

УДК 622.281

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕСТА СВЯЗИ СТАЛЕПОЛИМЕРНОГО АНКЕРА С ПОРОДНЫМ МАССИВОМ

Цикра А.А. (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», г. Донецк, Украина),

Назимко В.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*Доведено, що опір сталеполімерного анкеру силам гірського тиску розповсюджується уздовж контакту з породною стінкою шпур у вигляді хвилі, яка супроводжується хвилею утоніння анкеру, а за нею слідує хвиля руйнування контакту.*

*Rock bolt interface bearing capacity develops as a wave along the interface. A wave of the bolt diameter shrinkage follows the bearing capacity wave and is followed by the interface destruction.*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных способов обеспечения устойчивости кровли горных выработок является применение сталеполимерной крепи, объемы использования которой последнее время на отечественных шахтах неуклонно возрастают [1-7]. Вместе с тем механизм сопротивления такой крепи силам горного давления на сегодня изучен недостаточно полно. Главным элементом, определяющим прочность закрепления сталеполимерного анкера в шпуре, является контакт отвердевшей полимерной смолы с породной стенкой шпура. Однако нет точных сведений о том, как происходит деформирование и разрушение такого контакта. Это затрудняет поиски резервов повышения эффективности работы сталеполимерных крепей.

Исследование механизма разрушения контакта в шахтных условиях весьма сложно из-за трудностей доступа к изучаемому контакту. В лабораторных условиях стендовые испытания

сталеполимерных анкеров более доступны и менее трудоемки. Однако есть вопросы, которые можно достаточно детально исследовать только с помощью математического моделирования. В частности, это касается эволюции напряженно-деформированного состояния контакта между отвердевшим полимером и породной стенкой шпура. В связи с этим задачей данной статьи является изучение закономерностей изменения напряжений и деформаций вдоль контакта смола-порода с помощью численного компьютерного моделирования.

### МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 показана физическая схема взаимодействия сталеполимерного анкера с породой. Стержень анкера 1 размещен в шпуре, причем зазор 2 между телом стержня и стенкой шпура заполнен отвердевшей полимерной смолой 3. Таким образом осуществляется связь между анкером и породным массивом 4.

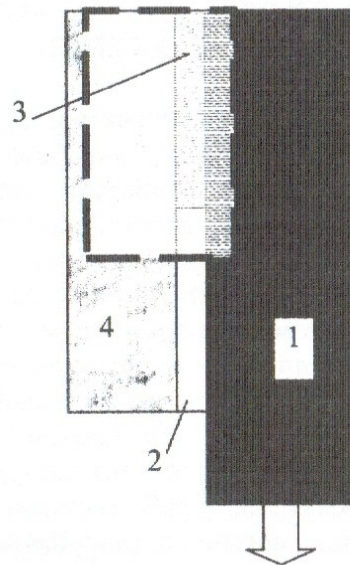


Рис. 1. Физическая схема взаимодействия сталеполимерного анкера с породой

В процессе проведения компьютерного моделирования приняты параметры модели, которые отвечают наиболее массовым параметрам технологии анкерного крепления горных выработок с использованием сталеполимерных анкеров. Диаметр стержня анкера принят равным  $25 \pm 0,5$  мм, диаметр по выступам  $28 \pm 0,5$  мм, диаметр шпура (при внешнем диаметре бурильной коронки 32,5 мм) 33 мм по прочным породам и 34 мм по слабым.

Прочность вмещающих пород принята равной 40 МПа, прочность стали, из которой выполнен анкер 700 МПа, прочность отвердевшего связующего полимера 100 МПа. Значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона упомянутых материалов соответственно указаны в таблице.

Таблица 1

Рис. 2. Расчетная схема  
Исходные данные, принятые при проведении компьютерного моделирования

Наименование материала	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Модуль упругости или модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона
Сталь	500	200	0,24
Эпоксидный компаунд	100	15	0,23
Алевролит	50	10	0,30

Такие исходные данные соответствуют наиболее типичным условиям массового применения сталеполимерной анкерной крепи. Это гарантирует получение типичных особенностей физического процесса разрушения интерфейса, а следовательно возможность обобщения результатов исследований на широкий объем применяемых сталеполимерных крепей. Другими словами при отклонении показателей материалов от использованных в модели выводы в качественном плане не изменятся.

