объекта.

По конструктивному признаку элементы армирования можно разделить на линейные, плоские и объемные. К линейным относят жесткие или гибкие единичные элементы с преобладающим значением одного измерения над двумя остальными. Типичным представителем этой категории являются анкеры. К плоским конструкциям, которые также бывают гибкими или жесткими, отнесены двумерные армирующие элементы. Такие конструкции носят название «геотекстили», «геоматы» или «георешетки». Их выпуск налажен промышленностью (см. табл. 1). Плоские конструкции заводского изготовления поставляют к месту установки в виде полос или рулонов. Объемные упрочняющие конструкции выполняют с использованием элементов заводского изготовления по месту установки. Как правило, они изначально являются жесткими и предполагают работу в условиях сложных видов нагружений.

Всем композитным материалам, в том числе и геокомпозитам, присуща неаддитивность свойств составляющих компонентов. Правильно подобранная геокомпозитная система должна быть лучше по комплексу характеристик, чем взятые по отдельности матрица и элементы армирования. В большинстве случаев доминирующими факторами оценки качества геокомпозитной конструкции являются ее деформационно-силовые параметры.

Важнейшей характеристикой, определяющей стабильность свойств композитных материалов в течение всего времени ее эксплуатации, является тип взаимодействия между матрицей и армирующими элементами. Выделено три основных типа взаимодействия:

первый – матрица и армирующий элемент взаимно не реакционноспособны и не растворимы;

второй – матрица и армирующий элемент взаимно не реакционноспособны, но растворимы;

третий – армирующий элемент и матрица реагируют с образованием химического соединения на поверхности раздела.

Применительно к геокомпозитам второй тип взаимодействия между матрицей и армирующим элементом отсутствует. Наиболее характерным для геоком-

позитных систем является первый тип взаимодействия между их элементами. Протекания коррозионных явлений на поверхности металлических армирующих элементов с учетом агрессивной шахтной среды всегда имеет место. Однако учитывать данное явление, переводящее геокомпозитную структуру в третий тип, необходимо только при условии ее длительной эксплуатации.

Свойства геокомпозитов помимо физико-механических свойств армирующих элементов определяются также их формой. Наиболее простой формой являются гранулы. Гранулирование слабых грунтов используется чаще всего в дорожном строительстве, а в скальных массивах, что характерно для шахтных условий, оно неприменимо.

Наиболее представительной является группа геокомпозитов с армирующими элементами в виде волокон. Термин «волокно» следует понимать в широком смысле, как одномерный объект. По величине отношения длины к диаметру они могут быть длинные ($L \geq 100 d$) и короткие. ($L < 100 d$). По степени жесткости волокна могут быть гибкие и жесткие. В последнюю категорию попадают армирующие элементы в виде стержней, например анкера или шпурсы в породном массиве, заполненные отвердевшим высокопрочным искусственным материалом.

По своему функциональному назначению геокомпозитные материалы можно разделить на три категории: силовые, несилловые и специального назначения. Силовые геокомпозиты, характеризуются как правило, направленным армированием, позволяющим получить высокую жесткость при действии сжимающих или растягивающих усилий в определенных направлениях. Несилловые геокомпозиты имеют преимущественно стохастическое армирование и соответственно изотропны. Они предназначены для выполнения ограждающей функции. Геокомпозиты специального назначения должны обладать особыми эксплуатационными свойствами для конкретных условий, например, низкой фильтрационной способностью, огнеупорностью, стойкостью к воздействию агрессивного раствора и т. п.

Наибольший интерес для горной промышленности представляют силовые геокомпозиты. Важнейшей характеристикой силовой геокомпозитной конструкции является начальная разрушающая нагрузка. Эффективность использования геокомпозитной системы тем выше, чем выше отношение величины указанного параметра к эквивалентной структуре, состоящей полностью из материала матрицы. Учитывая, что в условиях больших глубин охранные конструкции работают в запредельном режиме деформирования, принципиально необходимой является также информация о механизме разрушения геокомпозитной структуры на данном участке нагружения. Крайними случаями являются хрупкое разрушение и пластическая деформация без изменения объема. К хрупким композитным материалам относится, например, большинство стеклопластиков. Возможное применение хрупких геокомпозитов (и композитов вообще) в шахтных условиях весьма ограничено.

Реальные деформации контура горной выработки на неблагоприятных участках могут уменьшать ее поперечное сечение до 50 %. В этой связи перспек-

тивным направлением является создание геокомпозитных структур, способных при высоких прочностных характеристиках пластически деформироваться без значительного накопления внутренней упругой энергии и существенно не терять несущей способности при относительных линейных деформациях хотя бы до 20 -30 %.

Силовые геокомпозитные конструкции в настоящее время создаются преимущественно с целью упреждения расслоений кровли в горных выработках. Накоплен значительный опыт реализации указанных структур с использованием анкеров, применяемых как самостоятельно, так и в комбинации с рамной крепью [5]. Указанная комбинированная охранная система эффективно работает при наличии слоистой кровли при условии, что каждый из слоев сохраняет несущую способность.

