

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



В.В. КОВАЛЕНКО

**ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ ОТ КОРРОЗИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРКРЕТ-БЕТОНА**

Монография

Днепропетровск
НГУ
2012

УДК 622.283:691.327
ББК 38.54:34.66:38.33
К 56

Рекомендовано до друку вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 5 від 11 квітня 2011).

Рецензенти:

Шашенко О.М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри будівництва і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет»;

Борщевський С.В. – д-р техн. наук, проф. кафедри будівництва шахт і підземних споруд Донецького національного технічного університету.

У роботі проаналізовано чинники, які впливають на корозію металевого кріплення в гірничих виробках. На основі проведення прискорених корозійних випробувань визначено залежність перебігу процесу корозії від наявності окалини, мінералізації шахтних вод, а також зміни швидкості корозії від діючих навантажень, що дозволило прогнозувати корозійне зношування з урахуванням умов експлуатації. Побудовано номограму для визначення зміни несучої здатності СВІП-профілів протягом терміну експлуатації з огляду на умови вугільних шахт на підприємствах «Добропіллявугілля» та «Павлоградвугілля». Розроблено склади сумішей торкрет-бетону, в яких було використано золу винесення як заміну частини цементу. Також було проведено аналіз захисної дії бетонних покриттів по відношенню до металу кріплення.

Для наукових та інженерно-технічних працівників інститутів і гірничодобувних підприємств. Може бути корисною аспірантам і студентам вузів.

Коваленко, В.В.

К 56 Защита металлической крепи от коррозии с использованием торкрет-бетона [Текст]: моногр. / В.В. Коваленко. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 108 с.

ISBN 978-966-350-324-0

В работе проанализированы факторы, влияющие на коррозию металлической крепи в горных выработках. На основе проведения ускоренных коррозионных испытаний определена зависимость протекания процесса коррозии от наличия окалины, минерализации шахтных вод, а также изменения скорости коррозии от действующих нагрузок, что позволило прогнозировать коррозионный износ с учетом условий эксплуатации. Построена номограмма для определения изменения несущей способности СВІП-профилей в течение срока эксплуатации применительно к условиям угольных шахт на предприятиях «Добропольеуголь» и «Павлоградуголь». Разработаны составы смесей торкрет-бетона, в которых была использована зола уноса в качестве замены части цемента. Также был проведен анализ защитного действия бетонных покрытий по отношению к металлу крепи.

Для научных и инженерно-технических работников институтов и горнодобывающих предприятий. Может быть полезной аспирантам и студентам вузов.

Ил. 57. Библиогр.: 118 назв.

УДК 622.283:691.327
ББК 38.54:34.66:38.33

ISBN 978-966-350-324-0

© В.В. Коваленко, 2012
© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»; 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Глава 1. Современное состояние условий эксплуатации и поддержания металлической крепи в горных выработках	7
1.1. Состояние подземных горных выработок на угольных шахтах Украины.....	7
1.2. Основные способы повышения несущей способности металлической крепи в горных выработках.....	9
1.3. Состояние изучения проблемы устойчивости выработок, испытывающих влияние агрессивных шахтных вод.....	15
1.3.1. Теоретические и экспериментальные исследования коррозии металлической крепи.....	15
1.3.2. Основные способы защиты металлической крепи от коррозии.....	17
1.3.3. Противокоррозионные покрытия подземных сооружений.....	20
Глава 2. Шахтные и лабораторные исследования коррозии металлической арочной крепи	24
2.1. Общие положения.....	24
2.2. Характеристика горно-геологических условий и проведение шахтных исследований.....	31
2.2.1. Горно-геологические условия и особенности подземных вод на шахтах ООО «ДТЭК Добропольеуголь».....	31
2.2.2. Горно-геологические условия и особенности подземных вод на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».....	34
2.2.3. Натурные исследования коррозии металлической крепи. Анализ факторов, обуславливающих образование коррозии на её поверхности.....	35
2.3. Ускоренные коррозионные испытания (УКИ). Технология проведения экспериментов.....	38
2.3.1. Выбор способа и условий проведения УКИ	38
2.3.2. Определение влияния окислительности на коррозию стали марки Ст. 5 в зависимости от водородного показателя рН водного раствора.....	40
2.3.3. Определение влияния концентрации нейтральных солей на скорость коррозии стали марки Ст 5.....	43
2.3.4. Определение зависимости протекания процесса коррозии в металлических образцах, испытывающих действие изгибающих моментов.....	46
Выводы к главе 2.....	50

Глава 3. Аналитические исследования изменений несущей способности специальных взаимозаменяемых профилей под влиянием коррозии.....	51
3.1. Определение зависимости изменения несущей способности специального взаимозаменяемого профиля (СВП) от коррозионного износа.....	51
3.2. Результаты аналитических исследований изменения несущей способности профилей крепи в зависимости от их коррозионного износа.....	57
Выводы к главе 3.....	58
Глава 4. Разработка эффективных строительных смесей для защиты металлической крепи от коррозии.....	59
4.1. Общие положения.....	59
4.2. Предупреждение возможности возникновения коррозии металлической крепи под слоем торкрет-бетона.....	65
4.3. Подбор составов смесей для торкрет-бетонных покрытий.....	66
4.4. Испытания защитных покрытий на основе торкрет-бетона.....	68
4.4.1. Сущность потенциостатического метода.....	68
4.4.2. Результаты исследования коррозионной стойкости торкрет-бетонных покрытий потенциостатическим методом.....	71
4.4.3. Метод электрических сопротивлений.....	73
4.4.4. Анализ результатов лабораторных исследований.....	78
4.4.5. Определение коррозии металла под защитным покрытием торкрет-бетона различной толщины в условиях воздействия минерализованных вод.....	80
Выводы к главе 4.....	81
Глава 5. Шахтные исследования способа защиты арочной металлической крепи торкрет-бетоном	83
5.1. Определение толщины торкрет-бетонного покрытия и технологии нанесения защитного слоя.....	83
5.2. Разработка методики для определения толщины торкрет-бетонного покрытия на металлической крепи с учетом условий эксплуатации.....	85
5.2.1. Технология нанесения защитного торкрет-бетонного покрытия на элементы крепи.....	91
5.3. Рациональная область применения торкрет-бетона для защиты металлической крепи от коррозии.....	93
5.4. Прогноз применения торкрет-бетона в качестве защиты металлической крепи от коррозии.....	94
Выводы к главе 5.....	95

Список используемой	96
Приложение 1. Данные о гранулометрическом составе песков, добываемых на карьерах и комбинатах Донецкой и Днепропетровской областей.....	103
Приложение 2. Гранулометрический состав золошлаковой смеси из отходов, полученных на Углегорской	106
Приложение 3. Результаты испытаний на прочность образцов из цементно-песчаного раствора с добавлением золы	107

Введение

Современное состояние горнопроходческих работ характеризуется постоянным ростом протяженности поддерживаемых выработок, сложными горно-геологическими условиями, что приводит к увеличению затрат на проведение горных выработок и поддержание крепи. Основным видом крепи на угольных шахтах Украины является металлическая рамная. Свыше 90 % всех выработок на шахтах Донбасса поддерживают металлической арочной крепью из специального взаимозаменяемого профиля (СВП).

В процессе эксплуатации СВП эффективность использования металла для крепления выработок существенно снижается из-за его коррозионной способности. Агрессивные шахтные и подземные воды, влагонасыщенная среда, в которой находится крепь, наличие блуждающих токов, а также интенсивный обмен воздуха в выработке способствуют возникновению окислительных процессов в металле. Результатом этого является относительно быстрый, в течение 7...10 лет, выход металлической крепи из строя. Таким образом, частая замена данных конструкций тормозит работу шахт, нарушает безопасность производства, что в конечном итоге ведет к перерасходу средств. В этих обстоятельствах огромны также и косвенные убытки, к которым можно отнести затраты на борьбу с коррозией металла, работы по восстановлению и поддержанию выработок.

В основу изучения коррозии металлических элементов крепи положен комплексный подход, который включает в себя анализ и обобщение литературных источников по теме данной книги, шахтные инструментальные наблюдения, аналитические и лабораторные исследования на основе ускоренных коррозионных испытаний, с использованием методов строительной механики, электротехники и электрохимической потенциометрии.

Защита металлической крепи от коррозии в данной монографии рассматривается с точки зрения использования торкрет-бетонного покрытия, которое обладает наилучшими прочностными характеристиками среди всех известных неорганических покрытий.

В качестве базовых объектов исследований были определены шахты «Алмазная» (ГХК «Добропольеуголь»), «Благодатная», «Западно-Донбасская», им. Героев Космоса, им. Сташкова (ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»).

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОДДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

1.1. Состояние подземных горных выработок на угольных шахтах Украины

Развитие шахтного комплекса и достижение необходимого уровня угледобычи возможно только в случае эффективной эксплуатации всех звеньев технологической цепи. Поэтому в настоящее время особую актуальность приобретает проблема обеспечения устойчивости выработок, от состояния которых зависит бесперебойная работа шахты по добыче угля. Современное состояние горнопроходческих работ характеризуется неизменным ростом протяженности поддерживаемых выработок и увеличением затрат на их возведение и эксплуатацию.

Кризисное состояние угледобывающей промышленности в Донбассе наметилось еще с конца 70-х годов. Снижение добычи в среднем на 2 % в год после 1990 года достигло уровня 10...15 % [1]. Положение усугубляется старением шахтного фонда, изношенностью оборудования и растянутостью коммуникаций. Три четверти шахт работают уже более 30 лет. Каждая третья шахта опасна по газовым выбросам. Газоносность угольных пластов достигает 40 м³ метана на тонну сухой беззольной массы. Из шахт с каждой тонной угля в среднем откачивается 6 кубометров воды. В 2002 г. средняя глубина разработки приблизилась к 800 м, а на отдельных шахтах достигла 1600 м.

Повсеместно шахтный фонд устарел и не отвечает современным требованиям. Три четверти шахт работают без реконструкции 20 и более лет, имеют низкий уровень техники и технологии угледобычи. Некоторые основные сведения о состоянии протяженных горных выработок угольных шахт Украины приведены в табл. 1.6. Общая протяженность поддерживаемых выработок увеличилась за 1982 – 1994 гг. и возросла с 15,2 до 17,3 тыс. км (на 12,1 %). С 1994 по 2002 г. Этот показатель снизился до 11 тыс. км, что объясняется уменьшением числа шахт и добычных забоев. При этом длина выработок, подлежащих ремонту, выросла с 4581 до 5892 км, а процент ремонтируемых выработок вырос с 30,1 до 53,4. На трудоемких ремонтных работах занято свыше 11% подземных рабочих, среди которых 70 % горняков, занятых на проведении и поддержании выработок в рабочем состоянии.

За пять лет с 1998 по 2003 гг. объемы проведения вскрывающих и подготовительных выработок стабилизировались на уровне 530...540 км, при этом объемы поддерживаемых подготовительных выработок с 1996 г. снижаются (с 13 508 км в 1996-м, до 11 024 в 2002 г.), что объясняется, в первую очередь, реструктуризацией угледобывающей промышленности. Однако количество ремонтируемых выработок из этого количества увеличивается (5704 км в 1996 г. против 6021 в 1999-м), что вызвано

усложнением горно-геологических условий их поддержания, связанного с уходом большинства шахт на глубину.

Таким образом, технические и природные условия добычи угля чрезвычайно сложные. В то же время отсутствие в течение ряда лет инвестиций в отрасль и недооценка роли угля как *основного* источника получения энергии обусловили существенное отставание от мирового уровня технологий его использования и сформировали пренебрежительное отношение к его качеству [3...5]. Сложившаяся ситуация искусственно поставила уголь в еще более невыгодное положение по сравнению с импортируемыми энергоносителями. Процесс интенсификации очистных работ на угольных шахтах потребовал увеличения вместимости вагонеток и количества подаваемого в шахту воздуха, а значит и увеличения площади сечения горных выработок в среднем от 8,3 до 11 м². В дальнейшем эта величина возрастет примерно до 16,5 м². Увеличение этого параметра несомненно сопряжено с ростом расхода металла на крепление 1 м выработки. Например, если площадь сечения выработок с арочной металлической крепью увеличится в свету от 7,1 до 12,7 м², то металла потребуется примерно в 2 раза больше [6].

Увеличивая глубину разработки полезных ископаемых и, соответственно, работая в более сложных горно-геологических условиях, многие страны пошли по экстенсивному пути повышения несущей способности крепи за счет использования тяжелых профилей, применение которых до 80-х годов прошлого века увеличилось в 3 раза. Именно это обстоятельство вызвало резкое увеличение расхода металлопроката (до 30 %) при почти не изменившемся объеме проведения горных выработок, что обусловило повышение производственных расходов [7].

Угольная промышленность Украины в 1991 г. использовала для крепления и ремонта выработок около 550 тыс. т нового проката черных металлов [9,10]. Кроме того, в выработках находилось примерно 7 млн т крепи. При этом из 16 тыс. км выработок 12 тыс. закреплено металлом.

С 1994 г. при значительном сокращении объемов проведения горных выработок расход нового стального проката снизился до 150 тыс. т. В условиях длительного срока эксплуатации горных сооружений на отечественных шахтах, наряду со снижением протяженности вновь проводимых выработок, наблюдается увеличение объемов ремонтных работ.

Из-за высокой стоимости проката возросло число случаев повторного использования восстановленной крепи. К тому же зарубежный опыт свидетельствует, что показатель извлечения и повторного использования металлических крепей на шахтах во многих странах характеризуется меньшими значениями.

Например, на шахтах компании «БАГ Ниддеррейн» [11] использование восстановленной крепи находится в пределах 6,2...34,1 % (в среднем 14,5 %), в то время как на отечественных шахтах, в частности на предприятиях объединения Укрзападуголь, этот показатель значительно выше и составляет 65 %. Специалисты ДонУГИ разработали нормативы повторного

использования крепи, согласно которым это возможно в 65...85 % случаев в зависимости от различных горно-геологических условий.

В результате неудовлетворительного состояния крепи, на шахтах Украины ежегодно ремонтируется около 10 % всех поддерживаемых и более 65 % вновь проходимых выработок. При этом данные цифры отражают не только объем ремонтируемых участковых выработок, но и ремонт капитальных, состояние которых в значительной степени предопределяет нормальную работу как отдельных блоков и горизонтов, так и всего технологического комплекса шахты.

Это, в свою очередь, можно объяснить старением шахтного фонда и значительными затратами на проведение новых и на поддержание эксплуатируемых выработок.

Таким образом, проблема поддержания горных выработок в устойчивом состоянии во время всего периода их эксплуатации не только остается актуальной, но и приобретает все более острый характер.

1.2. Основные способы повышения несущей способности металлической крепи в горных выработках

Эксплуатация горных выработок неразрывно связана с понятием устойчивости. Под термином «устойчивость» понимают такое состояние горных выработок, при котором они способны сохранять форму и размеры в пределах, обеспечивающих нормальные условия эксплуатации в соответствии с правилами безопасности [12].

Для предотвращения обрушения окружающих пород и сохранения необходимых размеров поперечного сечения горные выработки оборудуют крепью, представляющей собой прочное сооружение в виде арок, трапециевидных рам, колец или сплошных стен со сводчатым перекрытием и т. п. Анализ используемых для этих целей поддерживающих конструкций свидетельствует о том, что основным видом крепи является металлическая арочная, применение которой с каждым годом возрастает.

Металл является одним из наиболее совершенных крепежных материалов, так как обладает многими положительными качествами: высокой прочностью, возможностью многократного использования, долговечностью, огнестойкостью, значительной деформируемостью без потери несущей способности, хорошими конструктивными возможностями, он хорошо поддается механической обработке. Поэтому крепи, изготовленные из металла, имеют высокие эксплуатационные качества.

Диапазон применения стальных конструкций крепи чрезвычайно широк относительно горно-геологических и горнотехнических условий разработки. Ими можно оборудовать выработки практически на любых глубинах, а также в породах с прочностью на сжатие от 10 до 150 МПа. И то обстоятельство, что в настоящее время затрачиваются значительные средства на ремонт и поддержание структур, вовсе не свидетельствует о плохой работоспособности и

эффективности крепи, а скорее объясняет те просчеты, которые были допущены при её изготовлении, проектировании и эксплуатации.

Известно много различных способов повышения устойчивости выработок, при этом наряду со старыми, хорошо известными применяют современные достижения и технологии в этой области (рис. 1.1).

Наиболее распространенным является замена старых конструкций на профили большего поперечного сечения. Однако данный способ повышения несущей способности металлической крепи в большинстве случаев является чрезвычайно дорогим и не всегда может быть оправдан с точки зрения экономии средств. Стендовые испытания [14], проведенные в Институте горного дела (Польша), показали, что замена стального профиля *V* 25 на профиль *V* 29 приводит к повышению несущей способности рам арочной крепи лишь на 27...37 %, в то время как их масса увеличивается на 52 %.



Рис. 1.1. Способы и средства повышения устойчивости выработок

Эксперименты по использованию более высокопрочных марок сталей для штрековой крепи в 1943 г. провел инженер Рёхлинг, который установил изготовленную из улучшенной томасовской стали арочную крепь на шахте «Карл-Александр» под Аахеном (Германия) [15]. Переход на использование стального проката более высокой прочности при усложнении геологической ситуации и увеличении глубины горных работ, наряду с повышением несущей способности крепи и безопасности ведения операций, позволил снизить массу элементов крепи. Повышение несущей способности крепи также достигается за счет рационального конструирования [16, 17].

Силами специалистов ДонУГИ, а также Украинского НИИ металлов был разработан параметрический ряд новых профилей проката типа КГВ (крепь горных выработок), по прочности они не отличаются от применяемых профилей типа СВП, но превосходят их по некоторым основным параметрам. Рациональное распределение металла по сечению профиля КГВ позволило снизить его массу в среднем на 4 % по сравнению с СВП при этом показатели несущей способности этих конструкций не изменились [9, 10].

Мартыненко С.В. в своей работе [19] утверждает, что за счет рационального конструирования, когда увеличивают толщину днища профиля СВП в 2,23...2,69 раза, а также ширину фланцев, соблюдая при этом конструкционные условия, то момент сопротивления увеличивается соответственно на 4,7...40 % в зависимости от параметров типоразмеров СВП, а коэффициент использования несущей способности металла (W/m , см³/кг·м) возрастает с 3,14...4,09 до 3,5...4,75.

Эффективным с точки зрения повышения устойчивости выработок является замена двухшарнирных арок (КМП-А3, КМП-А5 и др.) на конструкцию трехшарнирной арки стрельчатого типа, хорошо воспринимающей сосредоточенные нагрузки, которые возникают по оси наибольших смещений (крепь «Моля», «Беккорит», «Усшпурвис») [20]. Увеличение количества звеньев крепи, так называемых шарниров, повышает жесткость конструкции, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки по ее сечению. На шахте «Южнодонбасская» разработаны и доведены до стадии промышленного применения металлоарочные крепи нового технического уровня – пятизвенная (КМП-А5Э) и четырехзвенная (КМП-А4Э) [21].

Таким образом, повышение несущей способности крепи путем использования ресурсосберегающей технологии позволило разработать новую конструкцию. Создавая выпуклую треугольную крепь (КВТ), конструкторы В.Я. Кириченко и А.В. Шмиголь реализовали идею (патент Украины № 18560, Бюл. № 6, 25.12.97) увеличения несущей способности ее элементов до таких значений, при которых достигается оптимальное соотношение крепости этой конструкции и выполнения ею функционального назначения [26].

КВТ (рис. 1.2) включает раму, которая состоит из трех несущих балок, которые расположены под углом ($\alpha = 120^\circ$) одна к другой.

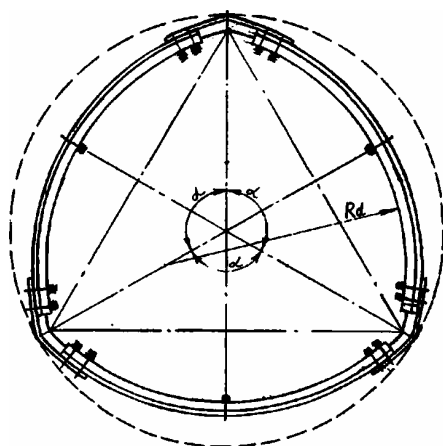


Рис. 1.2. Схема замкнутой крепи КВТ

КВТ представляет собой альтернативную кольцевым крепям конструкцию, которая незаменима в условиях высокого горного давления. Форма и параметры крепи обеспечивают ее надежную работу при взаимодействии с приконтурным массивом. Крепь имеет высокую несущую способность за счет целостности элементов ее дуг. Стеновыми испытаниями установлены такие рабочие характеристики КВТ: конструктивная податливость 300...400 мм, рабочий отпор 320...270 кН; граничная несущая способность крепи достигает 476 кН, что почти в 1,7 раза превышает наилучшие показатели отечественных и зарубежных крепей аналогичного типа.