На рис. 2. показан пример расчетной схемы, используемой для анализа особенностей разрушения интерфейса «анкер – отвердевший полимер – порода». Эта схема построена на фрагменте физической схемы, ограниченном на рис. 1 пунктирным прямоугольником. Для того, чтобы подробно исследовать все физические процессы, протекающие в области интерфейса, необходима детальная разбивка расчетной области на дискретные элементы. Кроме того, шаг моделирования по времени должен быть не более критического, при котором теряется устойчивость решения. С учетом сказанного общее время решения задачи и объем выдаваемой информации получается весьма большим и необходимо его удерживать в разумных пределах. Эти пределы определяются временем решения задачи, которое желательно не увеличивать более 2-3 часов, а также временем и трудоемкостью обработки результатов расчета.

Пробными расчетами установлено, что расположение границ расчетной схемы, указанное на рис. 2 пунктирными линиями, не существенно искажает результаты моделирования, сохраняя при этом время решения задачи в разумных пределах. При этом левая граница расчетной области по породе проходит на расстоянии не ближе трех мощностей слоя полимерного материала, а правая расположена в теле анкера на расстоянии одной толщины указанного слоя.

Вдоль левой границы расчетной схемы выполнены выступы, за которые цепляется порода. Такое решение оказалось надежнее, чем приложение граничных условий в виде сил. Это решение принято по результатам пробных расчетов и позволяет получить

реальную картину деформаций вмещающей породы без существенного искажения результатов. Заметим также, что снижение искажений напряженно-деформированного состояния модели было достигнуто дополнительными мерами, которые предусматривают возможность задавать стенкам на границе модели упругих свойств. В результате появилась дополнительная возможность приблизить стенки модели без ухудшения качества результатов расчета.

Усилие выдергивания анкера в типичной расчетной схеме средних размеров составляет около 300 кН и нарастает в течение 5 секунд. Число циклов пересчета координат дискретных элементов принято равным 300 тысяч. За это время происходит полное разрушение интерфейса, что проверяется по падению сопротивления анкера практически до нуля, а величина перемещения (вытягивания) кончика анкера достигает 35 мм.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 и 4 показана эволюция зон разрушения в окрестности контакта анкера с породным массивом. В течение первых ста тысяч циклов расчета усилие вытаскивания анкера нарастает, потому что зона разрушения еще не охватила всю область контакта анкера с отвердевшим полимером или полимера с окружающей породой, то есть область интерфейса. Это видно на распределениях зон поврежденности интерфейса на фрагментах рис. 3. Места поврежденности отмечены темными точками. Микротрещины начинают прорастать вдоль интерфейса со стороны устья шпура, а не по всей длине контакта анкера с породной стенкой. Это очень важное обстоятельство, которое в последствии будет играть решающую роль в механизме развития сопротивления анкера силам вытягивания. Процесс разрушения контактной области между анкером и породой начался после 30000 циклов нагружения. На левом фрагменте рис. 3 видно, что на 50-тысячном цикле испытаний интерфейс разрушился на глубину 7 дискретных элементов или с учетом того, что величина зазора между стержнем анкера и породной стенкой

шпура составляла в среднем три с половиной элемента, на глубину двух мощностей зазора. Около 70% связей между соседними дискретными элементами разрушились от касательных напряжений, однако оставшаяся часть связей повреждена растягивающими нагрузками. Это свидетельствует о сложной картине напряженно-деформированного состояния интерфейса, сопровождающего процесс разрушения.