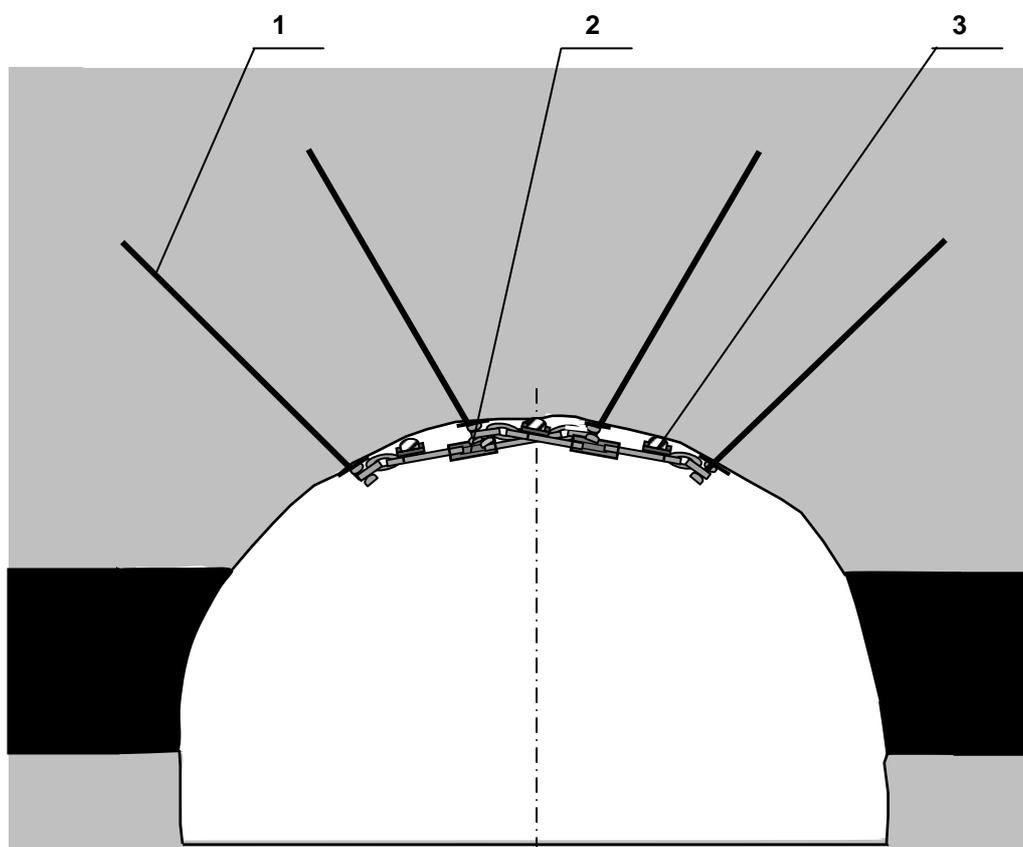
Эксплуатационные характеристики геокомпозитной структуры характеризуется степенью механической связи матрицы и армирующих элементов. При умеренных статических нагрузках происходит совместная деформация матрицы и армирующих элементов без скачков на поверхности раздела. В случае использования армирующих элементов линейного типа, какими и являются анкера, оптимальный характер нагружения геокомпозитной структуры – в направлении армирования. Исследования показали, что при такой схеме нагружения в пределах упругой области материала матрицы поперечные напряжения на границе раздела сред незначительны. Описанная геомеханическая ситуация имеет место при поддержании подготовительных выработок задолго до подхода лавы.

На участке сопряжения «штрек-лава» и после прохода лавы вследствие асимметрии нагрузок в созданной над выработкой геокомпозитной структуре возникают напряжения, направленные под углом к элементам армирования, близким к нормали. Выполненные американскими специалистами исследования, ссылка на которые дана в работе [6], показали, что при небольшой концентрации высокопрочных армирующих элементов в более слабой матрице напряжения на границе сред двух материалов при поперечном нагружении геокомпозитной конструкции выше, чем при продольном. Локальные очаги напряжений в дальнейшем становятся источниками формирования макротрещин, число и размеры которых необратимо увеличивается. Эффективность работы анкерной системы в условиях полученной блочно-структурированной кровли заметно снижается.

В этой же работе [6] описаны результаты лабораторных исследований композитных материалов с различными характеристиками, которые позволили установить, что при наличии поперечных усилий, приложенных к композиту с линейно ориентированными армирующими элементами, существует оптимальная их концентрация. Ее превышение приводит не к повышению прочности, а к ее снижению за счет существенного возрастания концентрации напряжений на границе раздела сред и последующего образования трещин. Все вышесказанное следует трансформировать и применительно к анкерно-породной конструкции – начиная с некоторого предела дальнейшее добавление анкеров становится неэффективным.

Геокомпозитные структуры с использованием анкеров обеспечивают «сшивание» или «подвешивание» породных слоев. Однако результаты исследований по динамике развития зон неупругого деформирования в кровле выработки при подходе лавы, выполненные с использованием глубинных реперных станций, показали наличие развивающихся расслоений в массиве на удалении от контура выработки до 6 - 8 м. Указанная величина значительно превышает рациональную глубину анкерования. При неблагоприятных условиях существует опасность существенного вертикального перемещения цельного заанкерванного породного блока.

Более широкими эксплуатационными возможностями, особенно в условиях блочно-структурированной кровли, обладает геокомпозитная система, базирующаяся на использовании анкерной стяжной крепи [7]. Конструкция такой крепи иллюстрируется рис. 1.



1 – анкер, 2- стяжка, 3 – подкладка

Рис. 1 – Конструкция анкерной стяжной крепи

Применение анкерной стяжной крепи (АСК), отличающейся от анкерной механизм работы, позволяет получить более устойчивое состояние над сводом выработки. АСК создает в породном массиве эффект самозаклинивания в своде.