Двухэлементная крепь КВТ-2 (рис. 1.3) благодаря остроконечной форме обеспечивает высокий эффект формирования консолидированной оболочки возле выработок.

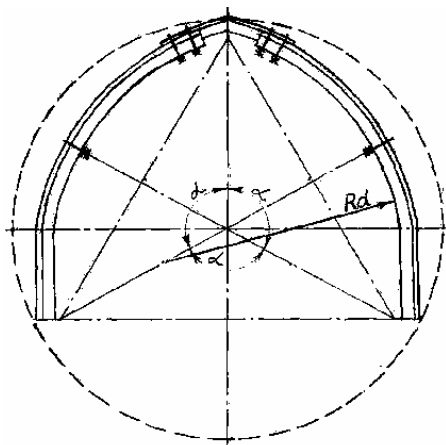


Рис. 1.3. Схема крепи КВТ-2

Наличие одного ограниченно-податливого шарнира значительно повышает уровень стойкости КВТ-2 к боковым нагрузкам. Отсутствие верхняка препятствует возникновению деформаций в своде. КВТ-2 отличается несложностью изготовления и монтажа. Наиболее перспективно ее

использование в условиях с преобладающими вертикальными смещениями пород со стороны подошвы до 800...1000 мм.

Для горных выработок, которые проводятся в породных массивах, разрушающихся в виде блочно-слоистых структур, разработана крепь циркульно-линейная (КЦЛ) (рис. 1.4).

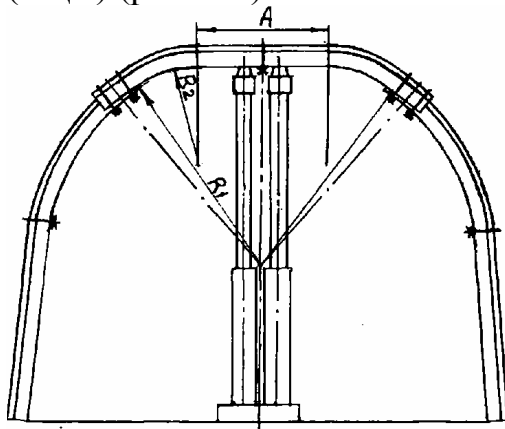


Рис. 1.4. Схема арочной податливой крепи КЦЛ

Это шатровая, податливая, с удлиненными стойками конструкция, имеющая верхняк линейно-циркульной формы. Такая форма улучшает параметры статической несущей способности конструкции и повышает ее восприимчивость к динамическим нагрузкам со стороны кровли. Следует отметить, что использование подобной конструкции значительно улучшает условия контактного нагружения крепи с боков выработки. Имея податливость 300 мм, КЦЛ обеспечивает несущую способность 340...350 кН.

Рассмотренные конструкции представляют собой крепи нового технического уровня, которые обеспечивают, наряду со сбережением ресурсов, устойчивость всей выработки, а также позволяют гармонизировать управление горным давлением в приконтурной ее части. Протяженность выработок, закрепленных подобными конструкциями, составляет почти 900 км на шахтах Западного Донбасса, а также на шахтах «Покровская», «Краснолиманская», им. Засядько.

Существенное влияние на устойчивость выработок оказывают факторы, связанные с технологией их проведения и крепления, среди которых можно назвать способ выемки горной массы, качество оконтуривания и забутовки закрепного пространства, последовательность работ при их сооружении и др.

Неровности поверхности породного обнажения обуславливают концентрацию напряжений у контура выработки, отличную от уровня напряжений, если такая поверхность ровная. Очевидно, это будет иметь значение для выработок, которые эксплуатируются без крепи или закреплены ограждающими конструкциями (сеткой, торкрет-бетоном и т. д.). Основная опасность плохого оконтуривания выработок заключается в передаче сосредоточенных нагрузок на подпорные крепи в местах выступов.

Следующим технологическим фактором, который влияет на устойчивость выработки, является качество ведения горнопроходческих работ. Пустоты закрепного пространства, появление которых возможно из-за некачественного ведения работ, способны нарушить заданный режим функционирования крепи. В результате фактическая несущая способность конструкции может оказаться намного ниже расчетной. По этой причине большинство металлических арокчатых податливых крепей имеет несущую способность ниже паспортной.

Важную роль в формировании нагрузок на крепь играет забутовка закрепного пространства. Она выравнивает эпюру давлений, снижает их величину и повышает податливость системы "крепь – массив". При некачественно выполненной забутовке возникают вывалы пород, формирующие динамические нагрузки на крепь, а ее шарнирные конструкции могут потерять устойчивость.

К технологическим мероприятиям, повышающим устойчивость выработок, относится также соблюдение последовательности горнопроходческих работ при сооружении системы взаимовлияющих выработок. Например, крепь уже проведенной выработки будет воспринимать дополнительные неравномерные смещения пород как следствие вновь проводимой соседней выработки, и если это влияние не учитывалось в процессе проектирования, то первая будет разрушена.

В последние годы все чаще стали применять инъекционное упрочнение пород для повышения устойчивости выработок, вокруг которых существует (это касается участков геологических нарушений) или развивается с течением времени зона трещиноватости. При этом для инъекций, как правило, используют цементные и цементно-песчаные растворы, в частности, специалистами проектных организаций были разработаны и внедрены уже достаточно известные способы повышения устойчивости горных выработок на основе так называемого "тампонажа". Это, например, упрочнение горных пород (КузНИИшахтострой), упрочнение и тампотаж закрепного пространства (МакИСИ, ВНИИОМШС) [6,17] и др.

Этот способ достаточно технологичен и может применяться как самостоятельно, так и в сочетании с другими способами в процессе проведения выработок или их эксплуатации. В своих научно-исследовательских работах А.П. Максимов, А.Н. Шашенко и А.Н. Роевко разработали принципиально новый способ повышения устойчивости выработок – комбинированную крепь АНТ (она сочетает в себе элементы системы "арка – набрызг – тампотаж"). В свое время по предложению ДГИ данная конструкция была внедрена в производство для крепления магистральных выработок [25].

Снижение трудоемкости возведения крепи путем повышения уровня механизации работ в значительной мере способствует усилению несущей способности крепи. Наиболее высокий уровень механизации работ стал возможным при использовании анкерной крепи, которая получила значительное распространение на шахтах ФРГ, США, Великобритании.

Повышение устойчивости горных выработок, оснащенных традиционными металлическими крепями, возможно при обеспечении надежной работы конструкций в течение всего срока службы. Следует подчеркнуть, что на угольных шахтах значительная часть крепей подвержена коррозии, вследствие чего существенно снижается их несущая способность. Именно разработка антикоррозионной защиты является одним из наиболее эффективных способов повышения несущей способности металлической крепи в течение ее срока службы. Учитывая то, что условия эксплуатации горных выработок, поддерживаемых металлической крепью, формируются под влиянием агрессивности шахтных вод, для обеспечения требуемой устойчивости данных сооружений необходимо подробное изучение этого влияния на металл крепи.

1.3. Состояние изучения проблемы устойчивости выработок, испытывающих влияние агрессивных шахтных вод

1.3.1. Теоретические и экспериментальные исследования коррозии металлической крепи

В горной промышленности зачастую используют стальные рамные крепи как основной тип конструкций для поддержания выработок. В Украине их доля составляет около 90 % [14] и в ближайшей перспективе эта цифра заметно не изменится, поскольку из-за увеличения глубины разработки и усложнения горно-геологических условий смещения пород резко возросли, и только податливые конструкции стальных крепей могут обеспечить в большинстве случаев удовлетворительное эксплуатационное состояние горных выработок. Почти уникальная способность этих сооружений адаптироваться к изменению формы выработки, не разрушаясь, позволяет рассматривать их как наиболее безопасные.

Существенно снижает эффективность использования металла для крепления выработок его коррозионная способность. При этом, снижается несущая способность как самого профиля крепи, так и конструкции в целом. Стендовые испытания арочной крепи изготовленной из спецпрофиля, проведенные в ДонУГИ, показали, что по мере увеличения нагрузки при всех равных условиях сопротивление скольжению в арках с непоржавевшим металлом на 30 % выше, чем с поржавевшим [28]. Таким образом, падение нагрузки в последних происходит гораздо раньше, в связи с чем податливая крепь сначала реализует свою податливость, а далее работает в жестком режиме.

Коррозия (разрушение металлов) является результатом взаимодействия окружающей среды с металлами. Виды коррозии определяют с учетом условий эксплуатации металлических крепей (рис. 1.5).

В зависимости от условий контактирования металла с коррозионно-активными растворами различают коррозию вследствие полного погружения; неполного погружения; периодического смачивания, а также струйную.

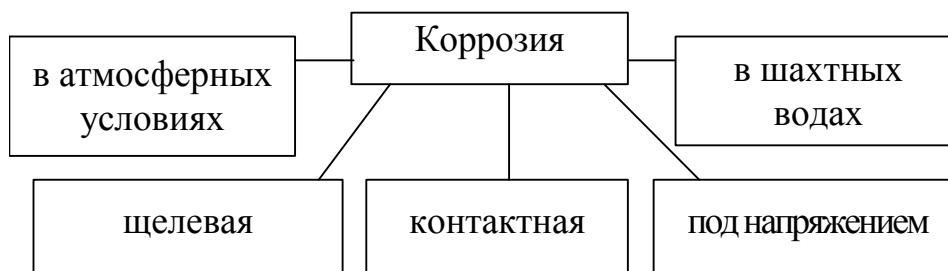


Рис. 1.5. Классификация коррозии по условиям эксплуатации

С точки зрения механизма коррозионного процесса коррозия бывает химическая, электрохимическая и биохимическая. В производственных условиях угольных шахт чаще всего имеет место электрохимическая коррозия.

Биохимическая коррозия в чистом виде встречается очень редко, поскольку в присутствии влаги одновременно наблюдается и электрохимическая коррозия. Поэтому, даже при ее наличии разрушение крепи считают следствием электрохимической коррозии [35].

Скорость разрушения поверхностного слоя металла в агрессивных шахтных средах достигает 0,2...0,4 мм в год [29]. Коррозия ежегодно разрушает 5...7 %, а в отдельных условиях (шахта «Покровская») до 25 % массы крепи [30].

В современной промышленности коррозия металлов является одной из самых актуальных проблем, убытки от которой в промышленно-развитых странах достигают 5...10 % национального дохода. Так, в США они превышают 70 млрд долл. в год [31]. Подобное положение дел имеет место также в Великобритании, ФРГ, Японии и других странах [32]. Например, в СССР на протяжении 1975 года по предприятиям угольной промышленности ежегодные коррозионные потери составляли около 1 млн т металла, и 100...150 млн руб. [33].

В Украине каждый год сооружают свыше 700 км горных выработок [34]. Учитывая то, что стоимость комплекта арочной крепи составляет около 600 грн, расходы на ежегодно потребляемый при изготовлении крепей металл, составляют около 1 млрд грн. Принято считать, что в результате коррозии около 10 % металла безвозвратно теряется, т. е. для Украины в денежном выражении это означает ежегодную потерю 100 млн грн.

Понятно, что разрушение металла в конечном итоге вызывает разрушение и выход из строя крепи горных выработок, а это крайне серьезный фактор, который усложняет работу шахт, нарушает безопасность производства и вызывает частую замену дорогостоящего горношахтного оборудования, а значит приводит к перерасходу средств. Огромными оказываются и косвенные

убытки от коррозии, к которым можно отнести затраты на борьбу с этим явлением, работы по восстановлению выработок.

Наблюдения за процессом эксплуатации металлической крепи в условиях угольных шахт свидетельствуют о том, что значительная часть ее подвержена коррозии, а приостановленные процессы могут возобновляться при изменении условий эксплуатации.

Во время шахтных наблюдений было замечено, что коррозия была наибольшей на участках металлической крепи, периодически смачиваемых водой. Крепь, которая находилась в зонах, где постоянно присутствовала вода, имела значительные наросты продуктов коррозии, хотя сам процесс на данных участках не был достаточно активным. А вообще, в шахтах коррозией поражено до 65...80 % металлических крепей.

1.3.2. Основные способы защиты металлической крепи от коррозии

Все современные методы борьбы с коррозией в конечном итоге сводятся к прекращению действия коррозионных микрогальванических пар, образующихся на поверхности металла. Эти методы подразделяются на 6 групп (рис. 1.6) [37,41].

При снижении содержания углерода в стали происходят структурные изменения кристаллической решётки, за счет чего материал приобретает более высокую стойкость против действия коррозии, также изменяются и физические свойства материала: сталь становится более хрупкой и менее пластичной [30]. Учитывая то, что в шахтных условиях металлическая крепь испытывает запредельные нагрузки и иногда работает в стадии пластических деформаций, снижение пластичных свойств стального сплава является недопустимым.

Способ замены металла неметаллическими материалами на фоне его дефицита, который испытывает угольная промышленность, а также с учетом стоимости этого материала, выглядит достаточно привлекательным. Однако до настоящего момента не найден материал, который по своим свойствам приближался бы к стали и мог быть эквивалентным ей.

Среди методов, основанных на улучшении противокоррозионных свойств самого металла, традиционным является повышение его коррозионной стойкости путем легирования, которое способствует улучшению пассивируемости материала. Общую теорию коррозионно-стойкого легирования предложил Н.Д. Томашов [42]. Несмотря на то, что данный способ защиты является эффективным и надежным для повышения коррозионной стойкости металлов, в шахтных условиях распространения не получил из-за значительных затрат, связанных с производством, а также из-за невозможности обеспечения целостности легирующего покрытия при транспортировке и возведении металлокрепи.

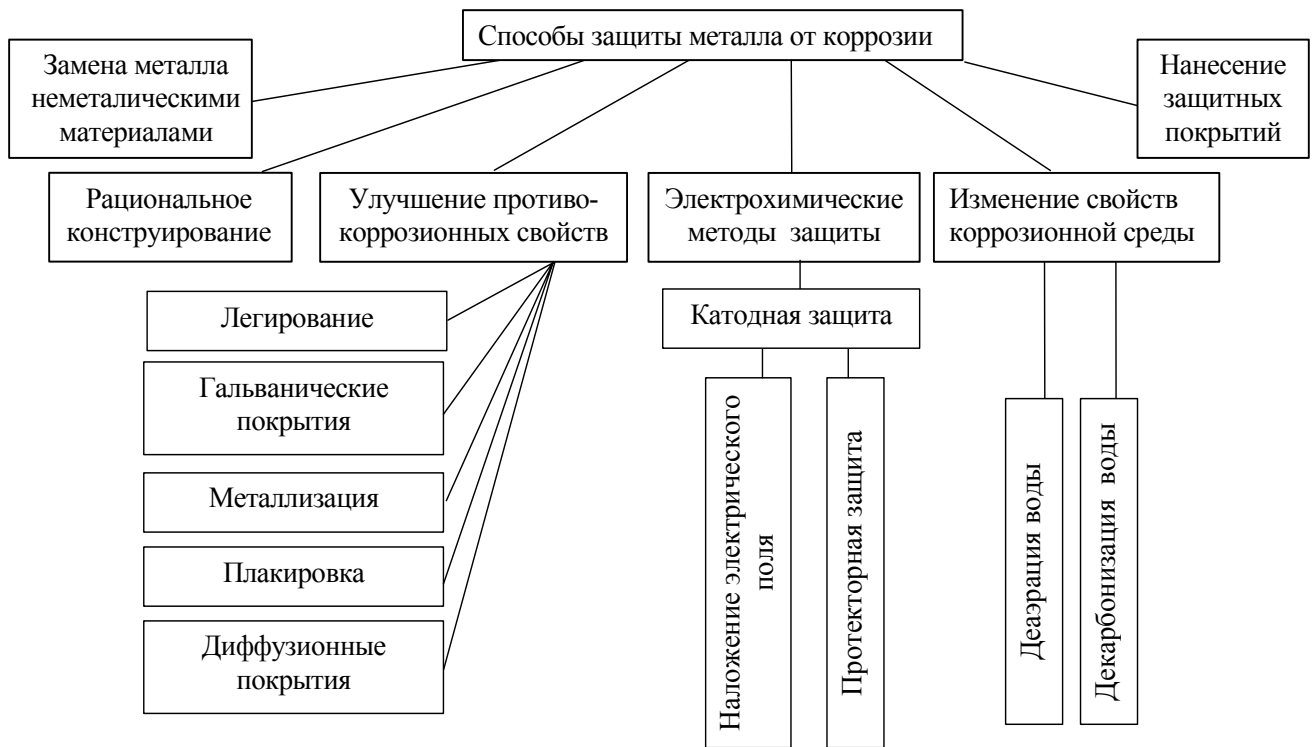


Рис. 1.6. Способы защиты металла

Кроме основного метода повышения коррозионной стойкости сплава его легированием на стадии изготовления конструкции, может быть использована еще и механическая обработка с целью удаления окалины и сглаживания поверхности. Окалина является эффективным катодом. Там, где нарушена её сплошность, возникают сосредоточенные анодные участки, а на них образуются дефекты в виде глубоких язв и каверн. В результате многолетних наблюдений установлено, что более шероховатая поверхность менее устойчива к воздействию внешней среды, поэтому с повышением класса механической обработки скорость коррозии уменьшается.

Однако при этом процесс лишь замедляется, иначе говоря, увеличивается время до появления первых коррозионных поражений. Последующее развитие коррозионного процесса уже ничем не ограничивается. В связи с отмеченными обстоятельствами способы борьбы с коррозией путём снижения шероховатости поверхности находят очень ограниченное применение.

Особый интерес представляет протекторный метод защиты, который состоит в том, что вся коррозия искусственно сосредотачивается на протекторе, который делают взаимозаменяемым. Возможность протекторной защиты в значительной степени зависит от электропроводности среды. Чем выше проводимость электролита, тем более эффективной оказывается защита и тем на более далёкое расстояние (на большую поверхность конструкции) распространяется защитное действие протектора как результат электрохимических процессов.

В табл. 1.9 приведены данные относительно дальности действия протектора в зависимости от концентрации электролита. Использование протекторов целесообразно в условиях действия морской воды и соляных растворов значительной концентрации. В речной воде (концентрация солей составляет 0,01...0,05 %) применение протекторов является неэффективным вследствие малого радиуса действия – в лучшем случае это несколько сантиметров.

Таблица 1.9

Радиус действия цинкового протектора при защите железных поверхностей в растворах NaCl разной концентрации и в морской воде (по данным Томашова) [37]

Электролит	Удельная электропроводность, ($t = 18^{\circ}\text{C}$), $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Радиус действия протектора, см
Дистиллированная вода	0,015	$\approx 0,1$
0,001 % NaCl	0,22	1,4
0,006 % NaCl	1,06	3,2
0,01 % NaCl	2,11	10
0,03 % NaCl	5,19	> 15
3,0 % NaCl	404,0	> 600
Морская вода	—	> 400

Площадь протектора обычно находится в пределах 20...200 см², что зависит от условий его применения. Отношение площади протектора к площади защищаемой железной конструкции должно составлять от 1:200 до 1:1000. Несмотря на несомненные достоинства данной защиты, она имеет ряд недостатков, из-за которых не получила распространение в шахтном строительстве. Прежде всего, крепление протектора должно обеспечивать длительный, надежный контакт. Как только электрический контакт между защищаемой конструкцией и протектором нарушится, действие протектора прекращается. Также в условиях шахт постоянно меняется величина водопритока по горизонтам, при этом изменяется химический состав вод. Поэтому в измененных условиях протекторная защита может оказаться бесполезной, вследствие чего процесс коррозии крепи продолжает развиваться.

Применение электрозащиты [43] аналогично рассмотренному выше применению протекторов, оно имеет такие же недостатки.

Способы защиты металла путем изменения свойств коррозионной среды в условиях угольных шахт, которые, как правило, располагаются вблизи водоемов, являются малоэффективными и экологически не безопасными. Эти способы эффективны в условиях замкнутых систем, где исключена миграция вод.

Наибольшее распространение получил способ защиты металла при помощи изолирующих покрытий. Нанесение защитного покрытия на поверхность металла позволяет в значительной степени снизить скорость коррозии металлической конструкции. Этот метод наиболее универсален и применяется с давних времен для борьбы с коррозией подземных, подводных и наземных сооружений.