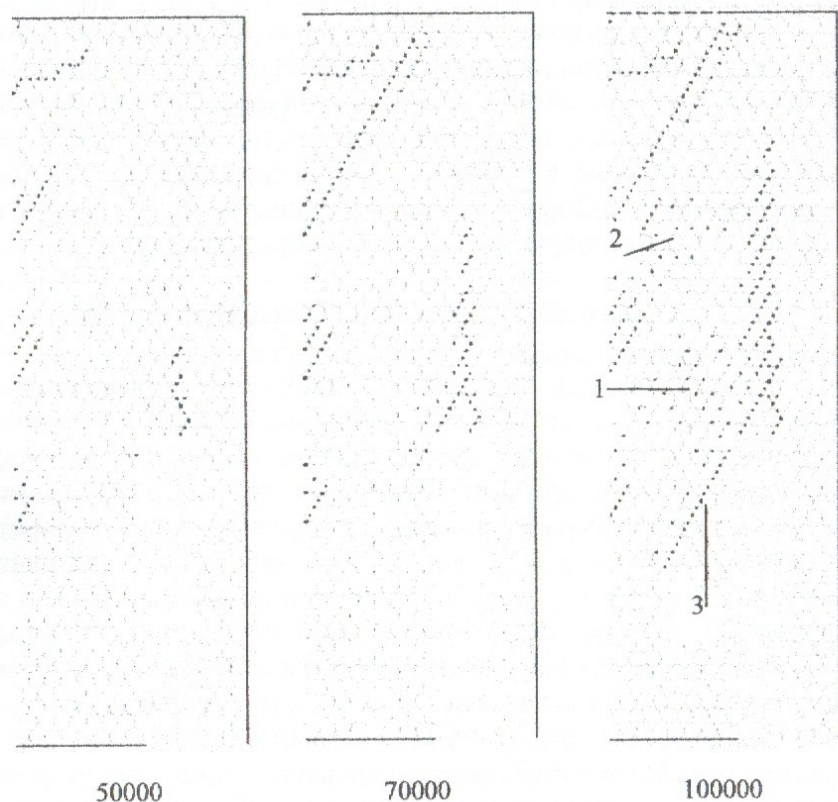


Рис. 3. Динамика разрушения интерфейса «анкерный стержень – отвердевший полимер – горная порода» на начальных стадиях

По мере увеличения вытягивающей силы зона разрушений прорастает вглубь шпура и на 70-тысячном цикле моделирования достигает почти пяти мощностей зазора, что видно на среднем фрагменте рис. 3. При этом наряду с увеличением длины зоны разрушения наблюдается и ее утолщение, которое со стороны устья шпура захватывает и часть породного массива. У левой границы расчетной области разрушения связаны с локальным влиянием концентраций от удерживающих породу выступов. Другими словами эти области разрушения не связаны с разрушением интерфейса. Поэтому указанные области разрушений не рассматриваем как значимые для исследуемого процесса.