Анкерная стяжная крепь может работать как самостоятельная охранная конструкция, однако эффективней ее преимущества реализуются в комбинации с рамной крепью. Применение АСК для усиления рамной крепи обеспечивает:

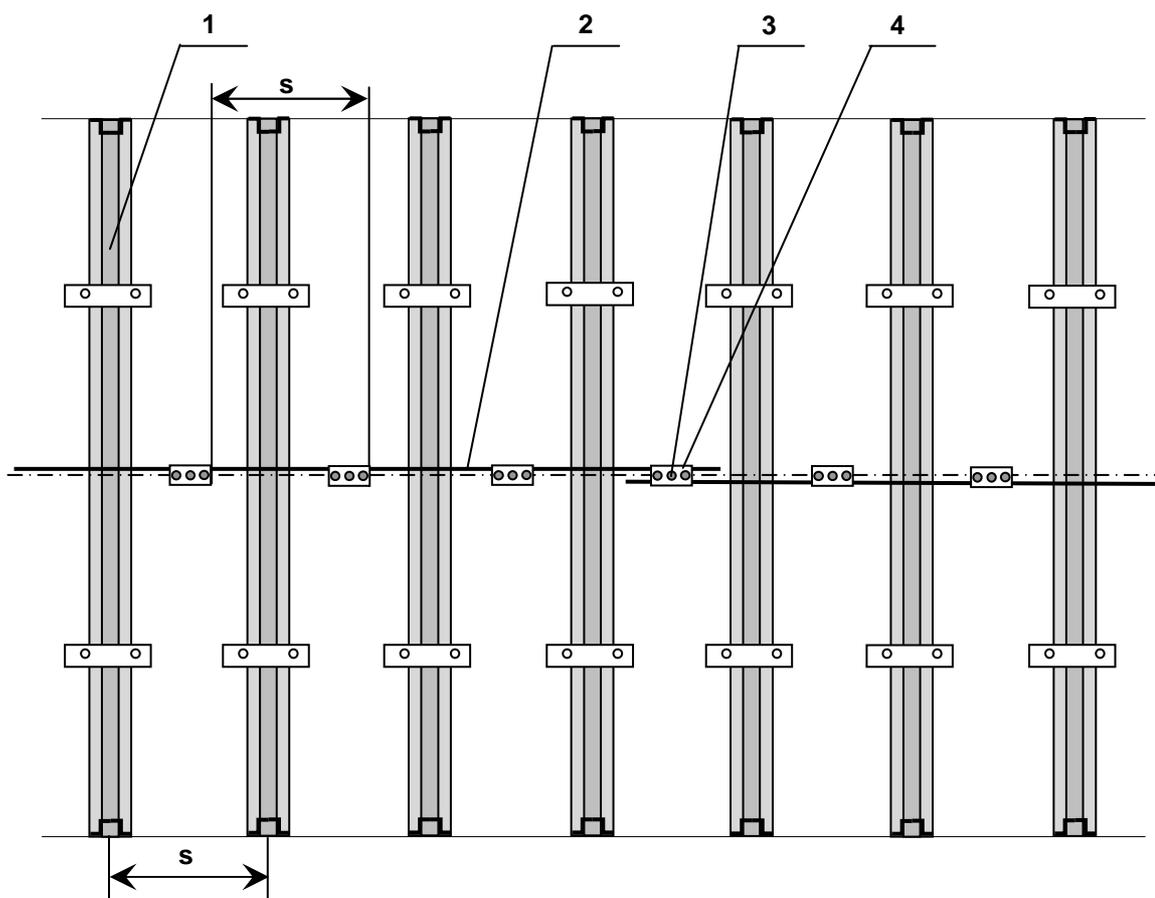
формирование над выработкой плитно-балочного породного перекрытия, что создает предпосылки для равномерного распределения нагрузок на арку;

повышение сцепления между слоями пород и создание дополнительного подпорного напряжения по нормали к плоскости слоистости, чем обеспечивается повышение межслоевой прочности массива;

уменьшение изгибающих моментов в слоях пород со стороны лавы и изгибающих перемещений за счет увеличения мощности пород и исключения скольжения по поверхностям сдвига;

улучшение условий поддержания сопряжения «штрек-лава» при демонтаже стоек рам крепи для передвижения забойного конвейера.

Принципиальным недостатком АСК является ее невысокая податливость. Это затрудняет совместную работу анкерной стяжной крепи с более податливой арочной крепью. Для преодоления указанного недостатка авторами разработана конструкция податливой анкерной стяжной крепи, позволяющая получить распределение нагрузок на раму и геокompозитную структуру, мало изменяющееся в широком диапазоне деформаций. Она представлена на рис. 2.



1 – рама, 2 – канат, 3 – анкер, 4 - фиксатор

Рис. 2 – Общая схема продольной податливой анкерной стяжной крепи (вид в плане)

Отличительными особенностями крепи являются:

простота конструкции;

принципиально неограниченная податливость крепи, что обеспечивает ее совместную работу с рамой во всем диапазоне деформаций;