1.3.3. Противокоррозионные покрытия подземных сооружений

Изоляция металла при помощи нанесения защитных покрытий является наиболее древним и широко применяемым способом борьбы с коррозией. Основное назначение защитного покрытия состоит, с одной стороны, в создании барьерного слоя, не допускающего агрессивных агентов к поверхности металлической конструкции, а с другой – в затруднении или полном предотвращении образования на границе «металл – покрытие» продуктов коррозии. Отсюда вытекает основное требование к материалу защитного покрытия – он должен отличаться высокой химической стойкостью, малыми коэффициентами проницаемости для воды, газов, ионов хлора и сульфата, высокой адгезией к металлу, механической прочностью, структурной стабильностью во времени.

Виды защитных покрытий чрезвычайно разнообразны (рис. 1.7). В настоящее время известно около 2000 пигментов, 300 синтетических смол, более 150 растворителей и около 300 пластификаторов, употребляемых в этой области [37, 44, 45]. Защитные покрытия могут быть органического или неорганического происхождения. Многие из них имеют высокие антикоррозионные качества, дешевы и просты в применении, но ввиду недостаточной прочности их использование ограничено.

Неметаллические покрытия получили широкое распространение на горнодобывающих предприятиях для защиты подземного оборудования от агрессивной среды.

Для этих целей осуществляют следующие операции: покрытие поверхности металла антикоррозионными красками, лаками, эмалями, а также цементно-песчаным раствором; уменьшение коррозионного воздействия окружающей среды [46, 47].

Широко распространённым покрытием для предотвращения металлов от коррозии является смазка, несмотря на ее крайне недостаточную прочность. По мнению некоторых авторов [40, 44], именно это покрытие является наиболее дешевым и доступным средством сохранения металлов. Например, Н.А. Летов [40] рекомендует использовать смазку во многих случаях и в первую очередь, на горных предприятиях.

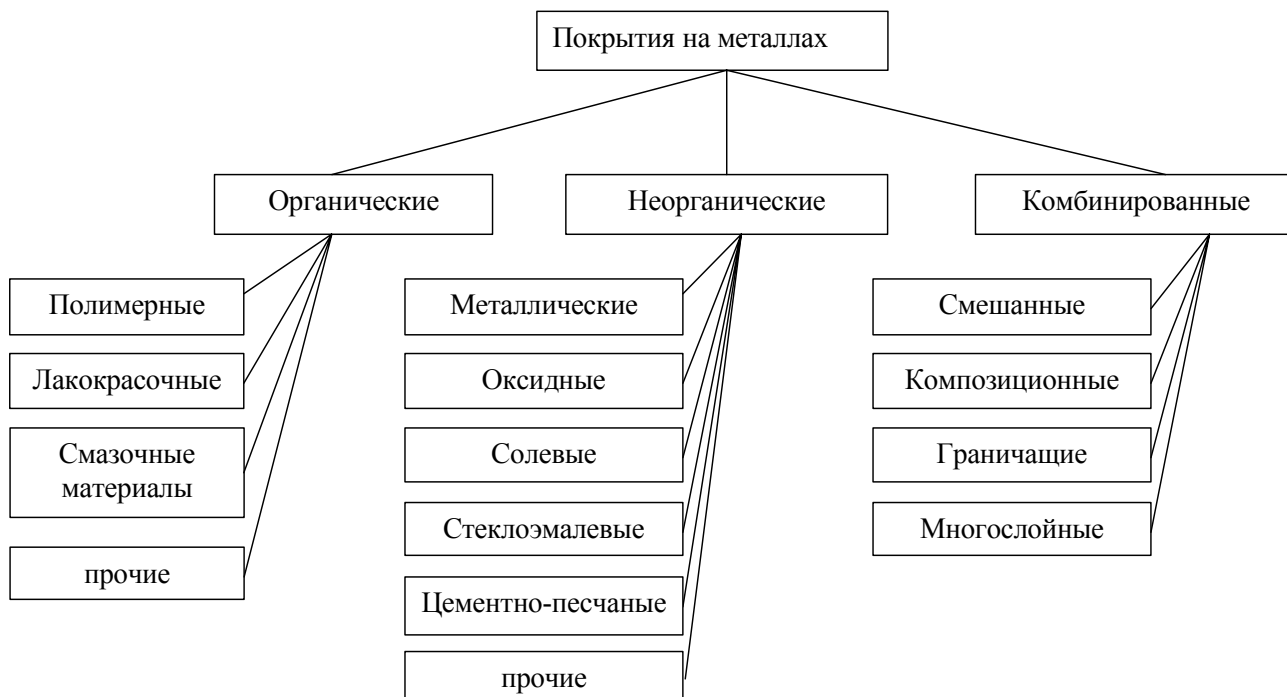


Рис. 1.7. Защитные покрытия на металлах

Слой смазки, нанесенный на поверхность металла, выполняет двойную функцию, во-первых: предохраняет его от воздействия коррозионной среды, а во-вторых, являясь изолятором, противодействует возникновению на поверхности металла гальванических пар. Но применение этой защиты ограничивается адгезионной способностью покрытия по отношению к металлу и сроком службы. Смазка, нанесенная на металл крепи, при длительной эксплуатации смывается шахтными водами, поступающими из приконтурной части вмещающих пород.

В качестве антикоррозионного покрытия металла применяют также масляно-битумный лак, кузбасский лак, битум марки IV и др. материалы [42].

Наибольшее распространение для защиты оборудования от коррозии получил битум марки IV, смешанный с глиной (каолином), или без неё, который наносят на металл слоем 1,5 мм в расплавленном виде. Перед нанесением горячего битума металл "прогрунтовывают" раствором этого же битума в бензине. Покрытие металла цементно-песчаным раствором (торкретирование) производят в шахтных условиях при помощи специального торкрет-аппарата. Смесь цемента и песка (в соотношении 1:2 или 1:3) затворяют водой и при помощи сжатого воздуха набрызгивают торкрет-аппаратом на поверхность металла, образуя замкнутый слой необходимой толщины. За рубежом (Англия) применяют технологию антикоррозионной обработки металла шахтной крепи в три этапа: вначале его поверхность подвергается пескоструйной очистке, затем наносят распылением

быстросохнувшее металлическое покрытие (грунтовку), поверх которого окончательно наносят наружный изолирующий слой [13].

В ФРГ для защиты шахтного оборудования от коррозии всё большее применение находят двухкомпонентные составы, в основе которых эпоксидные смолы, модифицированные продуктами коксохимических производств. А, например, в Великобритании используют полиуретановые, эпоксидно-полиуретановые и каучуковые покрытия. Качественные ингибированные составы используют для защиты конструкций от коррозии в горной промышленности США, Франции, Сербии и Черногории [39]. Для этих целей в условиях атмосферной коррозии незаменимыми оказываются лакокрасочные покрытия. Ассортимент лакокрасочных материалов представлен многими сотнями наименований. Следует отметить, что защита металлоконструкций в условиях фильтрации значительных объемов воды требует нанесения более толстого слоя покрытия, чем по отношению к сооружениям, эксплуатирующимся в атмосфере. Поэтому, например, подземные трубопроводы покрывают битумной мастикой слоем толщиной от 3 до 20 мм.

Перспективным для шахтных условий может оказаться отечественный опыт проектирования и изготовления бипластмасс на основе термопластов (винипласт, полиэтилен, полипропилен), упроченных стеклопластиком [48].

Металлические покрытия, в отличие от органических, непроницаемы для коррозионных агентов (воды, газов), поэтому вопрос об образовании продуктов коррозии под их сплошным защитным слоем, казалось бы, снимается. Однако и в них могут быть дефекты в виде пор, царапин, вмятин и проч. При наличии пор характер коррозионного разрушения основного металла определяется электрохимическими характеристиками обоих металлов (анодные и катодные металлические покрытия). Например, по отношению к материалу стали, цинковое покрытие является анодным, тогда как медное – катодным. Следовательно, при наличии нарушения в слое цинка последний оказывает протекторное действие, тогда как наличие пор в слое меди обуславливает повышение скорости коррозии стали за счет действия гальванического элемента, в котором сталь является анодом.

В настоящее время начинают применять покрытия на органической основе с металлическим порошком в качестве наполнителя. Из металлических порошков чаще всего употребляют цинковый, его добавляют к органической основе в количестве до 85 % по отношению к ее массе. Благодаря более отрицательному потенциалу цинкового порошка в контакте покрытия с металлом, осуществляется протекторная защита, т. е. наблюдается то же действие, как и при металлическом цинковом покрытии. Образующиеся при этом продукты коррозии цинка малорастворимы, поэтому формируют на поверхности органического покрытия своеобразную защитную корочку, уплотняя его и обеспечивая снижение проницаемости.

В целях защиты металлоконструкций и оборудования с продолжительным сроком службы применяют также полимер-протекторные и металлизационно-лакокрасочные покрытия.

В ФРГ и Чехии [49] для антикоррозионной обработки шахтных вагонеток испытывались комбинированные покрытия, выполненные при помощи металлизации цинком и лакирования. Чтобы обеспечить хорошее сцепление лака с металлизационным покрытием, металл подвергался предварительной обдувке.

Защитное действие покрытий зависит от ряда факторов: адгезии покрытия к металлу, проницаемости и набухаемости материала покрытия, его устойчивости к действию микроорганизмов, а также механической прочности покрытия после его отверждения. Последний фактор является весьма существенным, так как высокая механическая прочность покрытия обуславливает уменьшение вероятности образования таких дефектов, как вмятины и царапины, что обеспечивает его целостность в процессе дальнейшей эксплуатации.

Стойкость покрытия к жизнедеятельности микроорганизмов является особенно важным фактором, если речь идет о защите подземных и подводных сооружений, поскольку в такой среде встречаются бактерии, вызывающие местное повышение ее коррозионной агрессивности, что обуславливает неравномерность коррозионного разрушения металла.

Большое значение в определении защитных свойств покрытия имеет адгезия его материала к металлу, так как практически все органические материалы достаточно проницаемы для воды и газов. Этот параметр определяется как природой материала, так и состоянием самой поверхности металла. Эффективность защитного покрытия определяется не только его способностью к созданию надёжного барьерного слоя с хорошими защитными свойствами, но также диктуется требованиями экономической целесообразности. Исходные материалы, используемые в качестве сырья для защитного покрытия, должны быть наиболее дешевыми и доступными, а защитное покрытие – обладать высокими технологическими параметрами и соответствовать условиям эксплуатации.

При всех преимуществах органических покрытий (лаки, эмульсии, смазки, битумы), они имеют существенный недостаток – сильно подвержены горению, что является недопустимым в шахтных условиях, а потому оказывает значительное влияние на выбор материалов для антикоррозионной защиты. Поэтому покрытия на основе горючих материалов никак не могут быть использованы при защите крепей в условиях подземных горных выработок.

Учитывая все вышеизложенное, следует признать, что наиболее рациональным является использование цементных покрытий («торкретирование»). Цемент не только хорошо защищает от коррозии, но и поглощает тонкие слои ржавчины. Покрытия цементом применяются в машиностроении и судостроении, где они препятствуют вредному доступу воды к металлическим конструкциям [50]. Для защиты металлической крепи в данной книге будет рассматриваться использование неорганических покрытий, среди которых наиболее высокими прочностными характеристиками обладают торкрет- и набрызг-бетонные покрытия.

Глава 2

ШАХТНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРОЧНОЙ КРЕПИ

2.1. Общие положения

Начало научным знаниям о коррозии было положено в работах великого русского естествоиспытателя М. В. Ломоносова, которому принадлежит открытие в 1748 г. закона сохранения массы. Эксперименты, послужившие основанием этого закона, были выполнены с металлами, подвергавшимися прокаливанию в запаянном сосуде. Прибавление в весе металлов (коррозионное взаимодействие) обнаружилось только тогда, когда в сосуд впускался воздух. В 1773 г. опыты были повторены французским химиком Лавуазье, который установил, что окисление металла есть соединение его с кислородом.

Большое значение для развития теории коррозии имели работы Холла (1819) и Деви (1824), которые показали, что в отсутствие воздуха железо и медь не корродируют.

Исключительное значение для обоснования электрохимического механизма коррозии имели работы выдающихся учёных Дэви и Фарадея, установивших законы электролиза.

Новый этап в развитии и оформлении самостоятельного раздела науки о коррозии металлов связан с именами В.А. Кистяковского, Н.А. Изгарышева, Ю.Р. Эванса, Г.В. Акимова, А.Н. Фрумкина, Г.Г. Улига, Н.Д. Томашова и многих других исследователей [42].

В процессе эксплуатации крепь горной выработки соприкасается непосредственно с породами, химически активными водами и рудничной атмосферой. В результате, ее конструкции подвергаются различным видам коррозии, среди которых различают атмосферную, подводную, подземную, водородную, кислородную, газовую.

Атмосферная коррозия протекает особенно интенсивно, если температура воздуха повышена до 50 °С, воздушный поток характеризуется значительной скоростью воздушной струи и относительной влажностью, достигающей 100 %. Подводная коррозия – это разрушение металла, погруженного в воду. Под водой находятся элементы крепи, прилегающие к водоотливным канавкам и подтопленным выработкам, крепи водосборников, трубопроводов и т. д. Наличие в воде солей и кислот ускоряет процесс. Подземная коррозия возникает при воздействии на металл пород почвы и забутовки. Водородная и газовая виды коррозии не характерны для металлоконструкций в горных выработках [30].

В шахтных условиях коррозия металла также классифицируется по характеру разрушения. Наиболее опасной является неравномерная коррозия (рис. 2.1).

Четкое представление о процессе коррозии невозможно без учета особенностей материала конструкции, испытывающей коррозионное разрушение в процессе эксплуатации. Известно, что на протяжении многих лет для крепления

горных выработок, благодаря своим конструкционным свойствам, используется сталь.

Сталь – это сложный сплав железа с углеродом (его содержание находится в пределах 0,01...2 %) и другими элементами.

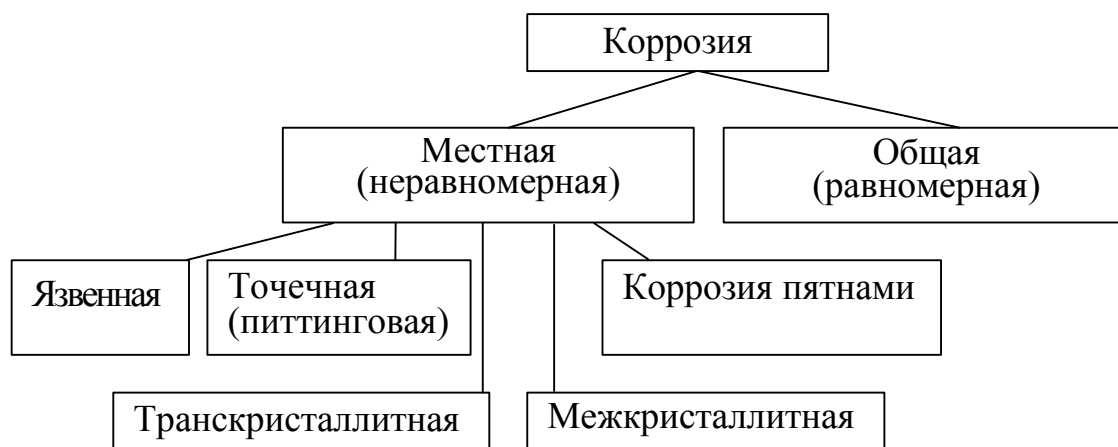


Рис. 2.1. Классификация коррозии по характеру разрушения

Нелегированная сталь, кроме железа, углерода, кремния, марганца, серы и фосфора, может содержать азот и водород, а также различные примеси (медь и мышьяк – из отдельных руд, хром и никель – из возврата, поступающего в шихтовые материалы, алюминий – из комплексных раскислителей и т. п.). Сталь воспринимает закалку, в результате которой ее физико-механические свойства резко изменяются, она поддается ковке, прокатке. Обычно в технических сортах стали содержится до 1,1 % марганца, до 0,4 % кремния, до 0,08 % фосфора и столько же серы, около 0,02 % кислорода. Нежелательные для этого материала примеси фосфора и серы регламентируются стандартами.

По способу получения различают мартеновскую сталь и конвертерную. В производстве профилей проката для крепления горных выработок в Украине используют мартеновскую сталь марок Ст 5 или Ст 5пс Алчевского МК и комбината «Азовсталь» (группа А по ГОСТ 380-88). Термическая обработка профилей, предназначенных для нужд крепления выработок, не предусмотрена [30]. Поверхность металла в этих изделиях химически неоднородна, что обусловлено наличием окалины, ржавчины, формовочной земли, остатков сварных флюсов, масляных и других загрязнений; различиями в степени термического и механического воздействия на отдельные участки, а также возможной разницей в химическом составе, особенно в месте сварного шва. Все это приводит к ускорению развития коррозионного процесса.

Особенно опасным следует признать присутствие окисных пленок (окалина), которые активны с электрохимической точки зрения. Окалина возникает в процессе нагревания стальных заготовок перед прокаткой, она состоит из безводных окислов FeO, Fe₃O₄ и Fe₂O₃ [36]. Окалина, образующаяся при прокате стальных крепей ($t \leq 500$ °C), почти не содержит FeO, а поэтому в химическом отношении она оказывается более стойкой и обладает защитными свойствами.

Однако защитное действие окалина может проявиться только при условии ее полной непрерывности, что практически невыполнимо, поскольку в процессе превращения железа в Fe_2O_3 происходит увеличение его объема в 2,16 раза, вследствие чего возникают внутренние напряжения в слое окалины, которые в свою очередь обуславливают появление в нем трещин, пузырей и разрывов. Разрывы образуются также при механическом и термическом воздействии на материал. В силу описанных процессов стальное сооружение, находящееся в контакте с электролитом, подвергается усиленной местной коррозии, так как поверхность, покрытая окалиной, оказывается катодом, а металл на дне трещины анодом.

Ржавчина, в отличие от окалины, возникает в присутствии влаги, если $t < 100\text{ }^\circ\text{C}$, а поэтому состоит в основном из гидратированных окислов железа. В общем виде химический состав ржавчины выражается формулой [37,38]:



В слое ржавчины обычно обнаруживаются растворимые соли железа и других катионов. Из-за рыхлой структуры на поверхности ржавчины дольше задерживается влага, появившаяся в результате дренирования шахтных вод, а поэтому скорость коррозии повышается.

В результате агрессивного влияния шахтных условий попавшая на отдельные части металлической крепи вода накапливается, образуя застойные зоны (участки), что приводит к их быстрому корродированию. Практически установлено, что тонкие пленки жидкости оказывают более активное агрессивное воздействие, поэтому если между металлическими частями наблюдаются узкие волосяные зазоры, то процессы коррозии протекают более интенсивно.

На скорость коррозии в шахтных условиях также влияет временная (карбонатная) жесткость природных вод. В мягких водах железо корродирует быстрее. Жесткие воды имеют склонность осаждать нерастворимые соли, например $CaCO_3$ (особенно на катодных участках), что препятствует диффузии кислорода к металлу [36]. Находящиеся в грунтах или грунтовых водах легко растворимые соли (хлориды, сульфаты) повышают коррозионную агрессивность горных пород, ускоряя развитие коррозионных процессов. Это происходит вследствие активирования металла присутствующими в нем ионами, в особенности ионами хлора, которые, адсорбируясь на поверхности стали и вытесняя оттуда кислород, способствуют разрушению окисных пленок и затрудняют пассивирование этой поверхности. Скорость коррозии металлов в атмосферных условиях зависит главным образом от влажности воздуха. В сухом воздухе коррозия или вообще не происходит, или незначительна [39]. Атмосферная коррозия наблюдается обычно при относительной влажности воздуха выше 60 %. В большинстве шахт влажность воздуха колеблется в пределах 75...85 %, т. е. она выше критической. Так как металлокрепь, вследствие контакта с породой, имеет температуру более низкую, чем температура воздуха в выработке, то на ее поверхности конденсируются водяные пары, которые служат источником усиленной атмосферной коррозии. О начальной стадии атмосферной коррозии чаще всего свиде-

тельствует потускнение металла. Дальнейшее протекание процесса коррозии зависит от состава воздуха, его влажности, наличия агрессивных газов, загрязнений и т. п.

Кривые, отражающие процесс коррозии в чистом воздухе и в воздухе, содержащем 0,01 % SO_2 , изображены на рис. 2.2 [40].