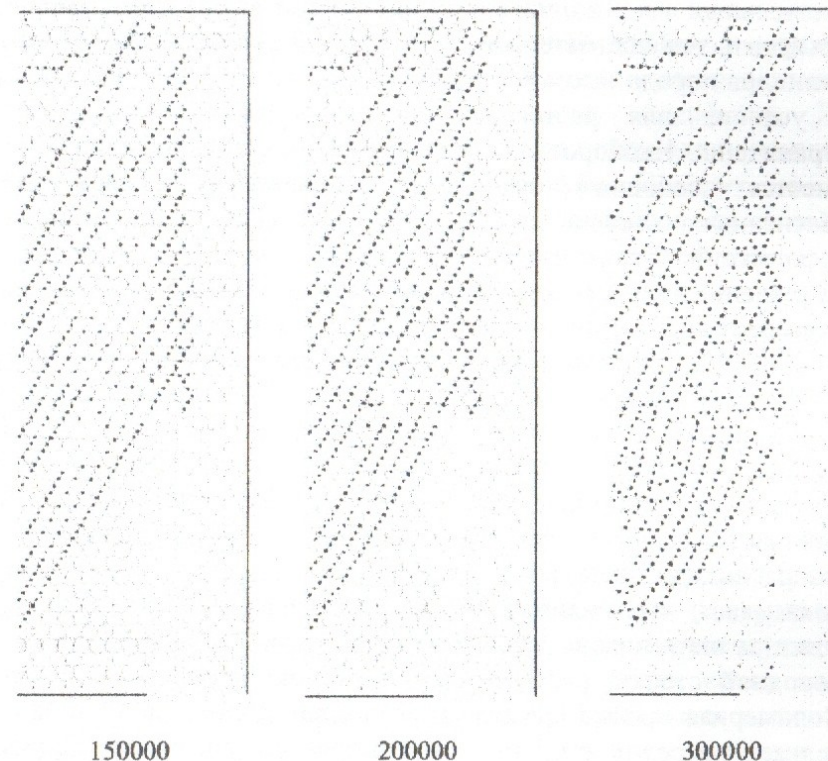


Рис. 4. Завершающая стадия процесса разрушения интерфейса

К стотысячному циклу моделирования область разрушения продвинулась вглубь шпура на семь мощностей зазора между анкером и стенкой шпура. При этом продолжается тенденция утолщения зоны разрушения за счет захвата новых участков примыкающего породного массива. Наиболее обширный участок 1 разрушения примыкающего породного массива наблюдается у передовой кромки отвердевшего полимерного цилиндра. Участок 2 образуется с некоторым отставанием, а участок 3 с опережением относительно указанной кромки. Участки разрушения примыкающей породы позади кромки (по ходу вытаскивания анкера) образуются исключительно от касательных напряжений, а передовой участок 3 от комбинации касательных и нормальных растягивающих. Это можно объяснить тем обстоятельством, что позади кромки полимерного цилиндра порода находится в объемном напряженном состоянии и условия для растягивающих деформаций здесь весьма ограничены. Наоборот, впереди кромки полимерного цилиндра имеется свободный зазор, не заполненный смолой, что обеспечивает степень свободы для реализации растягивающих деформаций. Такая закономерность согласуется с механикой разрушений твердого тела в сложном напряженном состоянии, что повышает достоверность полученных результатов.

На 150-тысячном цикле моделирования интерфейс между анкером и породой разрушился почти на полную длину в пределах расчетной схемы (левый фрагмент на рис. 4). На последующих этапах зона разрушения расширяется по всей площади интерфейса. При этом на 300-тысячном цикле начинается вспучивание породной стенки в сторону свободного зазора между анкером и стенкой шпура. Это вспучивание показывает, что цилиндрическая полимерная пробка движется вслед за вытягиваемым анкером и, разрушая передовой участок породной стенки, разрыхляется в сторону свободного зазора. Полимерная пробка срезает выступы вдоль породной стенки и толкает вперед в сторону устья шпура разрушенные обломки стенки.

Как видим, интерфейс «анкер – отвердевший полимер – окружающая порода» не разрушается сразу по всей длине, а процесс разрушения перемещается в виде волны вдоль интерфейса, начиная от устья полимерной пробки и продвигаясь вглубь шпура. Это очень важный вывод, свидетельствующий о том, что длина закрепления анкера не является решающим фактором для обеспечения прочности закрепления. Какая бы длина интерфейса не была, он все равно разрушается по частям, и поэтому при идеальных условиях, а именно при идеально гладких стенках шпура, прочность закрепления сталепolyмерного анкера определяется не длиной инкапсуляции, а какими-то иными факторами или фактором.

Вывод о постепенном разрушении интерфейса в виде волны, распространяющейся от устья полимерной пробки в глубину шпура, подтверждается и уточняется распределением продольных усилий, возникающих вдоль интерфейса. Для удобства эпюры продольных усилий выполнены вдоль контакта полимерного материала со стенкой шпура. Поэтому на тех участках, где будет наблюдаться значительное продольное усилие, контакт между стенкой и анкером сохранился, а где произошла полная потеря связи, продольное усилие должно приближаться к нулю.

На рис. 5 показана эволюция эпюр распределения продольного усилия вдоль контакта на всех характерных этапах моделирования. Участок закрепления анкера полимерной пробкой указан фигурной скобкой. Направление вытаскивания анкера указано полкой стрелкой. Номерами этапов обозначены кривые распределения продольного усилия в точках, где усилие имеет максимум. Так на 50-тысячном цикле моделирования заметные продольные усилия наблюдаются на участке, составляющем примерно 40% от общей длины инкапсуляции. При этом максимум усилий расположен вблизи конца зоны разрушений интерфейса на данном этапе. Наибольшая величина продольного усилия составляет всего 0,45 кН, что в несколько раз меньше по сравнению с абсолютным максимумом, зафиксированным на 120-тысячном цикле и равном 1,8 кН.