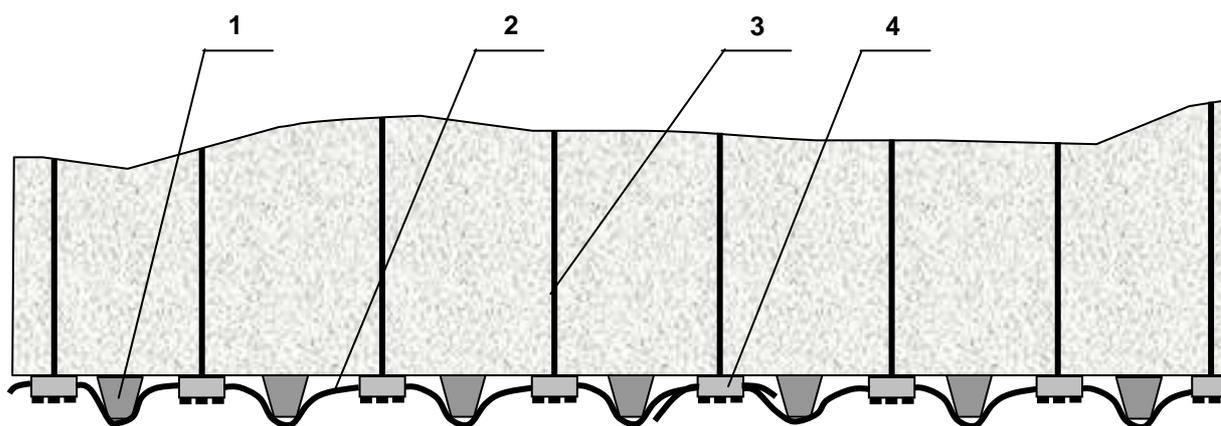
отсутствие сварных соединений;

отсутствие ограничений на количество и расположение линий АСК;

отсутствие жестких требований к величине базы между анкерами АСК;

отсутствие в конструкции специального элемента для натяжения каната.

Вид крепи в проекции на вертикальную плоскость вдоль оси выработки представлен на рис. 3.



1 – рама, 2 – канат, 3 – анкер, 4 - фиксатор

Рис. 3 – Общая схема продольной податливой анкерной стяжной крепи (вид в вертикальной плоскости вдоль оси выработки)

Для подхвата арок, расположенных с шагом s , используются отрезки каната, возможно бывшего в употреблении, причем длина отрезков может быть произвольной, но не менее $1,5 s$. Тип каната выбирают из расчета, чтобы его разрывное усилие составляло не менее 250 кН. Представление об ориентировочных массогабаритных характеристиках канатов, выдерживающих указанное усилие при минимальном для данного типа диаметре, дает табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики некоторых типов канатов

| Тип каната | Стандарт | Диаметр, мм | Разрывное усилие, кН | Погонная масса, кг/м |
|------------|--------------|-------------|----------------------|----------------------|
| ЛК-Р | ГОСТ 2688-80 | 22,5 | 251 | 1,89 |
| ЛК-О | ГОСТ 3077-80 | 20,5 | 263 | 1,65 |
| ЛК-З | ГОСТ 7667-80 | 19,0 | 266 | 1,47 |
| SK 1222 | ISO 2408 | 22,0 | 268 | 1,76 |
| SK 2022 | ISO 2408 | 22,0 | 288 | 1,79 |
| SK 3000 | ISO 2408 | 20,0 | 257 | 1,67 |
| SK 6019 | ISO 2408 | 19,0 | 280 | 1,65 |

В промежутках между рамами канат защемляется с помощью фиксатора, закрепленного на анкере. Отличием данной конструкции от известных технических решений является, то, что фиксатор выполнен в виде узла сухого трения и допускает возможность перемещения каната относительно фиксатора при определенном, приложенном к канату, усилии. Указанное усилие должно быть меньшим разрывного на 20 – 30 %.

При деформировании рам происходит натяжение каната в промежутке между соседними анкерами. Режим сухого трения каната в фиксаторе обеспечивает податливость стяжки при сохранении примерно постоянного усилия натяжения. Для возможности удлинения частей каната между смежными анкерами, он имеет концевые незащемленные участки, выпущенные в выработку.

Продольная анкерная стяжная крепь может располагаться в несколько рядов, параллельных оси выработки. При этом получаем объемную комбинированную охранную конструкцию, объединяющую преимущества геокомпозитной структуры и рамной крепи. В известных схемах крепления рамы и расположенные между ними геокомпозитные ячейки работают независимо. Это обуславливает различную степень нагруженности отдельных элементов охранной системы. К тому же распределение нагрузок на крепление вдоль выработки в принципе является неравномерным. Выполненные с участием авторов исследования, результаты которых положены в основу открытия № 318 [8], показали, что наблюдаемая на практике неравномерность распределения напряжений в приконтурной зоне протяженных подземных геомеханических структур, к которым относятся и подготовительные выработки, не является отражением технологических особенностей проходки и крепления выработки, а имеет более глубокую, фундаментальную природу. Соответственно и технология крепления должна учитывать указанное природное явление. Эффективным и практически апробированным решением для выравнивания нагрузок является формирование бетонной оболочки, включающей в себя уже установленную металлокрепь. Однако такая конструкция отличается низкой податливостью, а ее возведение связано с большими затратами. Предложенная конструкция продольной анкерной стяжной крепи отличается простой технологией возведения, способствует выравниванию усилий на элементы крепи в пределах нескольких смежных рам, обеспечивая при этом податливость во всех направлениях.

Укрепление трещиноватого массива в ближней приконтурной зоне выработок путем инъектирования твердеющих растворов также можно отнести к созданию силовых геокомпозитных конструкций. При этом структура расположения армирующих элементов в матрице определяется детерминированной составляющей, в соответствии со схемой расположения шпуров для установки инъекторов и случайной – определяемой положением трещин в массиве. Зарубежный опыт в указанном направлении представлен преимущественно использованием полимерных материалов: в Польше - дьюрафоама, визофоама, в Германии - бевевола, бевефилла, вильфлекса, вилькита, в России – КФ-Ж. Институтом УкрНИМИ разработан и успешно апробирован в производственных условиях отечественный полимерный состав СКАТ. На его основе стало возмож-

ным создание полимерных анкеров, уступающим по силовым характеристикам металлическим, но имеющим свою область применения [9]. Расширение сферы использования полимерных материалов не вытесняет, однако, полностью более простые и дешевые технологии, базирующиеся на использовании песчано-цементного раствора [10]. К ним относятся тампонаж, цементация, обработка пенетрирующими составами и торкретирования.