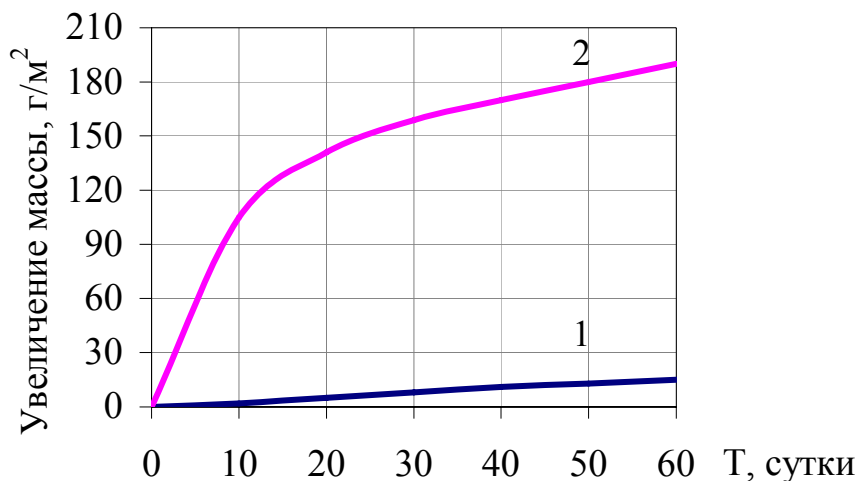


Рис. 2.2. Графики процесса коррозии стали в воздухе с влажностью 99 %: 1 – чистый воздух; 2 – воздух, содержащий 0,01 % SO_2

Важную роль в этом процессе играют взвешенные в воздухе частицы, которые по их коррозионной активности можно разделить на три группы:

1. Коррозионно-активные частицы. Это в большинстве случаев частицы солей, например, хлористого натрия, сернокислого натрия, сернокислого аммония.

2. Коррозионно-неактивные частицы, адсорбирующие из воздуха коррозионно-активные газы. Это частицы угля, присутствие которых на металле сильно ускоряет его коррозию.

3. Коррозионно-неактивные частицы, не адсорбирующие вредных газов.

Шахтный воздух, как правило, содержит в себе частицы угольной пыли, пород и выделения метана (при газовом режиме шахты). Наиболее агрессивным в отношении стали является сернистый ангидрид, незначительные примеси которого в воздухе резко повышают скорость атмосферной коррозии (рис. 2.3) [40]. Взвешенные частицы твердых и жидких веществ, осаждаясь на поверхности конструкций, создают центры конденсации влаги и способствуют развитию коррозии металла. В условиях некоторых горных выработок наблюдается явление, когда содержащиеся в воздухе частицы угольной пыли и горных пород, при отсутствии водопритока со стороны массива создают защитную пленку, под которой процессы коррозии временно затормаживаются.

Процесс атмосферной коррозии железа характеризуется чередованием интервалов, при которых реакция протекает со значительной скоростью или почти останавливается. Эти изменения в значительной мере зависят от величины притока воды к металлу.

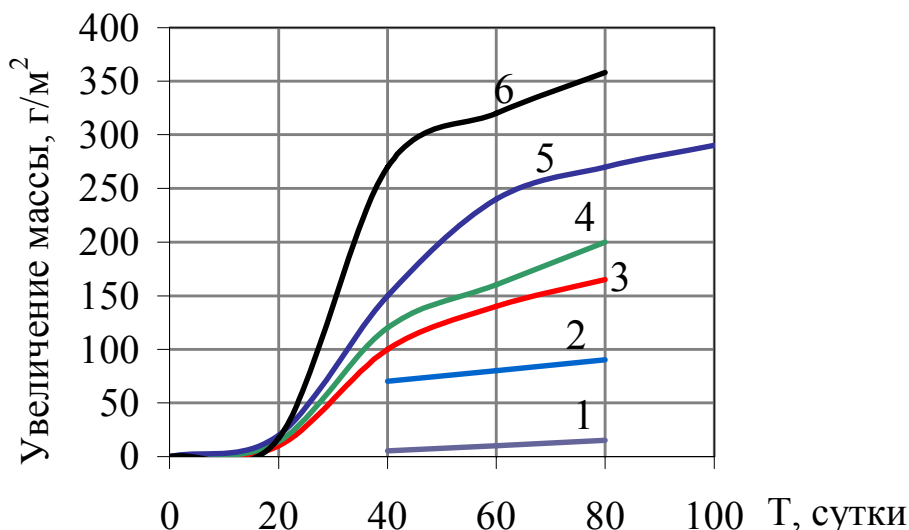


Рис. 2.3. Кривые влияния содержания примесей в воздухе на скорость коррозии металла: 1 – воздух с частицами угля; 2 – воздух, содержащий $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 3 – воздух + SO_2 ; 4 – воздух + SO_2 + взвешенные частицы песка; 5 – воздух + SO_2 + частицы $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 6 – воздух + SO_2 + частицы угля

Во время эксплуатации металлоизделий на их поверхности образуется тонкая плёнка воды. В связи с этим коррозия приобретает электрохимический характер. Имеет место процесс окисления металла, в результате которого он, находясь в неустойчивом состоянии, переходит в термодинамически более устойчивое, вследствие чего превращается в продукты коррозии (окись, закись железа). Структурные изменения в слое ржавчины происходят как в условиях «сухих», так и «влажных» периодов. Они состоят в том, что из аморфных продуктов или ненасыщенных растворов образуются кристаллические соединения (различные модификации гидроксидов железа, соли железа), происходит процесс образования или окисления Fe_3O_4 , наблюдаются перекристаллизация и рост частиц продуктов коррозии [51]. В зависимости от условий эксплуатации наблюдается появление ржавчины различной степени компактности – от плотных беспористых до рыхлых осыпающихся слоев. В разрезе слой ржавчины обладает физической и химической анизотропией, и с точки зрения механического состояния у него можно выделить несколько подслоев (рис. 2.4).

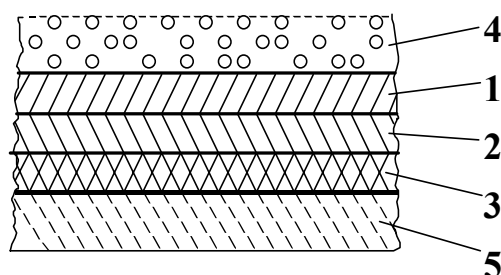


Рис. 2.4. Схема строения слоя ржавчины:
1 – наружный подслой; 2 – средний подслой; 3 – внутренний подслой;
4 – опавший подслой; 5 – металл

Согласно общепринятой схеме [51] наружный, или первый, подслоя представляет собой рыхлую часть ржавчины, которая легко удаляется при обработке поверхности проволочными щетками. Количественно этот подслоя составляет 10...30 % от общей массы ржавчины.

Средний, или второй, подслоя, механически довольно прочный, нередко составляет основную часть ржавчины.

Внутренний, или третий, подслоя – наиболее прочный, его можно удалить при помощи химического травления.

При длительных экспозициях часть продуктов коррозии теряется. Это касается четвертого (опавшего) подслоя ржавчины, величину которого определяют расчетным путем по данным массы образца, продуктов коррозии и содержания в них железа.

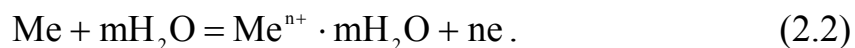
Коррозионный процесс является сложным и многостадийным, состоящим, по крайней мере, из трёх основных стадий:

1. Переноса реагирующих веществ к поверхности раздела фаз – реакционной зоне;
2. Гетерогенной реакции;
3. Отвода продуктов реакции из реакционной зоны.

Остановимся более подробно на особенностях коррозионного процесса.

При электрохимической коррозии имеет место два электродных процесса (анодный и катодный).

1. Анодный процесс можно представить в виде такой формулы:



2. Катодный процесс:



где D – окислитель, называемый деполяризатором.

Оба процесса обычно локализуются на различных участках корродирующей поверхности металла, где их протекание облегчено (рис. 2.5). Таким образом, вследствие протекания этих процессов происходит перемещение электронов по металлу от анодных участков к катодным и соответствующее перемещение катионов и анионов в электролите, что аналогично работе короткозамкнутого гальванического элемента.

Если представить, что в растворе имеется некоторый запас кислорода, который в нашу систему (из-за ее замкнутости) больше поступать не может, то коррозионный процесс с кислородной деполяризацией может продолжаться ровно столько, насколько велик запас кислорода в растворе, то есть, как только кислород полностью истощится, процесс коррозии должен прекратиться совсем.

Если металл находится в открытом сосуде, то кислород может поступать к катодным участкам путем диффузии из воздуха через раствор, и процесс коррозии может продолжаться до полного разрушения металла.

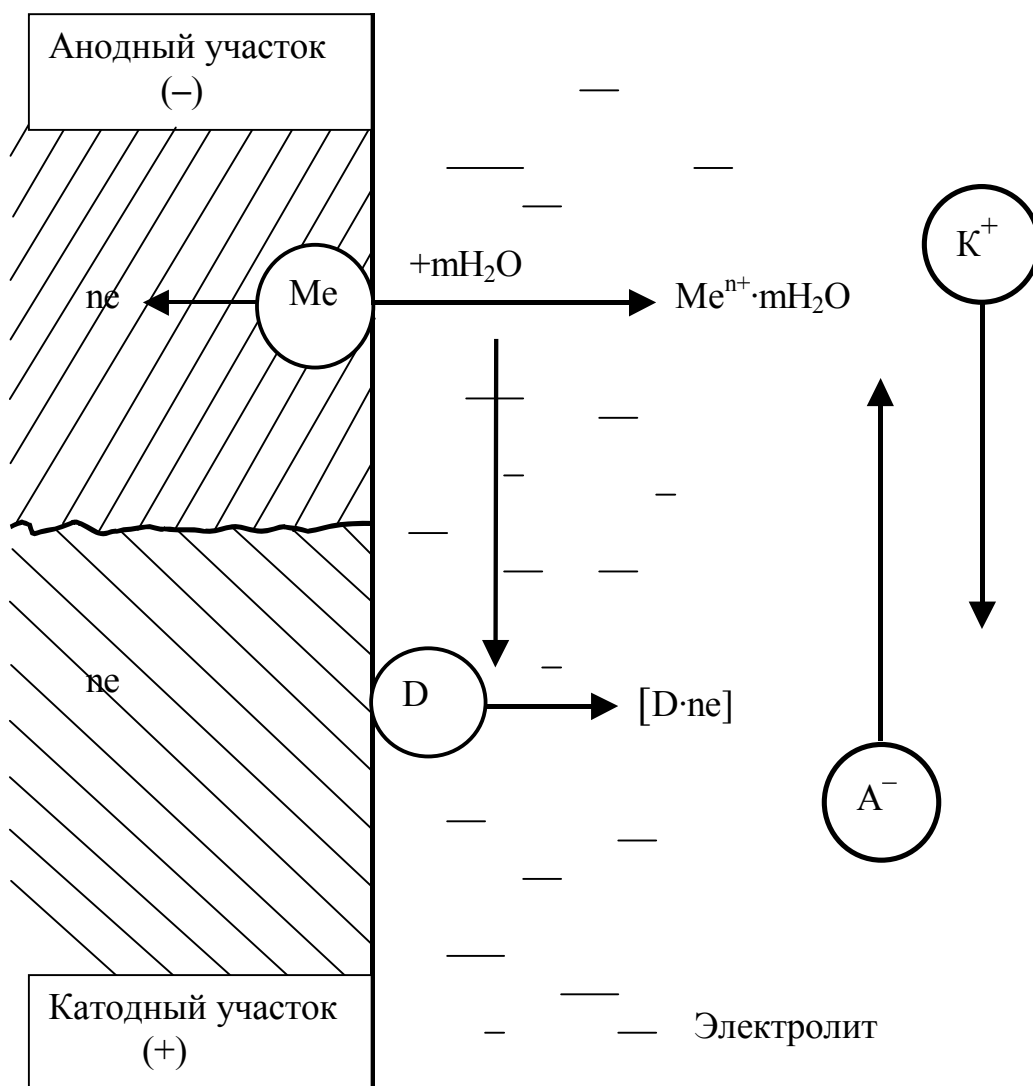


Рис. 2.5. Схема процесса электрохимической коррозии

Причинами электрохимической гетерогенности (дифференциации на анодные, с более отрицательным электродным потенциалом V_A , и катодные, с более положительным электродным потенциалом V_K , участки) поверхности металла, подверженного коррозии, являются следующие:

1. *Неоднородность внутренней структуры металла* (макро- и микровключения, неоднородности сплава, наличие границ блоков и зерен кристаллитов, выход дислокаций на поверхность металла, анизотропность металлического кристалла и др.). *Неоднородность защитных пленок на металле* (макро- и микропоры в окисной пленке, неравномерное распределение нерастворимых продуктов коррозии) или *неоднородность внутренних напряжений в металле* (неравномерная деформация, неравномерность приложенных внешних нагрузок).

2. *Неоднородность электролита* (различие в концентрации ионов данного металла или нейтральных солей в растворе, в водородном показателе pH, в концентрации кислорода).

3. *Неоднородность физических условий* (различие температуры, влажности и скорости движения воздушной струи) [44].

Если в цепи сопряженных процессов поступление кислорода к катоду является наиболее медленным, то общая скорость коррозии в основном определяется именно этой наиболее медленной фазой. Таким образом, скорость поступления кислорода в раствор к поверхности металла ограничивает общую скорость коррозионного процесса.

2.2. Характеристика горно-геологических условий и проведение шахтных исследований

2.2.1. Горно-геологические условия и особенности подземных вод на шахтах ООО «ДТЭК Добропольеуголь»

Компания ООО «ДТЭК Добропольеуголь» включает 5 шахт («Алмазная», «Белицкая», «Добропольская», «Новодонецкая» и «Пионер»).

Поля шахт компании расположены на территории Красноармейского угольного региона, одного из крупнейших геолого-промышленных регионов Донбасса.

Геологическое строение рассматриваемого региона характеризуется развитыми осадочными породами среднего и верхнего карбона, относящимися к свитам C_2^5 , C_2^6 , C_2^7 и C_3^1 , перекрытыми по всей площади более молодыми осадками (кайнозойскими, триасовыми, юрскими), суммарная мощность которых увеличивается с юга на север, достигая у северной границы 520 м. Каменноугольные отложения представляют собой чередование различных по составу и мощности слоёв песчаников, аргиллитов и алевролитов. Простираение пород – северо-западное, с азимутом 320° , падение северо-восточное, угол падения находится в пределах $6...12^\circ$. Сравнительно спокойное залегание горных пород осложняется рядом разрывных тектонических нарушений. Наиболее существенными из них являются Добропольский надвиг, Добропольский, Карповский и Кутузовский сбросы, сброс «А», взброс № 1.

В горных породах содержатся угли малометаморфизированные марок Д, Г и Ж. В центральной части региона расположены газовые угли, близкие к жирным и жирные. Содержание серы в углях составляет от 0,6 до 5 %. Балансовые запасы оценены в 4,5 млрд т, из которых одну треть составляют дефицитные угли, пригодные для коксования.

Водоносность отложений карбона наблюдается в трещиноватых песчаниках и известняках. По условиям накопления и циркуляции данные воды относятся к напорным. Фильтрационные свойства каменноугольных отложений изменяются существенно даже на небольших расстояниях в зависимости от их трещиноватости как по глубине, так и относительно площади их залегания.

Химический состав подземных вод отличается большим разнообразием. Минерализация вод до горизонта 330 м достигает 2...3 г/л. Шахтные воды – солоноватые (переходные от пресных к солёным) с минерализацией 1...10 г/л, их щёлочность $pH = 7...7,2$. Геохимические данные характеризуются тем, что только в этих водах, в устойчиво повышенных количествах (2...2,5 г/л) образуются сульфатные кальциевые солевые компоненты. В их составе чаще всего преобладают сульфаты и сульфато-хлориды (а также гидрокарбонаты) натрия. С глубиной количество содержащихся в воде сульфатов уменьшается за счёт увеличения хлоридов. В зоне затруднённого водообмена и застойного режима минерализация подземных вод достигает 7 г/л, а щёлочность $pH = 8,5$. Шахтные воды являются коррозионно-активными по отношению к металлической крепи, минерализованными, со значительным содержанием ионов Cl^- и SO_4^{2-} . Характеристика шахтных вод представлена в табл.2.1.

Таблица 2.1

Коррозионные характеристики вод в выработках шахты «Алмазная» «ДТЭК Добропольеуголь»

pH	Общая минерализация, г/л	Химический состав, мг/дм ³ % экв				Коэффициент коррозии, при $K_k = rMg^{++} - rHCO_3^- > 0$, корродирующая среда	Агрессивность на металл $SO_4^{2-} + Cl^- < 5$ г/л (среднеагрессивная); > 5 г/л (сильноагрессивная)
		Cl^-	SO_4^{2-}	Mg^{++}	HCO_3^-		
7,2	2,5	$\frac{1420}{60}$	$\frac{941}{30}$	$\frac{88}{11}$	$\frac{439}{10,8}$	0,1	< 5 г/л

Вода также оказывает существенное влияние на прочность вмещающих пород (табл. 2.2). Как уже отмечалось, трещиноватые известняки и песчаники отличаются высокой водообильностью, а непосредственный контакт воды с горными породами негативно сказывается на прочности последних. При водонасыщении все основные углевмещающие породы в 1,5...3 раза снижают свои прочностные свойства. Естественно, что это существенно влияет на устойчивость горных выработок. Углевмещающие породы имеют невысокую прочность, они легко размокают, насыщены водой. Эти обстоятельства существенно ухудшают условия поддержания горных выработок, вызывая коррозию крепи и, как следствие, снижение ее несущей способности. Рассмотренные условия незначительно изменяются в пределах других шахт «ДТЭК Добропольеуголь».

Таблица 2.2

Параметры основных угольных пластов и свойства вмещающих пород

Наименование пласта	Полезная мощность, м	Глубина отработки, м	Угол падения пласта, град	Наименование пород	Непосредственная кровля			Непосредственная почва		
					Предел прочности на одноосное сжатие, МПа		Степень снижения прочности при водонасыщении	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа		Степень снижения прочности при водонасыщении
					В нормальном состоянии	При водонасыщении		В нормальном состоянии	При водонасыщении	
m_5^1	0,97	360...455	5 – 12	аргиллит	8,3...55,4	3,8...18,5	2,18...3,0	7,5...56,7	3,8...38,0	1,98...1,49
m_4^0	0,92	95...510	4 – 12	аргиллит	16,5...52,0	—	—	—	—	—
l_3	1,56	60...350	4 – 12	алевролит	6,5...77,2	—	—	16,5...75,6	8,1...44,0	2,04...1,72
l_1	1,05	180...330	4 – 12	аргиллит	25,0...70,2	14,5...33,8	1,72...2,08	—	—	—
K_8^H	0,68	100...550	4 – 11	алевролит	13,8...76,4	12,4...38,0	1,11...2,01	20,1...70,9	11,0...47,5	1,83...1,49
				аргиллит	25,1...65,7	13,5...30,5	1,86...2,15	14,8...30,7	10,3...23,2	1,44...1,32
				алевролит	27,8...71,7	15,9...42,0	1,75...1,71	15,7...75,1	7,8...35,4	2,01...2,12
				песчаник	25,1...65,7	13,5...30,5	1,86...2,15	—	—	—
				аргиллит	18,5...67,0	15,3...33,0	1,21...2,03	—	—	—
				алевролит	14,6...77,5	11,2...30,5	1,3...2,54	17,6...82,3	15,6...54,0	1,13...1,52

2.2.2. Горно-геологические условия и особенности подземных вод на шахтах ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

Угленосность Западного Донбасса связана с отложениями нижнего и среднего карбона, которые являются непосредственным продолжением каменноугольных отложений Донецкого бассейна. Наиболее угленосными являются отложения нижнего карбона, в частности, свиты C_1^3 (Самарской). Общая мощность свиты составляет около 800 м, по своим литологическим особенностям она делится на две подсвиты. Нижняя подсвита наиболее продуктивна, поскольку содержит до 60 угольных пластов и прослоев мощностью от 0,1 м до 2,0 м, из которых 21 угольный пласт (C_{12} , C_{11} , C_{10}^B , C_9 , C_8^B , C_8^H , C_7 , C_6^B , C_6^H , C_5^B , C_5^H , C_4^B , C_4^H , C_4^1 , C_3 , C_2^B , C_2^H , C_1 , C_0) имеет промышленное значение. Глубина залегания пластов находится в пределах от 60 до 900 м, угол падения составляет $0...5^\circ$.

Разведанные нижекарбоновые угли Западного Донбасса различны по качеству и относятся к маркам Г (угли Павлоградско-Петропавловского и Западно-Павлоградского районов), Д (угли Новомосковского района) и к переходным от марки Д к бурым (угли Петриковско-Царичанского района). Пласты газового угля содержат 5...12 % золы и 1,3...2,5 % серы.