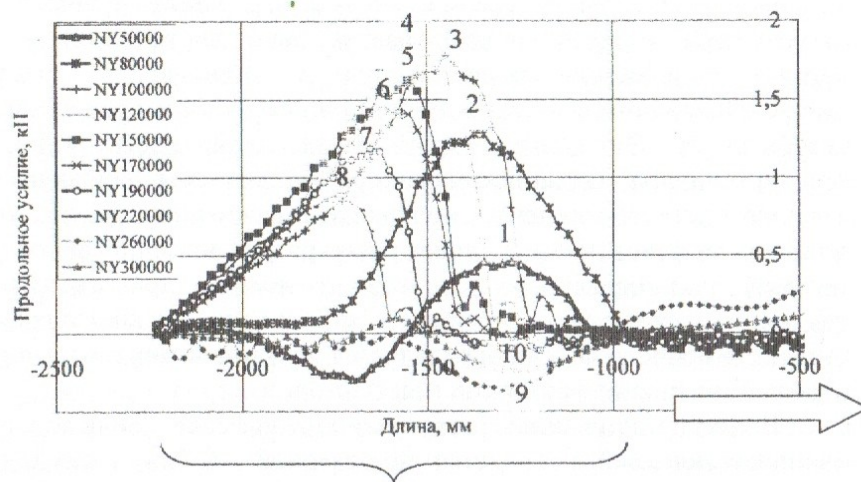


Рис. 5. Характер изменения продольных усилий вдоль интерфейса в процессе вытягивания анкера

Обратим внимание на тот факт, что большая часть интерфейса, а значит и стержня анкера остается, не натянута. Это значит, что работу сопротивления вытягиванию выполняет только часть анкера, однако уже на первом этапе некоторый участок интерфейса разрушен. Другими словами подтверждается предположение о том, что упругая, пластическая и запредельная стадии деформирования сосуществуют в одно и то же время.

На втором, третьем и четвертом этапах продольное усилие возрастает, причем увеличивается и длина участка, на котором оно действует. Тем не менее, даже на 80-тысячном цикле около 40% глубинного участка интерфейса остается совершенно не нагруженным. На втором этапе или на 80-тысячном цикле деформирования область роста продольного усилия увеличивается относительно первоначальной зоны 1 в обе стороны, то есть как в направлении устья полимерной пробки, так и вглубь шпура.

Однако на третьем этапе моделирования или на сотысячном цикле участок, на котором имеется силовая или

кинематическая связь между анкером и породной стенкой шпура перемещается вглубь этого шпура, потому что участок, примыкающий к устью полимерной пробки, полностью разгружается от продольных усилий. Легко заметить, как места максимумов сопротивления анкера вытягиванию перемещаются справа налево, то есть вглубь шпура, что видно по перемещению позиций чисел 1 – 4 на графике рис. 5. В том же направлении перемещается и участок закрепления на третьем этапе моделирования. Это говорит о том, что анкер сопротивляется вытягивающему усилию не по всей длине инкапсуляции, а только на ее части. Сначала сопротивление развивается у устья полимерной пробки, то есть в начале места закрепления со стороны вытягивания. Затем участок сопротивления перемещается вглубь шпура, по мере отрыва стержня анкера на передовых участках со стороны вытягивания.

Установленная закономерность подтверждается на последующих этапах моделирования. Пики максимумов сопротивления на этапах 5-8 продолжают перемещаться в том же направлении, которое противоположно направлению вытягивания анкера. Начало участка связи анкера с породой также перемещается в том же направлении, что подтверждает вывод о его постепенном отрыве, граница которого движется в виде волны вглубь массива. Более того, максимум сопротивления по мере отрыва тела анкера от породных стенок также постепенно падает после этапа 4. В конечном итоге после полного отсоединения анкера от стенок и разрушения интерфейса анкер вытягивается практически без усилий, что видно по кривым 9 и 10. Незначительная величина отрицательных усилий свидетельствует о некоторой динамике, возникающей при окончательном вырывании анкера из стесненного разрушенными обломками зазора. Такое перераспределение усилия сопротивления анкера вытягиванию хорошо согласуется с общими законами геомеханики необратимых процессов деформирования и разрушения вмещающих выработку пород.