Дефекты системы «крепь-массив», проявляющиеся в виде пустот и трещин, ликвидируют нагнетанием тампонажных растворов под избыточным давлением. Растворы модифицируют полимерными добавками и стохастически армируют рубленными волокнами. В результате тампонажа будет происходить заполнение имеющихся пустот и трещин в конструкции для предотвращения ее разрушения с образованием новой геокомпозитной системы, свойствами которой можно управлять в определенных пределах. Выполнение тампонажа производят по «зажимной» схеме под циклическим давлением нагнетания. Это обеспечивает закрытие пор и трещин в грунтах вследствие упруговязких деформаций, что, в конечном счете, после прекращения подачи раствора за счет упругого последствия будет гарантировать более полное заполнение пустот. При производстве тампонажа должен вестись строгий контроль давления нагнетаемого тампонажного раствора. В условиях заполнения пустот и упрочнения матрицы с рыхлой структурой давление нагнетания на выходе из инжектора в среднем должно составлять 0,1-0,12 МПа, а максимально допустимое не должно превышать 0,4 МПа.

В связи с большой вариацией скорости продвижения тампонажного раствора по мере увеличения площади обработки, а также неоднородности матрицы возможны большие колебания давления нагнетания и внезапное повышение давления, которое может привести к раскрытию трещин на участке тампонажа. В случае экстренного нарастания давления нагнетания подача раствора должна быть прекращена для обеспечения релаксации в системе «строительная конструкция - тампонажный раствор – вмещающий массив».

Применением тампонажа улучшаются условия работы крепи поддерживающего типа достигается ее совместная работа с вмещающими породами в капитальных и подготовительных горных выработках [11]. Значительное повышение сопротивления крепи достигается в том случае, когда закрепное пространство заполняется вяжущим материалом. Здесь уже небольшие деформации породного массива приводят к увеличению сопротивления рамы арочной крепи до 2,6 МН при использовании бетона. После этого происходит разрушение твердеющего материала в закрепном пространстве и сопротивление крепи резко уменьшается, но не ниже 1,2 МН.

Максимальный результат достигается при заполнении закрепного пространства вяжущим материалом, который базируется на портландцементе и армирован волокнами и полимерами. Стохастическое армирование тампонажного раствора рубленым волокном повышает устойчивость бетона к растрескиванию, общее сопротивление крепи и позволяет избежать его резкого снижения при разрушении твердеющего материала. Такая технология является предпочти-

тельной, поскольку максимальное сопротивление крепи получают в наиболее благоприятный момент при весьма малых деформациях приконтурного массива горных пород, когда еще можно управлять разрушением породной оболочки.

При заполнении закрепного пространства бетоном можно добиться требуемого сочетания податливости и высокой несущей способности крепи. В этом случае конечная конвергенция уменьшается на 15-25% по сравнению с конвергенцией выработок, закрепное пространство которых заполняется породой вручную.

Воздействием на породный массив методом цементации получают геокомпозитную структуру, которую можно отнести к несилевой, выполняющей защитную функцию. Эффективность работы указанной структуры в значительной степени определяются правильностью определения технологических параметров и выбором типа вяжущего. Особую проблему представляют средства и методы контроля процесса цементации. В практической деятельности технологические параметры определяются, в основном, на базе опыта производителя работ и имеющегося оборудования.

Инъекционные составы для цементации готовятся на цементной основе или других минеральных вяжущих тонкого помола. Примером таких вяжущих может служить особо тонкодисперсное вяжущее вещество «микродур». Водные суспензии на его основе обладают высокой проникающей способностью в поровую структуру растворов, бетонов и грунта с последующим затвердеванием. Таким образом, «микродур» можно рассматривать как альтернативу жидкому стеклу и полимерным композициям (эпоксидной, карбамидной, фенолформальдегидной и др.) со следующими преимуществами:

- долговечность;
- экологическая чистота;
- однородность с обычными цементами по составу;
- совместимость с бетоном и железобетоном;
- возможность выполнения работ в условиях обводненных и водонасыщенных конструкций и массивов;
- простая и удобная технология приготовления и инъектирования суспензии.

Опыт работы с цементными суспензиями на основе особо тонкодисперсного вяжущего вещества «микродур» показывает, что при инъектировании заполняются не только тонкие и волосяные трещины с шириной раскрытия до 0,05 мм, но также уплотняется и упрочняется поровое пространство цементного камня, независимо от его влажности.

Геокомпозитные конструкции, относящиеся к третьей категории, создаются с использованием пенетрирующих материалов. Их основное назначение - повышение водонепроницаемости. Типичным представителем является материал «ксайпекс-концентрат», который создает в геосреде кристаллизационный барьер, препятствующий проникновению воды. Работа указанного материала основана на принципе диффузии насыщенных растворов. При этом в порах и капиллярах матрицы происходит образование и рост древовидных кристаллов, которые пронизывают и уплотняют ее структуру. При контакте с влагой древовид-

ные кристаллы постоянно растут внутри капилляров, обеспечивая эффективное действие «ксайпекс-концентрата» на весь период службы охранной конструкции. Температурный диапазон применения данного пенетрирующего материала находится в пределах от -32°C до $+135^{\circ}\text{C}$. Эффект от использования пенетрирующего материала сохраняется при постоянном воздействии окружающей среды с $\text{pH}=3-11$, или при периодическом воздействии среды с $\text{pH}=2-12$. Влажность и ультрафиолетовое излучение не оказывают влияния на эксплуатационные характеристики геосреды и бетона, обработанных «ксайпекс-концентратом». «Ксайпекс-концентрат» защищает поверхность охранных конструкций от воздействия агрессивных шахтных вод, а также предотвращает коррозию стальных армирующих элементов.