Нижекарбоновые отложения, вмещающие рабочие пласты угля, прикрыты третичными и четвертичными отложениями мощностью от 50 до 135 м, которые содержат мелкозернистые пески, суглинки и глины.

Месторождение осложнено густой сетью тектонических нарушений, характеризуется высокой водообильностью покрывающих мелкозернистых пород, близких к пльвунам.

В районе шахт «Западно-Донбасская» № 1 и № 2 наблюдается большое количество поверхностных (р. Самара и Сухая Чаплинка) и подземных вод. Подземные воды протекают через несколько горизонтов. Водоносный горизонт в отложениях Бучакской свиты содержит пески. Мощность водоносного горизонта составляет 19...28 м, глубина залегания от поверхности 30...70 м. Питание горизонта происходит за счет фильтрации атмосферных осадков, а также к нему поступают воды из выше и нижележащих водоносных горизонтов. Водоносный горизонт Бучакской свиты оказывает существенное влияние на обводнение горных выработок, т. к. в его почве имеют место отложения каменноугольной системы. Водоносные горизонты в этих отложениях содержат песчаники, известняки и пласты угля, переслаивающиеся с водоупорными песчаниками и глинистыми сланцами. Водоносные породы составляют в среднем 23...26 % от вскрытой толщи каменноугольных отложений. Водоносные горизонты каменноугольных отложений имеют гидравлическую взаимосвязь с водами в отложениях Бучакской свиты, а в центральной и западной частях шахтных полей с водами Киевско-Харьковской свиты.

Шахтные воды являются коррозионно-активными по отношению к металлической крепи, сильноминерализованными, содержат значительное коли-

чество ионов Cl^- и SO_4^{2-} (табл. 2.3). Их общая жесткость колеблется в пределах 10...25 мг/экв, щёлочность $\text{pH} = 7...7,8$.

Таблица 2.3

Коррозионные характеристики подземных вод в выработках шахт «ДТЭК Павлоградуголь»

Название шахты	pH	Общая минерализация, г/л	Химический состав, мг/дм ³ %ЭКВ				Коэффициент коррозии, при $K_k = r\text{Mg}^{++} - r\text{HCO}_3^- > 0$, Корродирующая среда	Агрессивность на металл $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ < 5 г/л (средне-агрессивная); > 5 г/л (сильно-агрессивная)
			Cl^-	SO_4^{2-}	Mg^{++}	HCO_3^-		
«Благодатная»	7	23,3	$\frac{14584}{99}$	$\frac{6}{0,1}$	$\frac{644}{12}$	$\frac{85}{0,3}$	51,6	> 5 г/л
«Западно-Донбасская»	6,5 - 7	36,5	$\frac{23049}{98,6}$	$\frac{320}{1}$	$\frac{2152}{27}$	$\frac{140}{0,3}$	174,3	> 5 г/л
им. Героев Космоса	6,9	27,2	$\frac{17375}{99}$	$\frac{201}{0,1}$	$\frac{1520}{25}$	$\frac{1280}{0,4}$	122,9	> 5 г/л
им. Сташкова	7,4	3,9	$\frac{1687}{71}$	$\frac{687}{14}$	$\frac{328}{22}$	$\frac{329}{5,4}$	16,6	< 5 г/л

Содержание минеральных солей (сульфатов и хлоридов) в шахтных водах оказывает значительное влияние на развитие процессов коррозии металлической крепи, что в итоге сказывается на ее несущей способности.

Как правило, проблему обеспечения устойчивости прокорродированных участков крепей в капитальных и подготовительных выработках решают в едином ключе – заменяют старую, поврежденную коррозией крепь на новую. Оптимальное решение данной проблемы требует детального изучения процесса коррозии металлической крепи в шахтных (натурных) условиях.

2.2.3. Натурные исследования коррозии металлической крепи. Анализ факторов, обуславливающих процесс образования коррозии на её поверхности

Большое влияние на снижение несущей способности металлической крепи оказывает местная (неравномерная) коррозия. Для определения коррозионного износа металлических крепей в шахтных условиях были выполнены инструментальные замеры. Наблюдения проводились на шахтах «Алмазная» (ООО «ДТЭК Добропольеуголь»), им. Сташкова, «Благодатная», «Юбилейная», им. Героев Космоса (ПАО «ДТЭК Павлоградуголь») в выработках с различным сроком эксплуатации. Возраст обследованных выработок составляет от 3 до 55 лет. В шахтных условиях были произведены замеры изменения толщины профиля металлической арочной крепи, в тех ее местах, которые больше всего подвержены коррозии. Для этого первоначально производилась очистка крепи от продуктов коррозии при помощи абразивных материалов (наждачной бумаги), затем выполнялись замеры толщины профиля крепи с использованием

штангенциркуля (класс точности 0,1 мм). На каждом комплекте исследуемой крепи для обеспечения высокой надёжности натуральных измерений проводилось по 3...5 замеров.

По результатам натуральных наблюдений [39], проведенных на шахте «Благodatная», построены гистограммы (рис. 2.6).

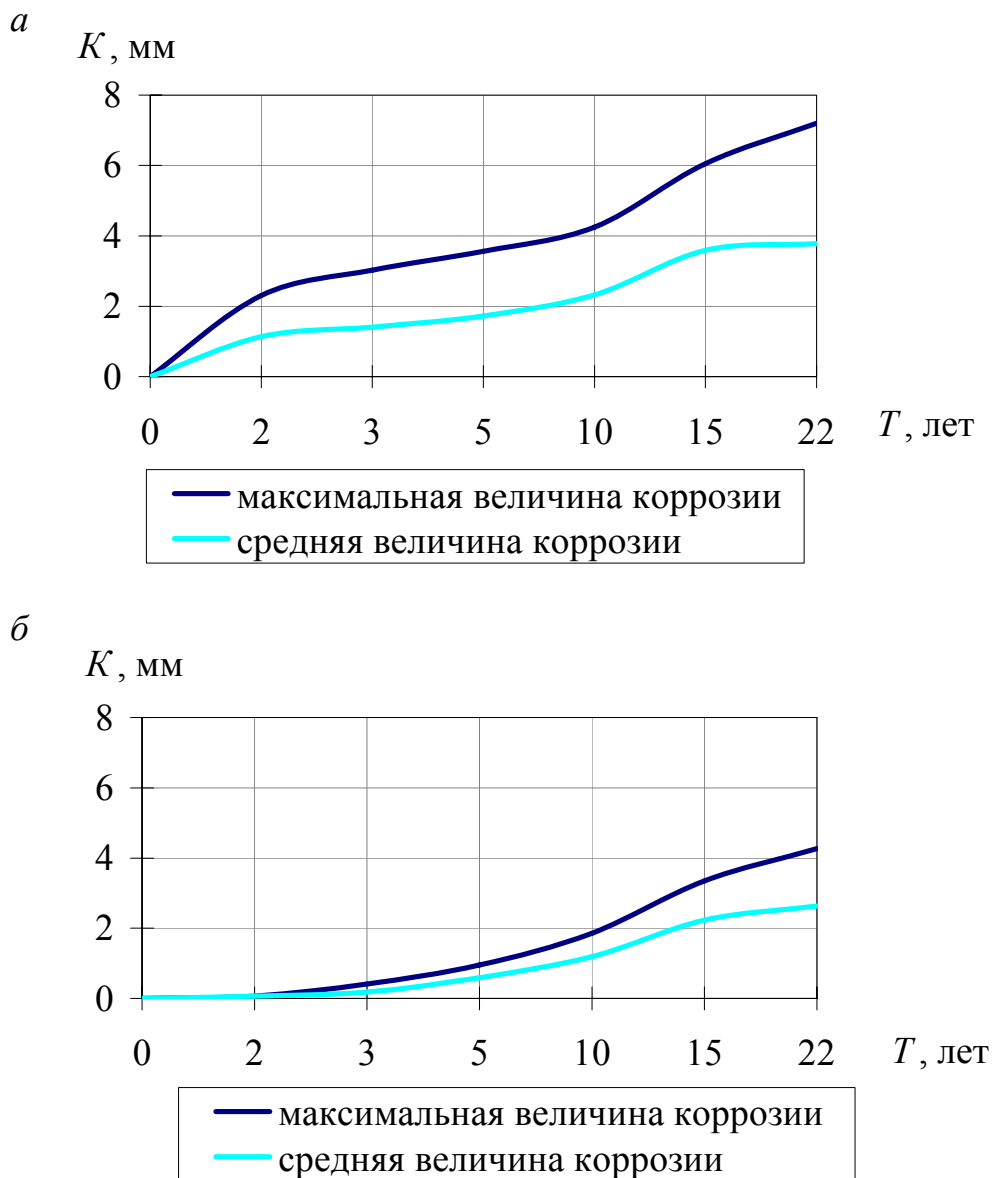


Рис. 2.6. Гистограммы зависимости коррозионных потерь от срока службы крепи в выработке шахты «Благodatная» на свежей воздушной струе (а), на исходящей струе (б)

Гистограммы показывают в сравнении динамику изменения коррозионных потерь металлической крепи в зависимости от условий эксплуатации (относительной влажности воздуха и скорости движения воздушной струи) в откаточном и вентиляционном штреках. Процесс ржавления металла в шахтных условиях может происходить только в присутствии кислорода. Поэтому в горных выработках, находящихся на свежей воздушной струе, корродирование металла происходит достаточно интенсивно вследствие значительного доступа кисло-

рода и высокой скорости движения воздушной струи. Этим объясняется различие в протекании процесса коррозии в выработках, которые находятся на свежей и исходящей воздушной струе (см. рис. 2.6).

В сухих выработках имеет место равномерная коррозия, а на участках, где на крепь воздействуют минерализованные шахтные воды, процесс приобретает неравномерный характер, при этом наблюдается наибольший коррозионный износ. В исходящей из выработки воздушной струе влажность ниже критической, поэтому динамика коррозионного процесса в начальный период отличается от коррозии в условиях притока свежего воздуха. К тому же находящиеся во вмещающих породах или грунтовых водах легкорастворимые соли (хлориды, сульфаты) повышают коррозионную агрессивность пород, активизируя развитие коррозионных процессов.

Это происходит вследствие активирования металла присутствующими ионами, в особенности ионами хлора, которые, адсорбируясь на поверхности стали и вытесняя оттуда кислород, способствуют разрушению окисных пленок, затрудняя пассивирование этой поверхности.

На основе проведенных на шахтах ГХК «Добропольеуголь» (в настоящее время ООО «ДТЭК Добропольеуголь») наблюдений за коррозионным износом металлической крепи в выработках с различным сроком службы построен график (рис. 2.7).

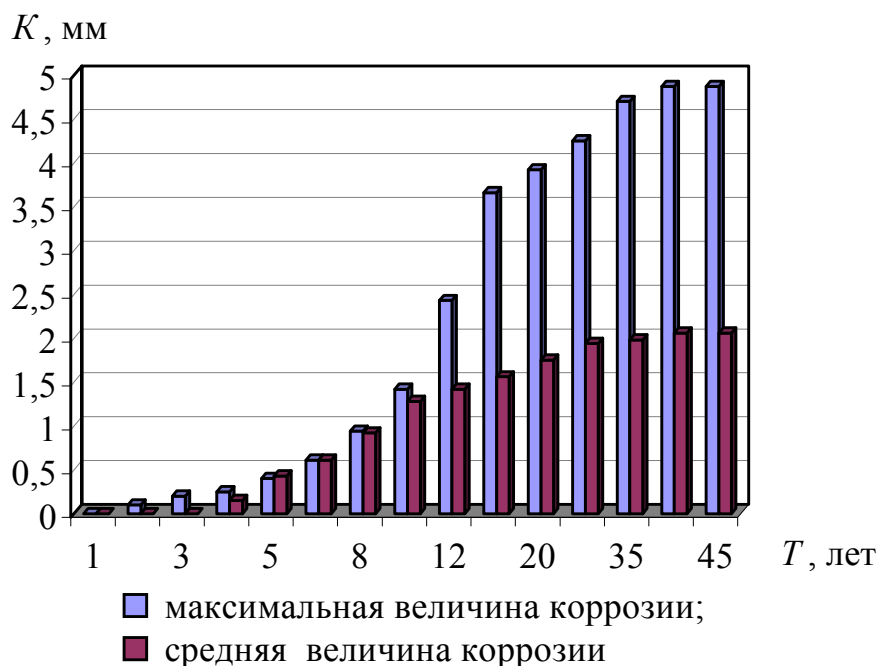


Рис. 2.7. Графики коррозионных потерь в металле крепи с различным сроком эксплуатации в условиях шахты «Алмазная» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»

Как видно из графика, металлическая крепь подвержена значительной коррозии в начальный период (первые 10...15 лет эксплуатации), в дальнейшем коррозия замедляется, но процесс не останавливается. Коррозия нелинейно из-

меняется в течение всего срока эксплуатации металлической крепи, что объясняется образованием на поверхности металла стойких малорастворимых соединений окислов и гидроокислов железа, а также изменением физико-химических условий эксплуатации этих конструкций. Оба этих фактора замедляют развитие процессов коррозии в шахтных условиях.

Для определения зависимостей протекания процессов коррозии от основных влияющих факторов проведены ускоренные коррозионные испытания.

2.3. Ускоренные коррозионные испытания (УКИ). Технология проведения экспериментов

2.3.1. Выбор способа и условий проведения УКИ

Многие металлические конструкции шахтных крепей подвергаются периодическому воздействию сильноминерализованных шахтных вод. В зонах, где металлы периодически смачиваются солоноватыми водами, наблюдается самая большая коррозия. Она значительно превосходит коррозию при полном погружении в электролит.

Подобные условия эксплуатации конструкций лучше всего имитировать при ускоренных испытаниях методом переменного погружения металла в электролит. Данный способ широко используют не только для изучения коррозионной стойкости металлов и средств защиты конструкций, предназначенных для эксплуатации в воде, но и для испытания изделий, которые будут функционировать в атмосферных условиях.

Периодическое смачивание как способ увеличения скорости коррозии может быть применено при ускоренных испытаниях металла шахтных крепей, коррозия которых контролируется в значительной степени скоростью поступления кислорода к металлу. Этот вид испытания характерен тем, что коррозионный процесс большую часть времени протекает в тонком слое электролита, причем, как показано в работе [52], для многих металлов, процесс коррозии которых определяется скоростью катодной реакции, это обстоятельство должно привести к резкому сокращению сроков испытания. Известно, что скорость катодного процесса в пленках намного выше, чем в полном объеме электролита. Таким образом, особенно сильное ускорение коррозии можно получить в момент, когда основное время металл будет находиться в воздухе и корродировать в тонком слое электролита, который медленно испаряется. Периодическое смачивание исключает торможение анодного процесса и обеспечивает, благодаря усиленному подводу кислорода, эффективное протекание катодного процесса.

По мере уменьшения слоя электролита скорость кислородной деполяризации всё больше увеличивается. Необходимо при этом учитывать, что чрезмерное уменьшение толщины плёнки может вызвать сильную анодную поляризацию. Поэтому приходится выбирать оптимальную толщину плёнки (по данным работы [52] слой электролита не должен быть меньше 30...50 мкм). На ос-

новании отчетов о проделанных испытаниях как в нашей стране, так и за рубежом можно сделать вывод, что хорошие результаты при периодическом увлажнении получаются, когда около 15...20 % всего времени образцы погружены в электролит и 80...85 % времени корродируют на воздухе в тонкой пленке электролита. К тому же время, в течение которого образцы погружены в электролит, во избежание накопления продуктов коррозии в тонких слоях, разбивают на несколько периодов, т. е. пленку возобновляют несколько раз в сутки. Частота смачивания при коррозионных испытаниях играет важную роль, в связи с тем, что по мере увеличения количества смачиваний в единицу времени коррозия будет возрастать.

Наибольшее увеличение скорости коррозии в процессе длительных испытаний можно получить при смачивании образцов приблизительно один раз в час (рис. 2.8) [52].

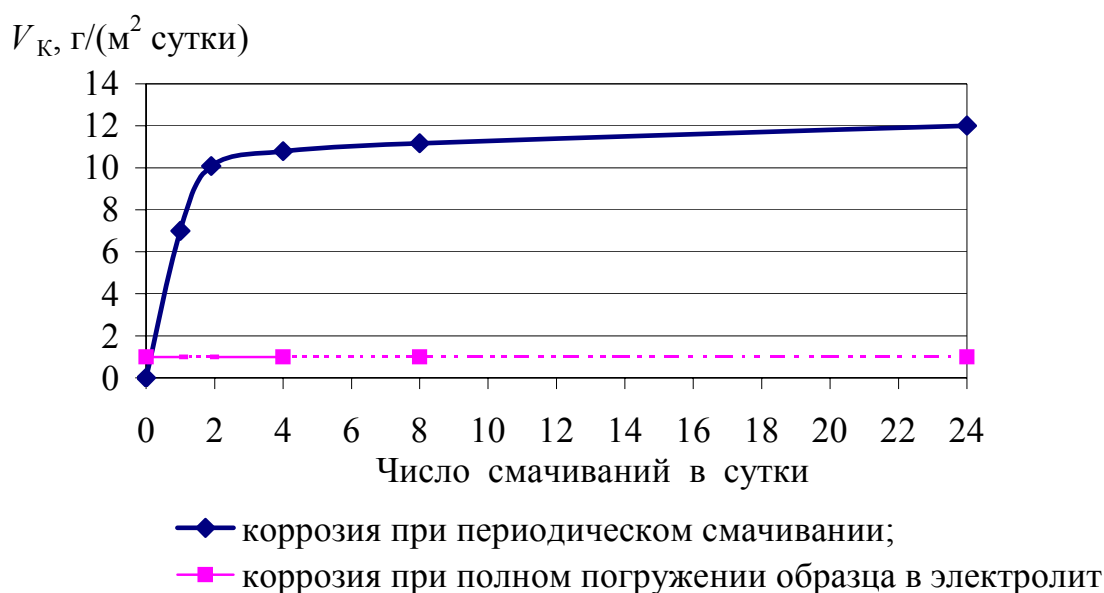


Рис. 2.8. Кривые зависимости скорости коррозии стали марки Ст 5 от частоты смачивания образцов 0,5н. (3 %) раствором NaCl

Дальнейшее увеличение частоты смачиваний, которое способствует более длительному пребыванию металла под воздействием более толстых слоёв электролита, уменьшит скорость протекания катодной реакции, а поэтому не может привести к заметному росту коррозии.

На рис. 2.8 сплошной линией показана зависимость скорости коррозии стали от частоты смачиваний 3 %-ным раствором хлористого натрия при испытании в течение одной недели; пунктирной линией – процесс коррозии при полном погружении образцов в электролит.

Для определения степени влияния водородного показателя pH на процесс протекания коррозии и коррозионные потери металлической крепи в течение продолжительного срока ее службы были проведены ускоренные коррозионные испытания. Для исследования использовались металлические пластинки стали марки Ст 5, толщиной 3 мм и размерами 100 × 50 мм. В каждой пластинке просверлено отверстие, необходимое для крепления ее на штанге. Все образцы

подвешиваются на штанге при помощи химически стойкой нити (лески). Для обеспечения естественного отвода продуктов коррозии, образующихся на образцах, отверстия на пластинах расположены с эксцентриситетом к вертикальной оси. При выборе способа коррозионных исследований учитывали характер условий работы крепи. Кривые на рис. 2.8 показывают, что металл подвергается наибольшей коррозии при периодическом смачивании в растворе электролита. Поэтому для моделирования шахтных условий эксплуатации крепи использовали ускоренные коррозионные испытания с периодическим погружением образцов в электролит.

2.3.2. Определение влияния окалины на коррозию стали марки Ст 5 в зависимости от водородного показателя pH водного раствора

Коррозия металла в воде с различным уровнем pH хорошо изучена и описана во многих источниках [37, 42, 44 и др.]. Также хорошо известно коррозионно-активное действие окалины на металл. Поэтому во время проведения коррозионных испытаний неизменным условием является удаление окалины. Однако в начальный период эксплуатации металлической крепи окалина является хорошей защитой металла от коррозии, хотя работы по изучению продолжительности ее защитного действия ранее не проводились.

Автором были выполнены испытания образцов в 5 растворах электролитов со следующими значениями pH: 3; 4,5; 6; 7,5; 9. Чтобы добиться наибольшего коррозионного эффекта, был использован 3 %-ный раствор NaCl.

Растворы готовили на дистиллированной воде. Для достижения необходимой величины pH применяли химические реактивы, концентрация которых представлена в табл. 2.4.