Подчеркнем, что участки кинематической связи анкера с породной стенкой шпура не всегда совпадали с участком, на

котором развивались продольные усилия сопротивления анкера. Поэтому там, где область согласно распределениям на рис. 3 и 4 была уже нарушена, а усилие сопротивления сохранялось, мы именуем участком, на котором сохраняется силовая связь между анкером и породной стенкой. Эта связь обусловлена либо не полным разрушением интерфейса, либо заклиниванием и трением разрушенных фрагментов интерфейса.

Графики на рис. 6 и 7 еще детальнее раскрывают причины поочередного перемещения сектора сопротивления вдоль длины инкапсулированного участка анкера. Для этого эпюры на двух характерных циклах деформирования интерфейса совмещены с соответствующими эпюрами поперечной деформации стержня анкера, которая в результате натяжения выражалась в виде его утонения.

На графиках отчетливо видно, что анкер, начиная с головки, за которую его вытаскивают и заканчивая точкой, где отмечается конец участка сопротивления, испытывает деформации утонения. Анализ распределения нормальных напряжений свидетельствует о том, что на участке утонения развиваются растягивающие напряжения в направлении нормали к оси анкера. Эти

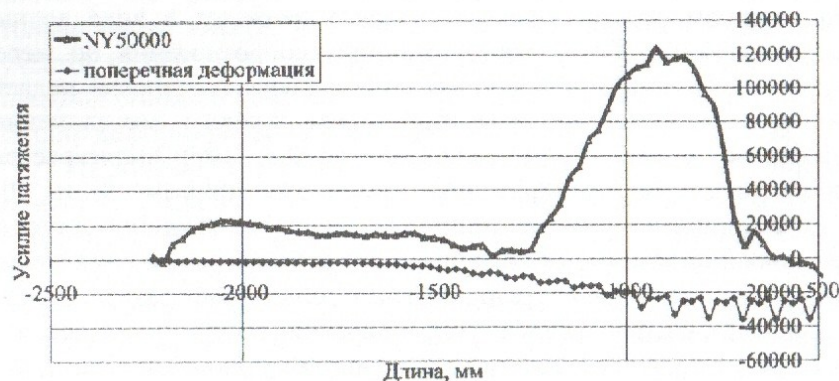


Рис. 6. Сопоставление эпюр продольной силы сопротивления и поперечной деформации анкера на 50-тысячном цикле моделирования

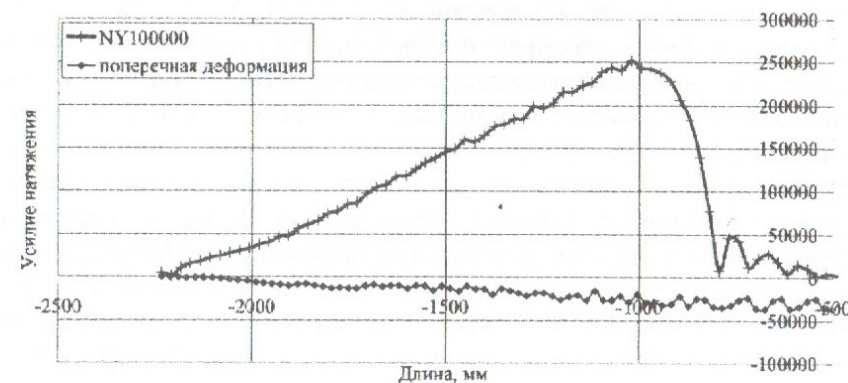


Рис. 7. Сравнение эпюр продольной силы сопротивления и поперечной деформации анкера на 100-тысячном цикле моделирования

напряжения содействуют разрушению интерфейса, уменьшая всестороннее сжатие, в котором находится участок.

Подводя итог результатам моделирования можно составить такую последовательность физических процессов деформирования и разрушения интерфейса «анкер – отвердевший полимерный цилиндр – породная стенка шпура». По мере увеличения усилия натяжения, вытаскиваемый анкер начинает утоняться на свободном участке между головкой и точкой, где начинается участок инкапсуляции. При этом усилие сопротивления вытаскиванию вначале развивается на ограниченном участке, примыкающем к устью полимерной пробки со стороны вытаскивания. По мере разрушения интерфейса, которое начинается возле устья полимерной пробки или вначале участка инкапсуляции со стороны вытягивания, сектор, на котором развивается сопротивление вытаскиванию перемещается вглубь шпура. При этом сначала по мере вытягивания анкера максимальное усилие сопротивления нарастает, а затем начинает падать при приближении к концу участка инкапсуляции. Сопротивление анкера развивается за счет