Возведение геокомпозитных систем может сопровождаться также созданием дополнительного слоя с прогнозируемыми свойствами и параметрами взаимодействия на поверхности бетонной конструкции или грунтового массива. При этом могут достигаться следующие цели:

- повышение несущей способности конструкции;
- восстановление разрушенных участков конструкции или породного массива;
- создание слоя со специальными свойствами (водонепроницаемость, воздухопроницаемость, защита от внешних воздействий и др.).

Наиболее простым способом создания дополнительного слоя является набрызгбетонирование. Качество набрызгбетона в значительной степени зависит от подготовки поверхности охранной конструкции, включающей ликвидацию коррозии стальной арматуры, удаление и замену разрушенных участков бетона, заделку трещин. Очистка поверхности, как правило, выполняется с применением водо-пескоструйной обработки.

Работы по восстановлению разрушенных участков охранных конструкций при отсутствии специальных требований целесообразно выполнить методом «сухого» торкретирования. Песчано-цементные растворы для торкретирования необходимо модифицировать полимерной добавкой, армированной полимерным волокном, например, *Adi-Con CSF (R)*.

Защитный слой наносят методом «мокрого» торкретирования растворами, модифицированными полимерными продуктами - стохастически армированным полимерным волокном, например, *Spray-Con WS ST*. Принятая толщина гидроизоляционного покрытия должна быть не менее 16 мм. Покрытие выполняют послойно. Толщина каждого слоя не должна превышать 8 мм. При нанесении слоев необходимо выдерживать сроки минимального и максимального перерывов.

Материал *Spray-Con WS ST* является модифицирующей добавкой к растворам на основе портландцемента, содержит в своем составе полимерные компоненты и армирующие волокна. Обладает хорошей адгезией к бетонам, повышая водонепроницаемость и механические характеристики наносимых растворов.

Существенное улучшение гидроизоляционных свойств массива происходит при его смолизации. Нагнетаемая через шпуры в трещиноватом водонасыщен-

ном массиве двухкомпонентная полимерная смола под давлением до 0,4 МПа по данным автора работы [12] способствует после ее отверждения снижению участка водопритока в вертикальный ствол примерно в 3 раза.

Апробация элементов технологии создания геокомпозитных конструкций, разработанных с участием авторов, проведена на ряде подземных и гидротехнических объектов при выполнении строительных и ремонтно-строительных работ.

Характерным примером применения специальных способов направленного изменения свойств породного массива является обеспечение гидроизоляции вентиляционного канала восточного вентиляционного ствола № 1 шахты им. А.Ф. Засядько. Оценка возможных технических решений выполнялась с учетом того, что вентиляционный канал относится к 1-й категории горных выработок.

Вентиляционный канал примыкает к стволу на глубине 19,9 м. Выработка пройдена по наносным породам (глина, суглинок) с $f = 0,9 \div 2$ (по шкале проф. Протодьяконова). Канал закреплен металлобетонной крепью КОЗУ-22 в бетоне. Плотность установки рам крепи - 3 рамы на 1 погонный метр выработки. Площадь поперечного сечения канала $S_d = 20,55$ м. Угол наклона выработки – 22° .

После окончания возведения монолитной конструкции, остаточные водопритоки в вентиляционном канале превышали $3,4$ м³/час. Состояние крепи вентиляционного канала не исключало возможности резкого повышения притоков воды и прососов воздуха при включении вентиляционной установки.

Для оценки технического состояния и разработки мероприятий по повышению эксплуатационной надежности выработки проведен комплекс специальных исследований [13].

По данным вибродиагностики установлено, что наиболее нарушенной является подошва выработки, где наличие неплотного контакта с подстилающей толщей выявлено примерно на 30 % площади. Значительное число участков неплотного контакта с грунтом наблюдается также в кровле выработки и нижней части боковых сторон;

Анализ полученных данных показал, что необходим комплекс дополнительных специальных строительных работ для повышения устойчивости и устранения наблюдаемых водопритоков в выработку. Он включал: тампонаж закрепного пространства в зонах выявленных неплотностей контакта бетонной оболочки с налегающей толщей и в зонах разжижения прилегающего к оболочке грунта; очистку поверхности канала от наносов, снятие разрушенного приповерхностного слоя; гидроизоляцию внутренней поверхности вентканала путем выполнения многослойного набрызгбетонирования с использованием специальных добавок.

Был разработан проект выполнения работ, предусматривающий выполнение следующих операций:

ликвидацию пустот в закрепном пространстве;

стабилизацию вмещающих приконтурных пород;

создание методом мокрого торкретирования дополнительного композитного слоя для усиления, гидроизоляции и коррозионной защиты бетонной крепи.