Окончательную проверку каждого раствора на pH проводили при помощи лакмуса.

Таблица 2.4

Химический состав электролитов

Показатель	Электролит				
	pH 3	pH 4,5	pH 6	pH 7,5	pH 9
Химическое вещество	HCl	HCl	HCl	NH ₄ OH	NaOH
Концентрация, моль/л	1·10 ⁻³	3,2·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁶	3,2·10 ⁻⁶	1·10 ⁻³

Целью работы является определение степени зависимости скорости коррозии от уровня pH среды и наличия окалины на металле. Для исследований используем образцы стали марки Ст 5. Перед проведением эксперимента производим обезжиривание образцов виннокислым аммонием 10 % + NH₄OH (при

температуре 25...70°C). Затем изделия промывают водой, подогретой до 30...50°C, после чего образцы сушат, протирая их фильтровальной бумагой.

Образцы нумеруют, применяя бумажные бирки, и взвешивают. Затем их подвешивают на штативе. На отдельном столе располагают стеклянные полулитровые сосуды с растворами. Каждый из них снабжен биркой, на которой указан порядковый номер погруженного в раствор исследуемого образца и pH раствора (рис. 2.9).

Учитывая рассмотренный выше отечественный и зарубежный опыт проведения ускоренных коррозионных испытаний (УКИ), работаем по схеме, предусматривающей периодическое смачивание образцов два раза в сутки. Таким образом, металлические пластинки погружаются в растворы электролитов на 1 час, через каждые 11 часов.



Рис. 2.9. Испытания по определению влияния окалины на коррозию металла в растворах с различным значением pH

Учитывая тот факт, что в результате коррозионных испытаний происходит насыщение растворов ионами металла и в дальнейшем процесс окисления может затормаживаться, раз в сутки производили замену растворов.

Коррозионные испытания проводились в течение 30 суток. Первоначально изучали увеличение массы корродирующих образцов. По истечении срока коррозионных испытаний образцы были очищены от продуктов коррозии и взвешены. На основании полученных данных построены кривые на рис. 2.10, а также определены зависимости коррозионных потерь от уровня pH и наличия окалины на металле (рис. 2.11).

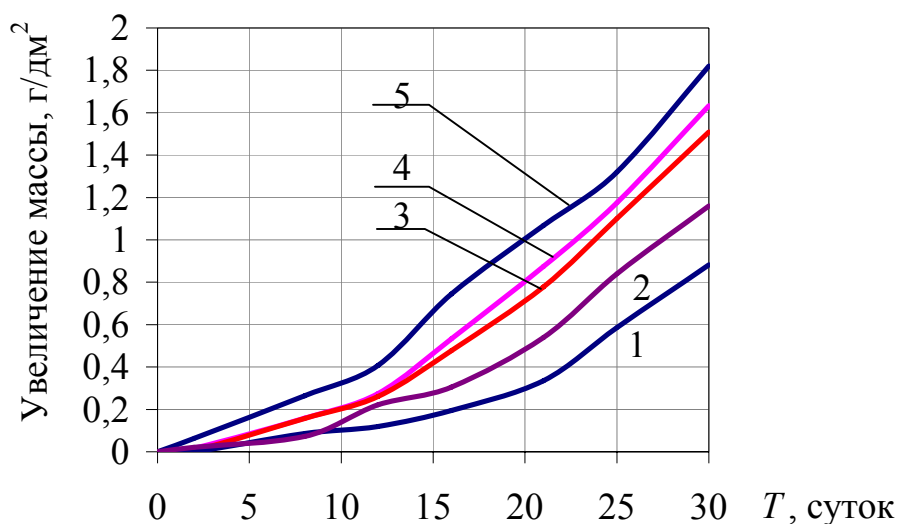


Рис. 2.10. Кривые влияния величины pH среды на коррозию металла, защищенного окалиной: 1 – pH 3; 2 – pH 4,5; 3 – pH 6; 4 – pH 7,5; 5 – pH 9

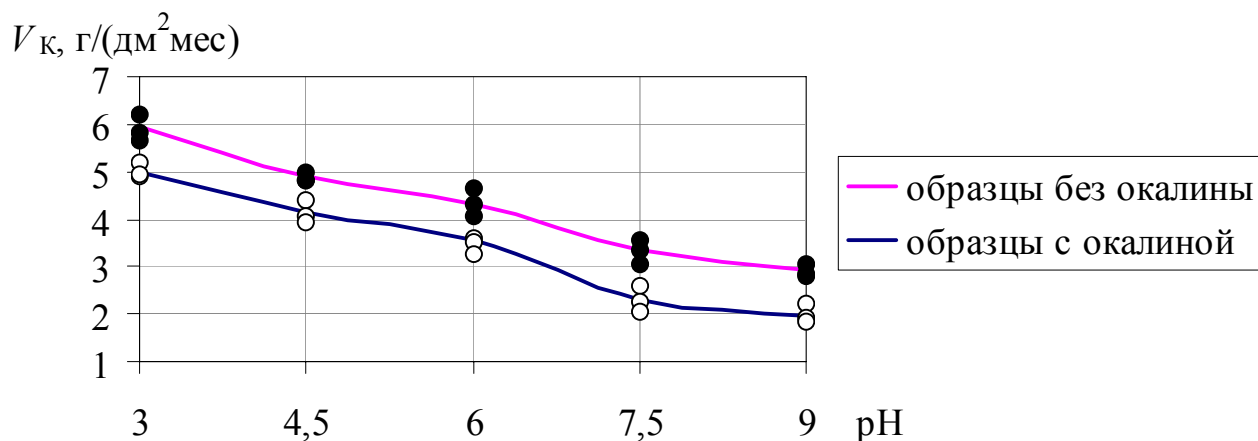


Рис. 2.11. Кривые влияния наличия окалины на скорость коррозии металла в условиях с различным значением pH среды

Продукты коррозии, которые отложились на образцах в результате испытаний, были изучены. Результаты исследований сведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Описание продуктов коррозии, образующихся на поверхности стали

рН среды	Химическая формула	Описание
3 – 6 (кислая)	$Fe_2O_3 \cdot aq$	Охряно-желтый, не растворимый в разбавленной HCl, не объемистый, мелкие частицы
6 – 7,5 (нейтральная)	$Fe_2O_3 \cdot aq$	Коричнево-желтый
7,5 – 9 (щелочная)	$FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot aq$	Коричнево-желтый, красноватый, объемистый, частично растворим в разбавленной кислоте

Полученные экспериментальные данные подтверждают защитную функцию окалина по отношению к металлу крепи на протяжении начального периода ее нахождения в шахтных водах с различным уровнем рН. В зависимости от величины водородного показателя определяется степень защитного действия окалина. Сравнивая показатели увеличения массы образцов в зависимости от уровня рН водной среды, определили, что в щелочных растворах увеличение массы образцов происходит более интенсивно, чем в кислотных. Это объясняется меньшей растворимостью продуктов коррозии в щелочных водах, вследствие чего на поверхности металла образуется значительный слой ржавчины, под которым процессы коррозии активизируются. В кислотных водах процесс коррозии идет на поверхности металла с дальнейшим отводом ее продуктов дренирующими водами.

Скорость коррозии в кислотных водах значительно выше, чем в щелочных. Окалина, обладая защитными свойствами в начальной стадии развития коррозии (в шахтных условиях это 6...8 месяцев), наиболее эффективна в нейтральных и щелочных растворах. При этом скорость коррозии снижается в диапазоне от 16 % (если рН = 3) до 20...40 % (если рН = 6...7,5). Изменения, которые происходят в процессах коррозии образцов с окалиной и без окалина, объясняются ее защитными свойствами. При увеличении уровня рН среды до 9 общая скорость коррозии значительно снижается. Также окалина проявляет защитные свойства, когда уровень рН = 3...4,5. Однако продолжительность протекторного действия окалина в данном случае гораздо ниже, чем в среде с более щелочным характером шахтных вод.

2.3.3. Определение влияния концентрации нейтральных солей на скорость коррозии стали марки Ст 5

При изучении результатов обследования выработок шахт «ДТЭК Добропольеуголь» и ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» была отмечена некоторая закономерность изменения скорости коррозии от концентрации солей в растворе. Так, с увеличением концентрации соли в шахтной воде до определенного значения наблюдается рост скорости коррозии, в дальнейшем она снижается (рис. 2.12).

На диаграмме представлены данные по шахтам им. Сташкова (0,7 г/л), «Благодатная» (14 г/л), им. Героев Космоса (17 г/л), «Западно-Донбасская» (23 г/л). Шахты находятся в сравнительно равных условиях по химическому составу шахтных вод. Основным фактором, влияющим на коррозию в данных условиях, является минерализация шахтных вод.

Для определения степени влияния минерализации на протекание процесса коррозии проведены лабораторные испытания. В данной работе использованы растворы NaCl следующих концентраций: 0,1; 1; 3; 5; 7; 10 %.

Водородный показатель растворов рН = 7 характеризует воды на шахте «Алмазная», а также на остальных шахтах «ДТЭК Добропольеуголь». Испытания проводили, периодически смачивая образцы в растворе с последующим высушиванием их в воздухе.



Рис. 2.12. Результаты шахтных наблюдений изменения коррозии металлической арочной крепи в зависимости от минерализации вод

В шахтных условиях на процесс коррозии оказывает влияние проветривание горных выработок. Скорость коррозии усиливается в момент интенсивного доступа кислорода к поверхности металла. Для определения максимальной скорости коррозии в результате воздействия на крепь вод различной минерализации с учетом фактора проветривания, в испытаниях задействовали аэродинамическую трубу (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Общий вид аэродинамической трубы

Образцы смачивали 2 раза в сутки, а потом испытывали их в аэродинамической трубе на протяжении 10 часов в сутки, 30 дней подряд. Перед тем, как образцы подвешивали на штатив аэродинамической трубы, их сначала погружали в сосуды с растворами на 20 минут, затем в течение 5 часов проводили коррозионные испытания в аэродинамической трубе, затем образцы снова погружали в растворы на 20 минут, после чего продолжали исследования в том же режиме. Во время эксперимента моделировались условия, наиболее характерные для большинства горных выработок на угольных шахтах Украины. Например, обеспечивали скорость движения воздушной струи 8 м/с, относительную влажность воздуха 70 %, температуру воздуха 25°C. Для сравнения также были проведены коррозионные испытания с образцами без использования аэродинамической трубы в тех же температурно-влажностных условиях. Методика проведения подготовительных работ при ускоренных коррозионных испытаниях аналогична описанной ранее в п. 2.3.2. Результаты испытаний графически интерпретированы на рис. 2.14.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что зависимость скорости коррозии от концентрации NaCl в растворе имеет вид кривой с максимумом. Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований, проведенных В.Г. Акимовым [37].

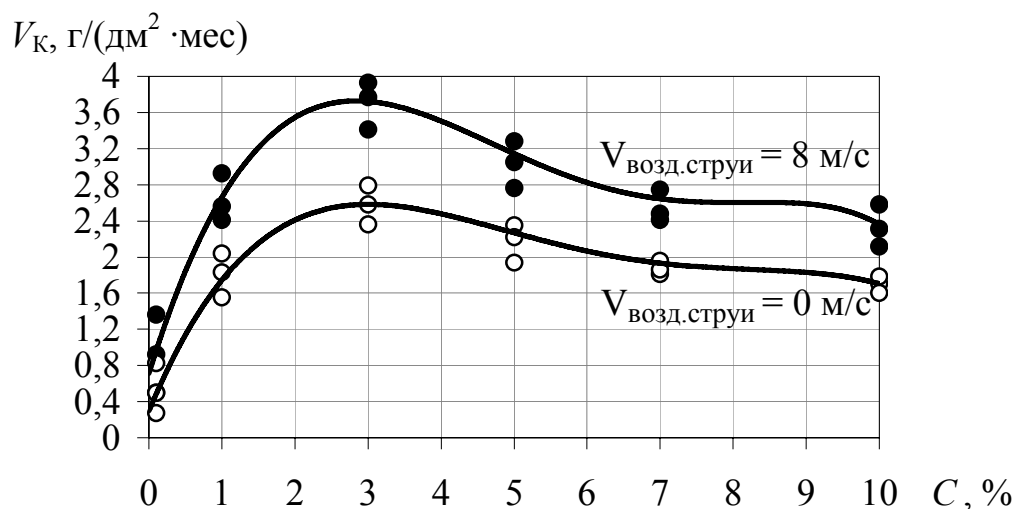


Рис. 2.14. Кривые зависимости скорости коррозии от концентрации соли в воде

Восходящая ветвь кривой объясняется тем, что повышение концентрации соли увеличивает электропроводность раствора, поэтому сила коррозионного тока может возрастать. Кроме того, увеличение концентрации таких анионов, как Cl^- (или SO_4^{2-}) уменьшает защитные свойства пленок и, следовательно, также способствует повышению скорости коррозии. Однако при увеличении концентрации соли в электролите растворимость кислорода падает (рис. 2.15) [37],

скорость деполяризации понижается, а значит должна уменьшаться скорость коррозии.



Рис. 2.15. Кривая растворимости кислорода в зависимости от концентрации соли в растворе (если $t = 25^\circ$). Растворимость в чистой воде принята за 100 (по данным Спеллера)

Таким образом, кривая имеет максимум при значении концентрации солей NaCl, равном 3%. Снижение кривой (см. рис. 2.14) указывает на то, что при данных концентрациях растворов влияние недостатка кислорода превалирует над факторами повышения электропроводности раствора и понижения защитных свойств плёнок. Это также объясняет факт, отмеченный при обследовании выработок. При одинаковых температурно-влажностных условиях крепь, обдуваемая струей свежего воздуха, подвергается коррозии в большей степени, чем крепь выработок, расположенных на исходящей струе.

2.3.4. Определение зависимости протекания процесса коррозии в металлических образцах, испытывающих действие изгибающих моментов

Это исследование имеет целью определение закономерности коррозионного повреждения отдельных участков металлических конструкций, испытывающих значительные напряжения в результате действия изгибающих моментов. Известно, что общая коррозия напряженного металла может идти быстрее, чем ненапряженного. Считается, что влияние напряжений, которые не превышают предел текучести металла, на процесс коррозии стали является незначительным, поскольку при этом электрохимическое состояние поверхности не изменяется, а смещение потенциала составляет 2...3 мВ [31]. Заметное влияние напряжений, пребывающих на уровне предела текучести и выше, связано с разрушением естественных защитных окисных пленок и с существенным выполаживанием поверхности стали. Скорость коррозии заметно увеличивается в результате действия концентраторов напряжений, которые локализируют пластическую деформацию в небольшом объеме металла. Коррозия связана следующей функциональной зависимостью с величиной максимальных напряжений, действующих на металлическую крепь в горных выработках: $K = f(\sigma)$. В про-

цессе эксплуатации металлическая крепь подвергается действию различных изгибающих моментов. В течение длительного срока эксплуатации площадь поперечного сечения профиля крепи изменяется от W_0 до W , в результате чего изменяются также и напряжения, действующие в сечении профиля СВП, следующим образом: $\frac{M}{W_x} = \sigma \leq R_T$.

В условиях воздействия агрессивных шахтных вод коррозия металлокрепь усиливается наличием значительных напряжений со стороны породного массива. Вследствие совместного влияния напряжений и коррозии металлическая крепь гораздо быстрее теряет свои проектные прочностные характеристики и в короткий срок выходит из строя.

Коррозия, воздействуя на металлические конструкции, также изменяет их механические свойства. Однако этот процесс носит не односторонний характер. Так, при наличии внутренних напряжений в металлической конструкции происходит интенсификация процессов коррозии. При всех равных внешних условиях элемент крепи, испытывающий максимальные напряжения, будет корродировать в несколько раз быстрее остальной части конструкции. В этом раскрывается двойственный характер процесса коррозии в конструкции, испытывающей максимальные деформации. Таким образом, в шахтных условиях металлическая крепь, испытывающая проектные нагрузки, корродирует со скоростью, значения которой равны 0,26...0,5 мм/год. В случае если крепь испытывает значительные напряжения, под влиянием коррозии уменьшается площадь поперечного сечения несущей конструкции, как следствие, растут напряжения внутри крепи, а коррозионный процесс продолжает развиваться. Как видим, наличие значительных напряжений, действующих на конструкцию металлической крепи, способствует более активному протеканию коррозии. Ее скорость может достигать 0,5...1 мм/год.

Для определения зависимости скорости коррозии от действия внешних нагрузок были смоделированы соответствующие реальным условия: установлена шарнирно-опертая балка, нагруженная по краям постоянной силой P , кг.

Исследование ставило цель определить зависимость изменения скорости коррозии от действующей нагрузки. В экспериментальных наблюдениях использовались стальные образцы размерами $400 \times 10 \times 3$ мм. Расстояние между опорами равно 100 мм. На образцы в опорных точках действуют такие моменты: $M = 150$ (мм) $\times P$. Площадь, на которой производились наблюдения, равна 1000 мм^2 . Перед проведением эксперимента ее очистили от окалины и жировых пятен механическим путем при помощи абразивных материалов. Затем остальные поверхности образцов, включая боковые грани, покрывали защитным слоем битума марки IV.

Стальные пластинки подвергали нагрузке 1, 2, 3, 4, 5 кг (рис. 2.16). В результате этого наблюдалась различная интенсивность коррозии образцов (рис. 2.17). Порядковый номер на образце соответствует приложенной нагрузке в кг. Условия атмосферной коррозии моделировались при помощи распыления 3 %-ного раствора NaCl. По результатам проведенных наблюдений построены

кривые на рис. 2.18. Во время выполнения исследований стало очевидным, что процесс коррозии носит неравномерный характер, а ее скорость начинает увеличиваться при достижении определенного уровня предельных напряжений (рис. 2.19).