кинематической связи анкера с породной стенкой, или физической связи, которая обеспечивается за счет неполного разрушения интерфейса или заклинивания и трения разрушенных фрагментов. Таким образом, участок сопротивления перемещается от устья шпура в глубину массива, а, следовательно, сопротивление *не развивается* по всей длине инкапсулированного участка сразу, в одно и то же время, а происходит *по очереди*. Фактически задняя или глубинная часть анкера остается ненапрянутой, в то время как участок между его головкой и точкой, где находится фронт зоны разрушения интерфейса испытывает интенсивное натяжение. Потери связи между стержнем анкера и породной стенкой содействует процесс его утонения, участок которого также передвигается в виде волны вслед за передвижением зон разрушения и развития продольного усилия сопротивления. Участки разрушения, продольного сопротивления и утонения не совпадают между собою. Впереди движется участок продольного сопротивления, за ним перемещается волна утонения, а затем следует волна разрушения интерфейса. Полученный вывод очень важен для практики. Из него следует, что сопротивление сталеполимерного анкера силам горного давления определяется не длиной инкапсуляции, а некоторыми другими факторами, которые следует изучить.

Теперь становится очевидно, что главной причиной закрепления сталеполимерного анкера в шпуре является наличие выступов, впадин и царапин на стенках шпура. Именно они исполняют роль якорей, которые закрепляют анкер в массиве горных пород и сопротивляются его вытаскиванию. Теперь более отчетливо проясняется роль прочностных свойств горных пород. При малой прочности вмещающих пород выступы на стенках шпура легко срезаются отвердевшим полимерным цилиндром, что позволяет достаточно легко вытащить анкер из шпура. По мере увеличения прочности породных стенок выступы срезаются труднее, что пропорционально увеличивает прочность закрепления сталеполимерного анкера. Однако по мере приближения прочности вмещающих пород к прочности

полимерной пробки вероятность срезания как породных, так и полимерных выступов становится соизмеримой, что стабилизирует усилие закрепления. Дальнейшее увеличение прочности породы ничего не дает, поскольку теперь срабатывает менее прочный элемент, которым является выступ из полимера. Именно этим можно объяснить явление стабилизации прочности закрепления сталеполимерного анкера при увеличении прочности вмещающих пород до определенного предела [8].

Дальнейшими исследованиями предусматривается изучить подробнее эффект выступов на стенках шпура.

## ВЫВОДЫ

Сопротивление сталеполимерного анкера силам горного давления *не развивается* по всей длине инкапсулированного участка сразу, в одно и то же время, а происходит *по очереди* в виде перемещающейся волны, которая сопровождается волной утонения стержня анкера, за которой следует волна разрушения системы «анкер – смола – порода». Поэтому длина участка инкапсуляции сталеполимерного анкера не является решающим фактором, определяющим прочность закрепления анкера в массиве горных пород.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Семевский В.Н. Штанговая крепь.-М.: Металлургиздат, 1958.-234 с.
2. Борисов А.А. Новые методы расчета штанговой крепи. - М.: Госгортехиздат, 1962.-125с.
3. Горбачев Т.Ф., Штумпф Г.Г., Стрыгин Б.И. Применение анкерной крепи в подготовительных выработках. – Новосибирск: Наука, 1972. -246с.
4. Широков А.П., Лидер В.А., Писляков Б.Г. Расчет анкерной крепи для различных условий применения. – М.: Недра, 1976. – 208с.



5. Анкерная крепь: Справочник/А.П. Широков и др.-М.: Недра, 1990.-295с.
6. Мельников Н.И. Анкерная крепь. – М.: Недра, 1980.- 252с.
7. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт.-Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2002.-372с.
8. Атрушкевич О.А. Научная оценка соответствия конструкций анкерной крепи горно-геологическим условиям ее применения и обоснование комбинированных видов анкеров для большинства горно-геологических условий//Уголь, №3, 2001.-С. 60-64.

*Здано до редакції 30.03.2006  
Рекомендував до друку д.т.н. Касьян М.М.*

*© Цикра А.А., Назимко В.В., 2006*