Ликвидацию пустот, источников воды, повышение водонепроницаемости оболочки осуществляли методом тампонажа закрепного пространства, а стабилизацию вмещающих приконтурных пород – путем отжима воды жесткими цементно-песчаными растворами под избыточным давлением. После схватывания раствора выполняли омоноличивание конструкции нагнетанием водоцементного раствора. Тампонаж и цементацию выполняли многоцелевой бетоноукладочной машиной МБМ через шпур диаметром 42 мм, пробуренные в бетоне крепи и герметизируемые иньекторами. Усредненный состав тампонажного раствора следующий: цемент М400 – 600 кг; песок – 862 кг; вода – 574 кг. В процессе тампонажа наблюдался отжим воды и вынос разжиженных глинистых пород через контрольные шпур и дефектные зоны монолитного бетона. Максимальный расход тампонажного раствора через 1 шпур составил 3,6 м³.

Очистку поверхности бетонной крепи выполняли механическим способом и гидроразмывом. После удаления с поверхности выработки наносов в бетонном слое почвы выработки обнажились полости глубиной до 0,4 м различной ширины и протяженности. Полости заполняли набрызгбетонированием по «сухому» способу. Максимальный размер крупного заполнителя – 20 мм. После выравнивания почвы выполнили 5 слоев набрызгбетона по «сухому» способу. Для повышения прочности и водонепроницаемости бетона в его состав ввели добавку «Adi-Con CSF (R)». Толщина каждого слоя – 5-7 мм. При нанесении бетон в слоях поочередно модифицировали добавками жидкого стекла или полимерной добавкой «Spray Con». Выдержка после бетонирования каждого слоя составляла 12-24 часа.

Для обеспечения гидроизоляции и антикоррозионной защиты бетонной крепи канала было выполнено набрызгбетонирование по «мокрому» способу с применением модифицирующих добавок. В состав раствора для гидроизоляции входила добавка «Spray-Con WS ST». Толщина нанесенного защитного слоя – 25 мм.

Лабораторные исследования показали, что прочность защитного слоя составляет 60 МПа, а пористость, газо- и водопроницаемость не превышают установленных норм. В результате проведенных работ общий водопиток в выработку снижен на 90%. Вентиляционный канал принят в эксплуатацию.

Анализ примененных технических решений и технологий их реализации показывает их надежность и эффективность, а также применимость не только при строительстве новых объектов, но и для капитального ремонта подземных и заглубленных сооружений [14, 15].

Применение при реконструкции и капитальном ремонте описанных специальных способов, технологий создания геокомпозитных конструкций, приводит к некоторому удорожанию работ. Однако, отечественный и зарубежный опыт показывает, что такие затраты оправданы и быстро окупаются за счет снижения эксплуатационных и ремонтных затрат. Кроме того, при выборе способов строительства все большую значимость приобретают эксплуатационная надежность и экологическая безопасность объекта.

Выбор на стадии проектирования оптимальных технических решений, ме-

тодов и технологий ремонта объекта, позволяют не только снизить стоимость ремонтно-строительных работ, но и существенно уменьшить эксплуатационные затраты будущих периодов.

В последние десятилетия вырос интерес к использованию выработанного подземного пространства для повторного использования в народно-хозяйственных целях. Наиболее ценными качествами горных выработок является постоянство температуры и влажности, что является важным для технологических процессов некоторых производств, а также для длительного хранения отдельных видов промышленной и сельскохозяйственной продукции. Жесткие требования к устойчивости такого рода подземных сооружений сочетаются с необходимостью их гидроизоляции, обеспечением коррозионной стойкости, устойчивости против возгорания. В отдельных случаях предусматривается повышенная сейсмоустойчивость объекта. В указанном направлении открывается широкое поле для использования геокомпозитных структур, как с металлическими армирующими элементами, так и с полимерными, причем роль последних, с учетом их высокой коррозионной стойкости, будет возрастать.

В Украине и в других странах с атомной энергетикой прорабатываются вопросы о возможности подземного захоронения отработанных радиоактивных топливных элементов. Подземные хранилища должны быть очень высоконадежными инженерными сооружениями, исключающими возможности миграции жидкостей и газов в геосреде за пределы опасной зоны. В данном случае очевидно необходимо наряду с установкой мощных сталебетонных контейнеров осуществлять для создания второго охранного пояса укрепление и герметизацию скального массива на большую глубину. Геокомпозитная структура в этом случае помимо жестких требований к прочностным свойствам и газо-гидроизоляционным качествам должна обладать еще и высокой радиационной стойкостью.

Актуальной проблемой для большинства угольных шахт является борьба с пучением почвы горных выработок. Несмотря на значительное число исследований по указанной проблеме, до сих пор нет цельной теории, удовлетворительно объясняющей все формы проявления пучения. В то же время для отдельных категорий условий предложены эффективные технологии борьбы с пучением. Одним из перспективных методов является создание в почве геокомпозитной структуры. Можно выделить два основных подхода к указанной проблеме. Согласно первому предусматривается сдерживание деформаций непосредственной почвы путем повышения ее прочностных свойств. В рамках первого подхода разработано три основных направления, отличающихся технологией укрепления почвы: нагнетание в нее цементно-песчаного раствора с использованием ранее пробуренных шпуров, нагнетание полимерных быстротвердеющих композиций и анкерование почвы металлическими анкерами. Вторым подходом является в определенной степени противоположным. Он предусматривает создание в почве искусственно ослабленных разгрузочных зон, предназначенных для поглощения деформаций. В отдельных разработках сочетаются оба указанных подхода, например [16].