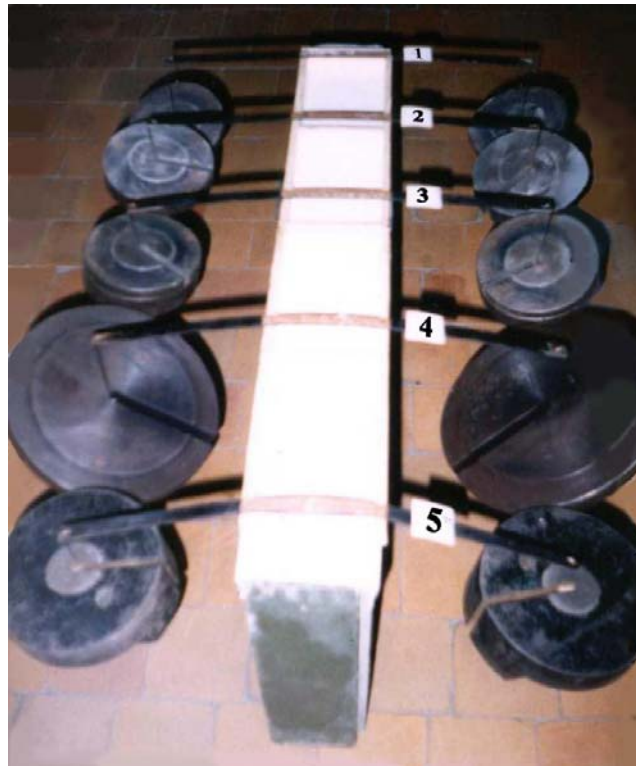


Рис. 2.16. Исследование протекания процесса коррозии в металлических образцах, которые испытывают воздействие изгибающих моментов

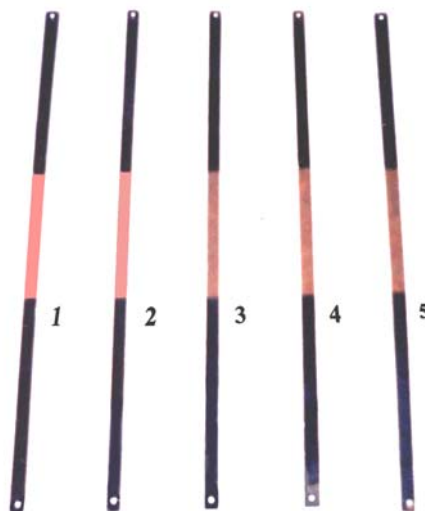


Рис. 2.17. Образцы, покрытые продуктами коррозии после проведения испытаний

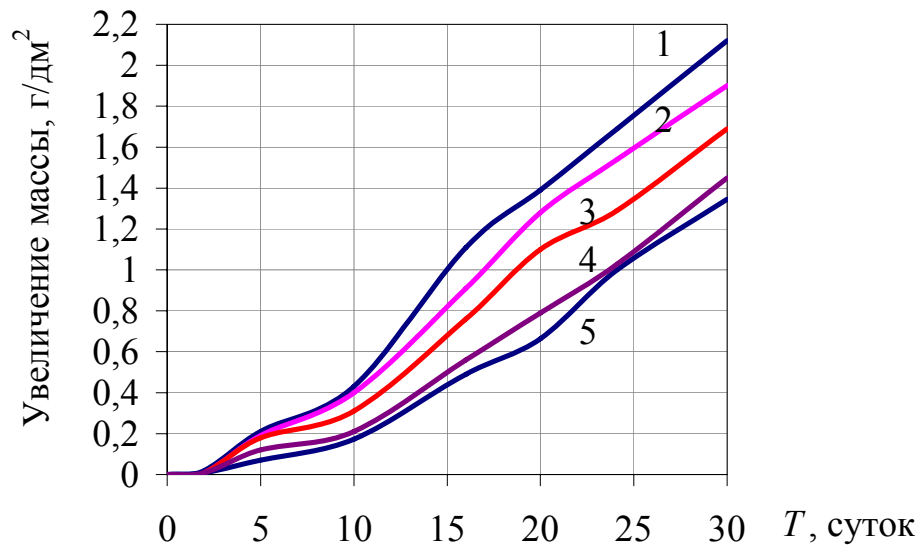


Рис. 2.18. Кривые зависимости протекания процесса коррозии во времени при различных нагрузках: 1 – 5 кг (250 МПа); 2 – 4 кг (200 МПа); 3 – 3 кг (150 МПа); 4 – 2 кг (100 МПа); 5 – 1 кг (50 МПа)

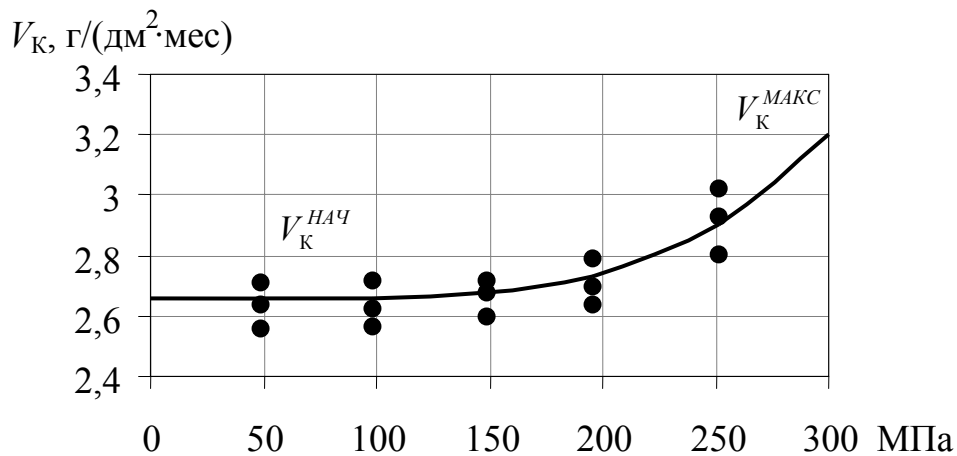


Рис. 2.19. Кривая зависимости скорости коррозии от действующих в крепи напряжений

При этом он интенсифицируется в опорных точках, так называемых участках концентрации напряжений, а на остальной поверхности образца коррозия носит более равномерный характер. До некоторого предела влияние напряжений на коррозии не сказывается, а значение ее скорости $V_K^{HAЧ} = 2,66$ г/дм²·мес (при этом концентрация хлоридов составляет 3 %, а $t = 25^\circ\text{C}$). Скорость коррозии металлической крепи остается неизменной, если напряжения в ней не превышают 150 МПа, т. е. когда $\sigma < 150$ МПа, то $V_K = V_K^{HAЧ}$. При увеличении напряжений, действующих на крепь от 150 МПа до 280 МПа, скорость коррозии увеличивается на 15 %. Если напряжения превышают 280 МПа, то начинают

действовать пластические деформации, а коррозионные процессы описываются восходящей кривой.

На основании проведенных исследований определена характерная зависимость скорости коррозии от действующих нагрузок: $V_K = V_K^{HAC} + f(\sigma)$.

Учитывая, что влияние этих нагрузок на коррозию металла начинает проявляться при достижении значений максимальных напряжений, то есть, когда $\sigma = 150$ МПа, зависимость $V_K(\sigma)$ запишется в следующем виде:

$$V_K = V_K^{HAC} + (1,13 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma^2 - 1,84 \cdot \sigma + 30) \cdot 10^{-3},$$

(2.3)

где V_K (г/дм²·мес) – скорость коррозии крепи в результате действия нагрузки, V_K^{HAC} (г/дм²·мес) – начальная скорость коррозии при $\sigma < 150$ МПа ($V_K^{HAC} = 2,66$ г/дм²·мес при минерализации вод 3 % NaCl), σ (МПа) – значение действующей на крепь нагрузки.

Эта зависимость позволит определять скорость коррозии с учетом уровня напряжений, возникающих в сечении металлической крепи при эксплуатации, а также корректировать параметры крепления с целью снижения негативного влияния максимальных напряжений на скорость коррозионного процесса.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Наибольшее изменение несущей способности арочной металлической крепи СВП наблюдается в течение первых 10...15 лет эксплуатации, когда этот профиль теряет 40...70 % своей несущей способности.

2. Наличие окалины на поверхности металлической крепи снижает скорость коррозии в начальный период ее эксплуатации на 20...40 %, в зависимости от показателя рН шахтных вод;

3. В условиях эксплуатации, когда на крепь действуют напряжения со стороны породного массива и влияют минерализованные шахтные воды, коррозия может усиливаться только при напряжениях, приближающихся к предельным значениям, то есть, когда $\sigma \rightarrow R_T$. Увеличение коррозии крепи под действием упругих деформаций происходит, если только значения σ достигают 150 МПа и выше, а при меньших значениях предельных напряжений скорость коррозии не изменяется и равна номинальной в условиях данной минерализации вод ($V_K^{HAC} = 2,66$ г/дм²·мес при содержании в воде 3 % NaCl). Вследствие действующих нагрузок увеличение напряжений, возникающих в крепи, от 150 до 280 МПа, приводит к увеличению скорости коррозии на 15 %.

Глава 3
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМЫХ
ПРОФИЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ КОРРОЗИИ

3.1. Определение зависимости изменения несущей способности специального взаимозаменяемого профиля (СВП) от коррозионного износа

На протяжении срока эксплуатации металлическая крепь подвергается воздействию агрессивных шахтных вод и, как результат, изменяется ее несущая способность, которая характеризуется моментом сопротивления W_x . Таким образом, момент сопротивления W является функцией от коррозии K , то есть $W = f(K)$.

В разных горно-геологических условиях металлическая крепь корродирует с разной скоростью, а значит и несущая способность крепи находится в зависимости от скорости этого процесса. Для определения зависимостей изменения несущей способности крепи при разной скорости коррозии в течение срока ее эксплуатации создана математическая модель. Общий вид серийно используемого профиля крепи представлен на рис. 3.1.

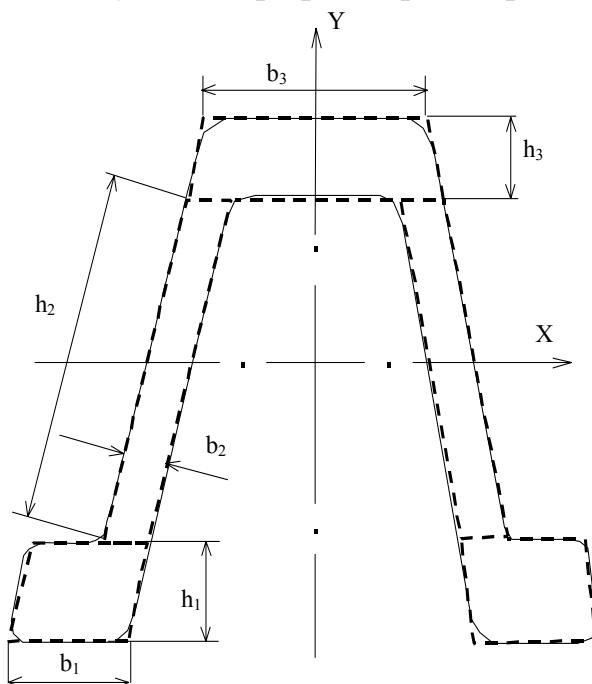


Рис. 3.1. Расчетная схема поперечного сечения СВП

Он состоит из прямолинейного днища, наклонных боковых стенок и симметрично расположенных фланцев. Для расчета общего момента сопротивления W поперечное сечение СВП раскладываем на простые фигуры и находим для каждой из них момент инерции J , который определяется по формуле:

$$J = \frac{bh^3}{12}, \quad (3.1)$$

где J – осевой момент инерции относительно центра тяжести; b – ширина профиля; h – высота.

На основе известных табличных данных о положении главных осей инерции [81] получим, что

$$J' = J_1 + a_1^2 F_1,$$

где J' – осевой момент инерции относительно главных осей инерции; J_1 – осевой момент инерции относительно центра тяжести самой фигуры; F_1 – площадь поперечного сечения профиля ($F = bh$); a_1 – координата центра тяжести фигуры. Тогда

$$J_{\text{общ}} = \sum_N J,$$

где N – количество прямоугольников, составляющих поперечное сечение профиля ($N = 5$).

Момент сопротивления СВП определяем по такой формуле:

$$W = \frac{J_{\text{общ}}}{y_{\text{max}}}, \quad (3.2)$$

где y_{max} – расстояние до наиболее удаленной точки поперечного сечения.

Учитывая, что в процессе эксплуатации из-за действия коррозии на металлическую крепь изменяются геометрические характеристики поперечного сечения СВП, формула (3.1) будет иметь следующие варианты:

$$J = \frac{(b - \kappa)(h - \kappa)^3}{12},$$

где J – осевой момент инерции фланцев и основания профиля с измененным под влиянием коррозии поперечным сечением, κ – коэффициент коррозионного износа.

$$J = \frac{(b - \kappa)h^3}{12},$$

где J – осевой момент инерции боковых наклонных стоек профиля с измененным под влиянием коррозии поперечным сечением.

В итоге при определении момента сопротивления W профиля с учетом коэффициента коррозионного износа κ формула (3.2) примет также вид:

$$W = \frac{J_{\text{ОБЩ}}}{y_{\text{max}} - \kappa}$$

В данном расчете имели в виду действие равномерной коррозии по всей поверхности сечения СВП, что может обеспечить универсальность при определении потери несущей способности. В этом случае рассчитывали параметры профилей, получивших наибольшее распространение при креплении горных выработок. Полученные результаты послужили основой для построения кривых на рис. 3.2, 3.3.

Однако в реальных условиях коррозия шахтной крепи, как правило, носит неравномерный характер, так как течение процесса изменяется в зависимости от условий эксплуатации. Следовательно, несущая способность профиля крепи тоже изменяется в зависимости от характерной для данных условий скорости коррозии. Выполняя расчеты, исходим из того, что скорость коррозии постоянна в течение всего срока службы крепи. На рис. 3.4 представлены графики зависимости изменения несущей способности СВП от скорости коррозии в течение срока эксплуатации крепи, полученные на основе вычислений.

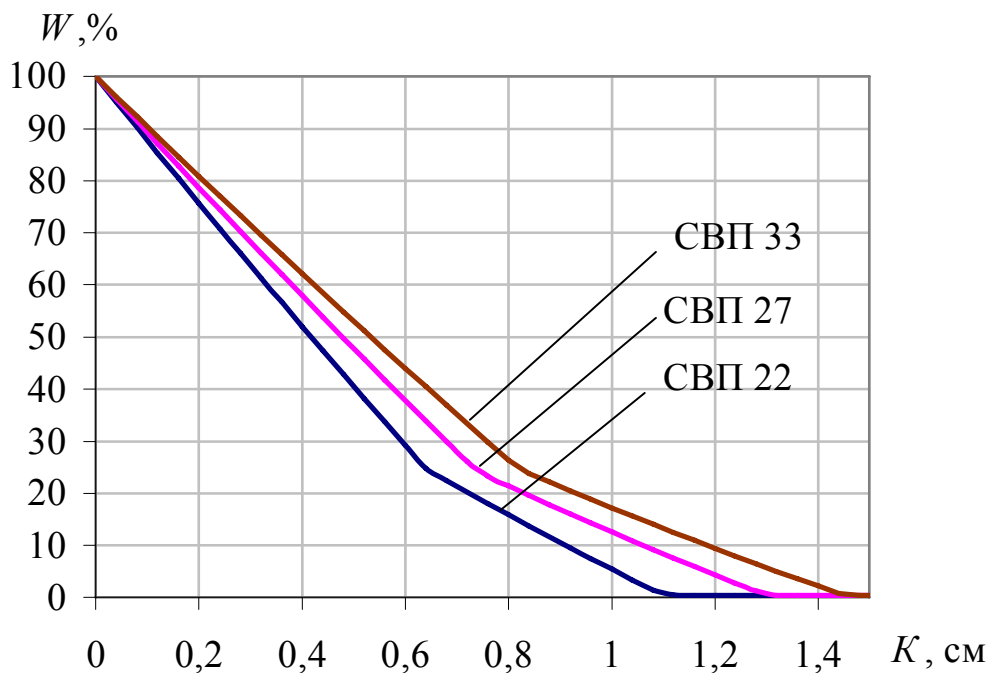


Рис. 3.2. Кривые изменения несущей способности профилей металлической арочной крепи в зависимости от их коррозионного износа

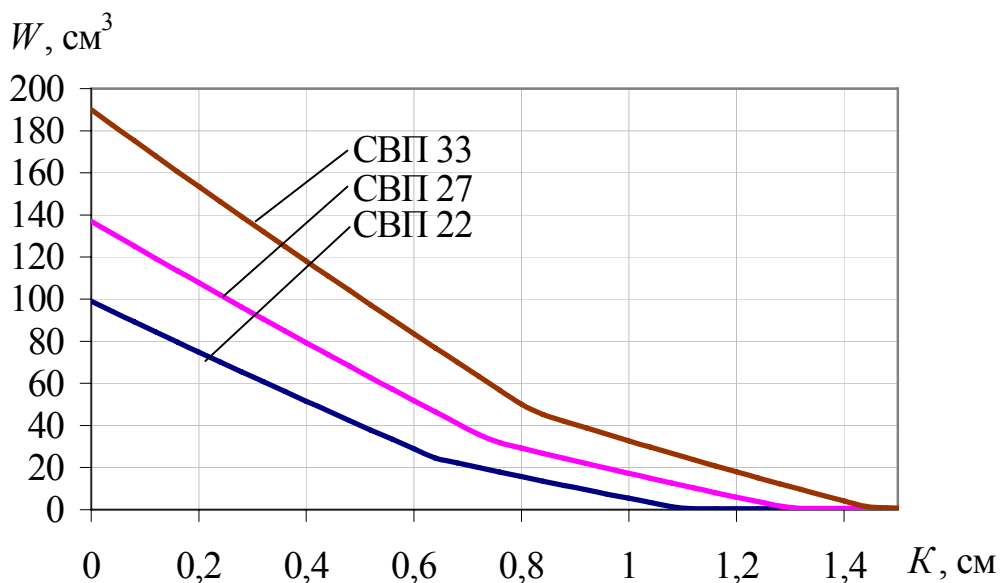


Рис. 3.3. Графики сравнительного анализа изменения несущей способности профилей в зависимости от коррозионного износа

Из представленных графиков получены зависимости изменения несущей способности разных профилей от коэффициента коррозионного износа, то есть для:

$$\text{СВП 22} \quad W = W_0(0,357\kappa^2 - 1,15\kappa + 1);$$

$$\text{СВП 27} \quad W = W_0(0,42\kappa^2 - 1,29\kappa + 1);$$

$$\text{СВП 33} \quad W = W_0(0,5\kappa^2 - 1,44\kappa + 1), \quad (3.3)$$

где W_0 – первоначальное значение несущей способности профиля СВП ($W_0 = 99 \text{ см}^3$ для СВП 22; $W_0 = 137 \text{ см}^3$ для СВП 27; $W_0 = 190 \text{ см}^3$ для СВП 33), κ – коэффициент коррозионного износа, см.

Многочисленные наблюдения, проведенные на шахтах, показали, что скорость коррозии металлической крепи в течение срока ее эксплуатации постоянно изменяется [83], что объясняется изменением внешних условий, в которых она функционирует. Учитывая то, что коррозия K является функцией от времени T , можно определить зависимость $W(T)$. С учетом условий на шахтах «ДТЭК Добропольеуголь», ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» (рис. 3.5, 3.6) определены зависимости: $W = f(T)$ (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Зависимости изменения несущей способности профиля крепи от срока эксплуатации на разных шахтах

Шахта им. Сташкова	$W(T) = -0,0004 \cdot \tau^3 + 0,057 \cdot \tau^2 - 3,01 \cdot \tau + W_0$
«Алмазная»	$W(T) = -0,0008 \cdot \tau^3 + 0,103 \cdot \tau^2 - 4,5 \cdot \tau + W_0$
им. Героев Космоса	$W(T) = -0,0008 \cdot \tau^3 + 0,108 \cdot \tau^2 - 4,89 \cdot \tau + W_0$
«Благодатная»	$W(T) = -0,001 \cdot \tau^3 + 0,167 \cdot \tau^2 - 5,99 \cdot \tau + W_0$
«Западно-Донбасская»	$W(T) = -0,002 \cdot \tau^3 + 0,199 \cdot \tau^2 - 6,96 \cdot \tau + W_0$

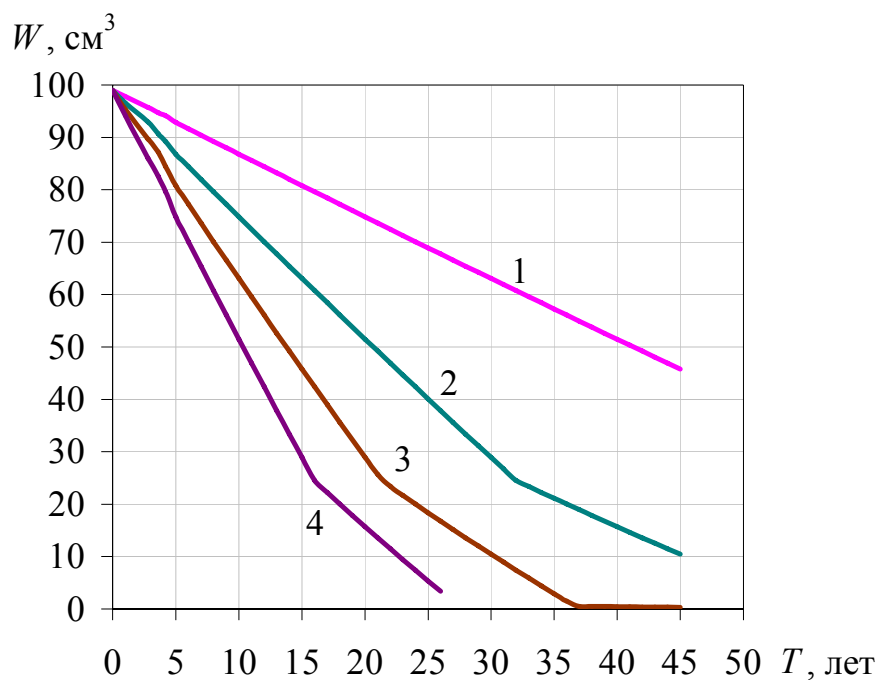


Рис. 3.4. Кривые зависимости изменения несущей способности специального взаимозаменяемого профиля от скорости коррозии K в течение срока эксплуатации крепи: 1 – 0,1 мм/год, 2 – 0,2 мм/год, 3 – 0,3 мм/год, 4 – 0,4 мм/год

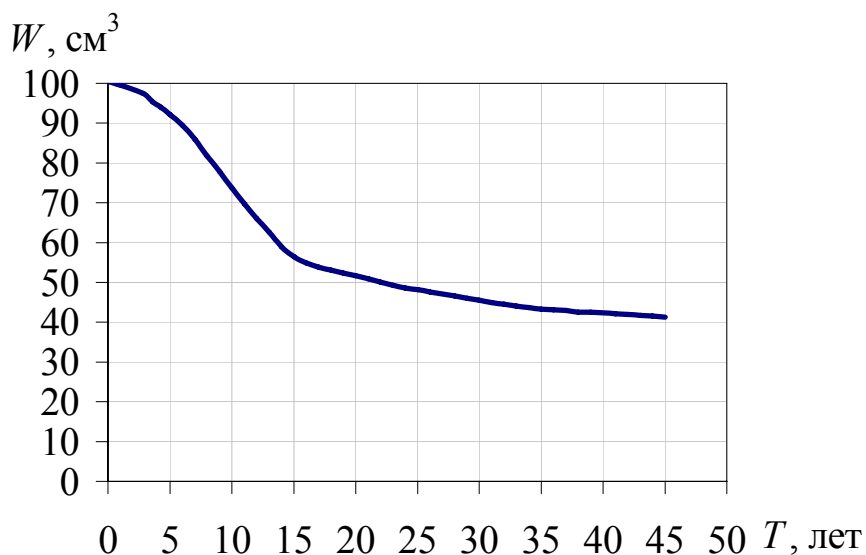


Рис. 3.5. Кривая зависимости изменения несущей способности СВП от времени эксплуатации крепи в условиях шахты «Алмазная»

На основе данных рис. 3.4 и 3.5 выполнен сравнительный анализ несущей способности профиля рис. 3.7.