Достичь важных практических результатов в применении геокомпозитных структур невозможно без глубокого теоретического обоснования механизма их работы. При первых попытках теоретического анализа распределения напряжений в композитной (в том числе и геокомпозитной) структуре был использован феноменологический подход, при котором армированный материал рассматривался как однородный и изотропный. Он эффективен при большом количестве армирующих элементов, распределение и ориентация которых либо совершенно случайны, либо полностью упорядочены. Показатели физических свойств, характеризующие композитную среду, определяются экспериментальным путем. Применительно к геокомпозитным системам с небольшим числом армирующих элементов, характеризующихся индивидуальной длиной и ориентацией, более эффективным является структурный подход, предполагающий наличие сведений о свойствах матрицы и армирующих элементов по отдельности, а также об условиях на границе их контакта. Такая ситуация возникает при рассмотрении задачи об анкероании приконтурной зоны горной выработки и именно в этом направлении получены наиболее значительные результаты [17]. Однако преимущественное число работ рассматривает задачу в плоской постановке, а разработка пространственных, кинематически связанных, геокомпозитных конструкций с вариацией длины армирующих элементов и угла их наклона, как к вертикальной, так и к продольной оси выработки не имеет достаточно надежной теоретической основы.

Проведенный обзор использования геокомпозитных конструкций для поддержания устойчивости подземных объектов показал, что они имеют широкие перспективы для развития. Как и любая другая крепь, они имеют свои преимущества и определенные недостатки. Крепление выработок на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях не может быть эффективным при использовании только одного вида крепи. Задача специалистов в области геомеханики состоит в создании адаптивных комбинированных охранных систем, базирующихся на эффекте синергизма (взаимного усиления действия отдельно взятых элементов системы), в которых геокомпозитные конструкции будут являться ключевыми звеньями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яценко, В.Ф. Прочность композиционных материалов [Текст] / В.Ф. Яценко. К.: Вища школа, 1988. – 191 с.
2. Sprague, C. J. The evolution of geotextile reinforced embankments [Text] / C. J. Sprague, M. Koutsourais // Geotech. Spec. Publ. 30. R. H. Borden, R. D. Holtz, and I. Juran, eds. — New York: ASCE, 1992. — P. 1129–1141.
3. Fowler, J. Geotubes and Geocontainers for Hydraulic Applications [Text] J. Fowler // Proc, Cleveland Section ASCE. — New York, 1995.
4. Comer, A.I. Remediation of existing canal linings [Text] / A.I. Comer, M. Kube, M. Sayer // J. Geotextiles and Geomembranes. — 1996. — Vol. 14 (5–6). — P. 313–326.
5. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт [Текст] / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. — Днепропетровск: Вільпо, 2002. — 372 с.
6. Меткалф, А. Поверхности раздела в металлических композитах [Текст] / А. Меткалф; пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 487 с.
7. Усаченко, Б.М. Повышение устойчивости сопряжений «штрек-лава» применением комбинированных систем «рама - анкерная натяжная крепь» [Текст] / Б.М. Усаченко, В.Ю. Куклин, В.Н. Трипольский // Сб. науч. тр. НГУ. — 2002. — Вып. 15, т. 2. — С. 118–122.

8. Открытие № 318. Закономерность пространственно-временной структурно-фазовой самоорганизации грунтовых и породных массивов вокруг протяженных подземных выработок [Текст] / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяхов, В.В. Левит, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко, В.Б. Усаченко, А.А. Яланский // Научные открытия, идеи, гипотезы (1992-2007). Информационно-аналитический обзор. – М.: МААНОН, 2008. – С. 298-299.
9. Курносов, А.Т. Стеклопластиковые анкера в подготовительных выработках [Текст] / А.Т. Курносов, В.Б. Ковбасенко, В.А. Мазан, С.Я. Иванчишин // Уголь Украины. – 2000. - № 9. – С. 18-19.
10. Мусиенко, С.П. Геомеханические и горнотехнические аспекты повышения устойчивости горных выработок с применением тампонажа [Текст] / С.П. Мусиенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2002. – Вып. 40. – С. 77-86.
11. Мусиенко, С.П. Применение специальных способов строительства для снижения водо-и воздухопроницаемости бетонной крепи горных выработок [Текст] / С.П. Мусиенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 30. – С. 219-223.
12. Борщевский, С.В. Применение проникающей гидроизоляции в подземном строительстве [Текст] / С.В. Борщевский // Геотехнології та управління виробництвом ХХІ сторіччя. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Т.1. – С. 25-32.
13. Выполнить геофизические исследования вентиляционного канала восточного вентиляционного ствола № 1 шахты им. А.А. Засядько: Отчет о НИР [Текст] / Научный руководитель Б.М. Усаченко.- Днепропетровск: НПП Технополис «Экоиндустрия», 2001. – 84 с.
14. Мусиенко, С.П. Применение специальных способов строительства при возведении высоконагруженных комбинированных охранных систем [Текст] / С.П. Мусиенко // Геотехническая механика: Межвед сб. науч. тр /ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 68. – С. 285-291.
15. Осадчий, С.Д. Анализ и подходы к разработке технологических решений реконструкции и ремонта гидротехнических сооружений [Текст] / С.Д. Осадчий, Н.М. Герасимович, С.П. Мусиенко // Гидротехническое строительство. 2007.- № 8 – С. 7 -11.
16. Рязанцев, А.П. Разработка нового способа борьбы с пучением пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев // Сб. науч. тр. НГУ. – 2003. – Вып. 17, т. 2. – С. 79-83.
17. Круковский, А.П. Влияние прочности закрепления анкеров на формирование несущего перекрытия в кровле горной выработки [Текст] / А.П. Круковский // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 51. – С. 239-250.