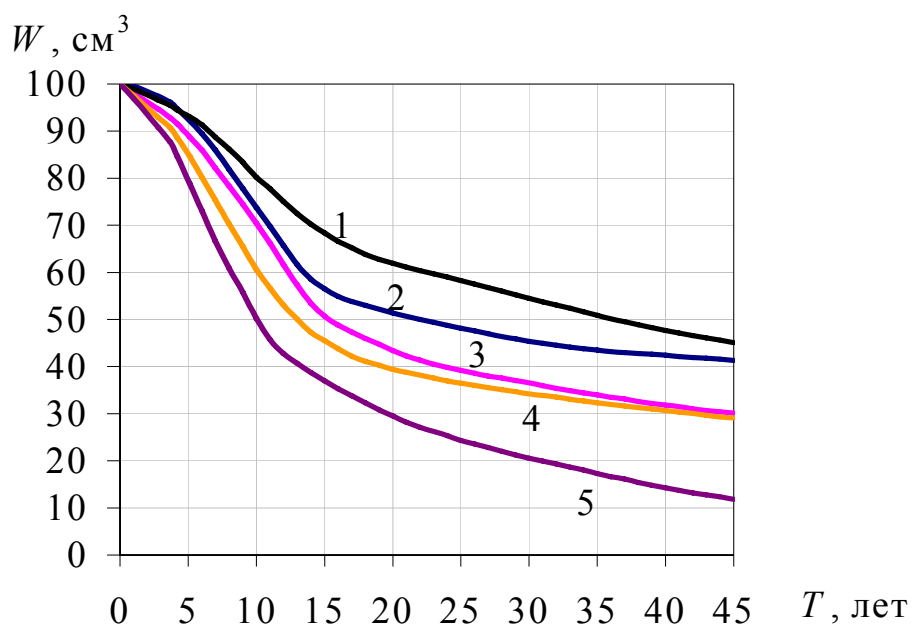


Рис. 3.6. Изменение несущей способности СВП в условиях шахт:
 1 – им. Сташкова; 2 – «Алмазная»; 3 – им. Героев Космоса; 4 – «Благодатная»;
 5 – «Западно-Донбасская»

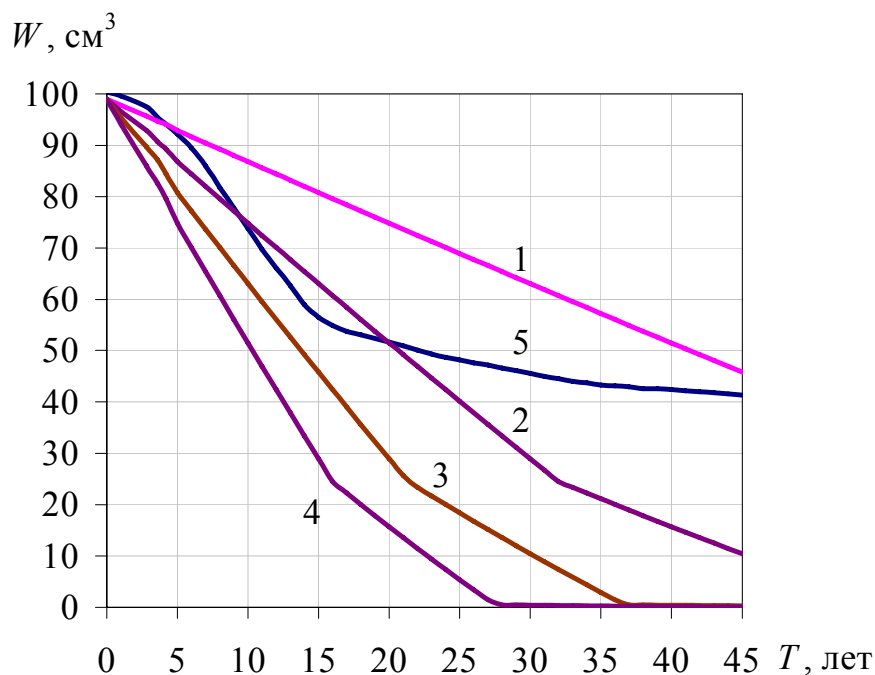


Рис. 3.7. Сравнительный анализ изменения несущей способности СВП от срока эксплуатации крепи при изменении скорости коррозии:
 1 – 0,1 мм/год; 2 – 0,2 мм/год; 3 – 0,3 мм/год; 4 – 0,4 мм/год; 5 – коррозия металла в шахтных условиях

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в начальный период использования профилей условия эксплуатации оказывают

большее влияние на процесс коррозии, чем минерализация вод, а затем степень их воздействия снижается (см. рис. 3.6).

При наложении двух графиков (рис. 3.4 и 3.5), наряду с изменением значения W_x профиля в течение срока эксплуатации крепи, можно наблюдать динамику изменения скорости коррозии самой крепи (см. рис. 3.7). Здесь мы видим графическую интерпретацию зависимости: $W = f(T, K)$.

3.2. Результаты аналитических исследований изменения несущей способности профилей крепи в зависимости от их коррозионного износа

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

Несущая способность профиля крепи находится в функциональной зависимости от его коррозионного износа. Скорость коррозии определяется условиями эксплуатации, не являясь при этом величиной, постоянной во времени.

При скорости коррозии 0,1 мм/год изменение момента сопротивления W с учетом фактора времени носит линейную зависимость. С увеличением скорости коррозии от 0,1 до 0,2 мм/год несущая способность профиля крепи снижается более чем в 2 раза на протяжении срока его службы.

Данные на рис. 3.7 позволяют утверждать, что при сроке использования металлической крепи продолжительностью 20...25 лет в зависимости от условий эксплуатации (при постоянной скорости коррозии в течение всего срока) металлическая крепь теряет несущую способность соответственно: на 25...30 %, если $K = 0,1$ мм/год; 48...60 %, если $K = 0,2$ мм/год; 70...82 %, если $K = 0,3$ мм/год и достигает 85...95 %, если $K = 0,4$ мм/год. Выходит, что в реальных условиях эксплуатации крепи (например, на шахтах «ДТЭК Добропольеуголь») с изменяющейся скоростью коррозии в течение всего срока ее службы несущая способность СВП через 20...25 лет снизится на 47...53 %.

Скорость коррозии в производственных условиях на упомянутых шахтах изменяется от 0,05...0,065 мм/год в течение первых трех лет и достигает 0,25 мм/год к 15 годам эксплуатации крепи, а затем на протяжении последующих 30 лет снижается до значения: $K = 0,12$ мм/год. Увеличение скорости коррозии в течение первых 10...15 лет вызывает резкое снижение несущей способности профиля крепи, что продиктовано изменениями, вызванными влиянием условий эксплуатации (аэрация, водоприток, содержание солей в шахтных водах). Следовательно, обеспечение надежной защиты металлической крепи в первые 10...15 лет предотвратит резкое падение несущей способности СВП крепи.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Получена аналитическая зависимость изменения несущей способности профилей крепи от коэффициента коррозионного износа k , а также от срока эксплуатации крепи T (при постоянной скорости коррозии K), что позволит определять несущую способность ее профиля, по любому из известных перечисленных факторов.

2. На основании аналитических вычислений и при использовании эмпирических данных, получена математическая модель изменения несущей способности СВП в течение срока эксплуатации крепи в условиях шахт с различной минерализацией вод.

Глава 4

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ ОТ КОРРОЗИИ

4.1. Общие положения

На фоне значительного потребления металла на шахтах Украины [69] решение проблемы повышения устойчивости выработок только за счет увеличения металлоемкости крепления не является рациональным. В связи с этим возникает необходимость поиска и разработки дополнительных эффективных технологических средств, использование которых совместно с изложенной в п. 3.3 методикой позволило бы предложить более приемлемые с точки зрения затрат технические решения. Как видно из литературных источников [86, 88...91 и др.], положительное влияние торкрет-бетона на работу крепи исследовано довольно глубоко. Это касается также особенностей совместной работы ограждающей крепи и цементно-песчаного раствора, определения параметров крепи, разработки средств механизации для нанесения торкрет-бетона, эффективных составов растворов и т. п.

В результате проведенных автором исследований определены рациональные параметры экспериментальных составов смесей на основе торкрет-бетона с использованием золы уноса в качестве замены части цемента. Применение этих смесей имеет целью сохранение в течение длительного срока эксплуатации несущей способности металлической крепи капитальных выработок, сооружаемых в условиях влияния агрессивных шахтных вод.

Для приготовления торкрет-бетона традиционно используется цемент, который в настоящее время чрезвычайно дорог и дефицитен. В строительной практике последних лет наблюдается тенденция использования золы уноса и золошлаковых отходов тепловых электростанций для производства сборного железобетона, бетона и строительных растворов.

Например, уже в 1988 г. выход золы и шлака на ТЭС всех стран планеты составил более 0,5 млрд т. При этом сейчас в мире используется до 18 % общего выхода золы, поэтому решение проблемы комплексного применения этих отходов приобретает все большую актуальность. Основным достоинством золы уноса является ее положительное влияние на свойства вяжущих.

Исследованиями НИИГ им. Б.Е. Веденеева (Москва), Атомтеплоэлектропроекта (Москва), НИИОМШС и других научных организаций решены вопросы разработки основных требований к золе уноса как вторсырью. Это существенно расширило научные изыскания на пути комплексного использования золы ТЭС в различных отраслях строительства. Этот материал в основном состоит из свободных и связанных в химические соединения оксидов кремния и алюминия, представляя собой кремнеземно-глиноземистый продукт с повышенным содержанием стекловидной фазы и малым количеством кристаллических элементов. По минералогическому составу зола уноса – это стекловидные алюмосиликаты с небольшим количеством железа, натрия, калия, кальция, магния, титана. Гидравлическая активность материала во многом связана с его

пуццоланической активностью, что обеспечивается присутствием в стекле алюмосиликатов, в частности, метакаолинита и геленита.

Использование этих отходов ТЭС предусмотрено нормативными документами как в тяжелых, так и в легких бетонах.

Отечественный и зарубежный опыт применения золы уноса [84, 85] рекомендует заменять этим материалом часть цемента (до 30 % от общей массы смешанного вяжущего) при этом низкокальциевая каменноугольная зола (СаО составляет до 10 % от ее массы) наиболее подходит для этих целей. Введение золы уноса улучшает удобоукладываемость смеси, повышает водонепроницаемость, морозостойкость, коррозионную стойкость бетона. Применение золы ТЭС для производства легких марок бетона в качестве мелкого заполнителя (взамен керамзитового песка) сокращает расход керамзитового гравия до 13...20 %, а цемента – до 10...15 %. Экономический эффект от реализации подобных мероприятий составляет 28,3...51,7 грн на 1 м³ керамзитобетона в пересчете на цены 2011 года.

Использование этого дешевого местного материала в строительстве предприятий угольной промышленности не нашло такого широкого применения, как в других отраслях, хотя специфические условия получения смешанного вяжущего позволяют заменять значительную часть цемента.

Технологи НИИОМШС разработали составы забутовочных материалов на основе смешанного вяжущего, в котором до 80 % цемента заменено летучей золой, образующейся при сгорании угля на ТЭС и ГРЭС Донбасса.

Программой ресурсосбережения при строительстве предприятий угольной промышленности намечено существенное расширение объемов использования золы уноса, в результате чего экономия цемента составит не менее 15 %. В связи с этим многие предприятия стройиндустрии, например, комбинат «Ростовшахтострой» на заводе стройматериалов КСМ-1 (г. Гуково) применяет золу уноса Новочеркасской ГРЭС в строительном производстве Зверевского ДСК; комбинат «Донецкшахтострой» – на Горловском ЖБШК и Торезском ЖБШК треста «Донецкшахтостройиндустрия», а также на заводах «Стройдеталь» трестов «Красноармейкшахтострой», «Донецкшахтострой», «Артемшахтострой», «Донецкмашстрой» в основном используют золу уноса Кураховской ГРЭС.

Задача исследований в данном направлении сводилась к тому, чтобы для защиты металлокрепей от коррозии разработать эффективные растворы на основе местных материалов. Необходимость выполнения этих исследований продиктована не только дефицитностью и дороговизной основных строительных материалов, используемых в приготовлении растворов, но и хорошими антикоррозионными свойствами материалов, которые являются отходами коксохимических производств, ГРЭС. Одно из основных требований, предъявляемых к облегченным шахтным конструкциям, – достижение необходимой проектной прочности. Физико-механические свойства отходов теплоэлектростанций в виде золы уноса позволяют получить для использования в шахтных условиях бетоны достаточно высокой прочности, которые имеют значительную коррозионную устойчивость. В связи с этим, чтобы обеспечить высокие физико-механические показатели различных марок бетона необходимо подобрать соот-

ветствующие эффективные составы бетонных смесей на основе зольных заполнителей.

Очень важным материалом в таких составах является песок. Это весьма распространенный материал, но чтобы его эффективно использовать в бетонных конструкциях, нужно знать многие параметры данного заполнителя, в частности, гранулометрический состав, показатели крупности, степень и характер загрязнения.

В рассматриваемом регионе имеются следующие источники песка как заполнителя для приготовления бетонных смесей: Краснолиманский, Просяновский карьеры, Краснополянский, Криворожский пески, местный песок шахты «Алмазная».

Учитывая разную стоимость этих материалов, при их выборе принимают во внимание не только влияние свойств на прочность бетона, но и экономическую целесообразность применения.

Большое значение в разработке эффективных составов торкрет-бетонных смесей является применение отходов энергетической промышленности, а именно, использование золы и шлаков тепловых электростанций.

Золошлаковые отходы представляют собой минеральные остатки от сжигания твердого топлива в топках котлоагрегатов теплоэлектростанций. В процессе горения топлива его неорганические составляющие видоизменяются, вследствие чего образуются зола и шлаки.

Зольность топлива зависит от содержания в нем минеральных составляющих и обычно при сжигании энергетических углей колеблется в пределах 5...35 %.

На современных тепловых электростанциях уголь сжигается в измельченном пылевидном состоянии. В связи с кратковременностью пребывания топливных частиц в зоне высоких температур процессы сгорания углеродистых составляющих не успевают полностью завершиться, поэтому в золе остается часть не успевших полностью сгореть углеродистых частиц. Содержание их характеризуется потерями массы при прокаливании. В процессе сжигания донецких каменных углей эти потери незначительны и составляют 2...5 %.

Несмотря на кратковременность пребывания частиц топлива в зоне горения, минеральная его часть под действием высокой температуры претерпевает глубокие изменения, неорганические частицы оплавляются с поверхности или полностью переходят в расплав.

На тепловых электростанциях применяют комбинированные системы удаления отходов, наибольшее распространение получил гидравлический способ, используются также пневматические системы.

Зола уноса – минеральная часть продукта сгорания твердого топлива в пылевидном состоянии, улавливаемая системой очистки (циклоны, электрофильтры), она состоит, в основном, из частиц размером от нескольких миллиметров до 0,14 мм.

Неравномерное осаждение различных частиц в отвалах обуславливает наличие несгоревших угольных кусков, значительную неоднородность находящейся в них золы, влияет на ее зерновой состав, насыпную плотность. Вот по-

чему эффективное применение этого сырья во многом зависит от объективных результатов лабораторных исследований.

Зачастую в Донецком регионе используют зольное сырье, которое является отходами после сжигания топлива на Кураховской ГРЭС.

Хотя, как следует из вышесказанного, здесь имеется достаточное количество других источников местных материалов. Предпочтения в их выборе зависят от всесторонней оценки свойств этих источников, определяющих возможность и эффективность применения сырья.

Например, для приготовления растворных смесей подходит песок, который в значительном объеме производится на Просняновском каолиновом комбинате (песок ПКК) (см. табл. П 1 в приложении 1). В этом песке не обнаружено пород и минералов, наличие которых ограничивается стандартами и техническими условиями (ГОСТ 8736-93 "Песок для строительных работ. Технические условия". ГОСТ 8735-88 "Песок для строительных работ. Методы испытания").

Физические показатели этого песка позволяют отнести его к хорошим материалам для растворных смесей.

Сходный гранулометрический состав имеют пески Краснолиманского и Краснополянского карьеров (табл. П 2 и П 3 соответственно).

Более разнообразный состав имеет криворожский песок (табл. П 4).

Рассматривалась также возможность использования песка шахты «Алмазная» (табл. П 5).

Анализ данных, представленных в табл. П 1 – П 5, позволяет сделать вывод, что по гранулометрическому составу и стоимости сырья при подборе составов для строительных смесей, используемых в торкрет-бетонных работах, необходимо применять пески Просняновского каолинового комбината и Краснолиманского карьера.

При этом важным источником сырьевых ресурсов является использование зольных отходов, образующихся на Кураховской и Углегорской ГРЭС. Рассмотрим более подробно физические и химические особенности этого материала. Одним из основных качеств золы уноса является ее активность. Способность к самостоятельному твердению проявляют материалы, содержащие повышенное количество окиси кальция. Эта способность также зависит от минералогического и фазового состава золы. Чем больше содержание в ней способных к гидратации силикатов, алюминатов и ферритов кальция, тем выше прочность изготовленных из нее образцов. Причем, с повышением тонкости помола золы прочность образцов увеличивается.

В процессе использования золы для изготовления строительных растворов и бетонов неминуемо возникает вопрос о допустимом содержании в ней негоревших частиц. Исследованиями [93] установлено, что при сжигании топлива в пылеугольных топках негоревшие частицы, содержащиеся в золе уноса, по своей структуре уже не представляют собой уголь в первоначальном виде, это новый продукт – коксовые остатки, обладающие довольно высокой механической прочностью. Они не содержат вредные для цементного камня примеси, имеют хорошее с ним сцепление, не подвергаются никаким изменениям под

действием кислорода, влаги и щелочей. Поэтому растворы и бетоны с золой отличаются повышенной атмосферостойкостью, коррозионной стойкостью против сильноминерализованных шахтных вод, а также морозостойкостью. Следовательно, вывод о допустимости повышенного содержания несгоревших частиц в золе является достаточно аргументированным. Химический состав зольных отходов зависит от минерального состава топлива, а для углей, добытых в различных регионах, он колеблется в больших пределах. В табл. 4.1 показан химический состав золы, полученной от сжигания донецкого каменного угля, в частности, на Кураховской и Углегорской ГРЭС. Для сравнения приведен также химический состав золы от сжигания донецких антрацитов, а также углей Львовско-Волынского угольного бассейна.

Таблица 4.1

Химический состав золошлаковых отходов от сжигания углей Украины

Название бассейна	Вид и марки топлива	Химический состав, %								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MqO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O
Донецкий	Антрацит	41–52	13–22	5–9	2–3	1–2	0,2–0,5	2–4	0,2–2,7	12–28
	Каменный уголь	46–58	21–27	12–19	3–5	1–3	0,5	2–3,5	0,5–1,5	2–5
Львовско-Волынский	Каменный уголь	41–48	21–26	15–22	3–5	2–3,5	–	2,3–2,7	0,8–1,3	3–11

Требования к золошлаковым материалам как к сырью для производства строительных растворов и бетона, должны исходить из обеспечения высокого качества конструкций, изготавливаемых на их основе. Вместе с тем эти требования должны соответствовать условиям максимальной утилизации зольных отходов как текущих, так и уже накопленных в отвалах электростанций.

На сегодня уже разработаны нормативные документы [92, 93] по использованию зольного сырья. Золошлаковые отходы в этих документах рассматриваются как компонент смешанного золоцементного вяжущего, от свойств которого непосредственно зависит качество изготавливаемого бетона, а значит сооружений из него конструкций. Основная идея состоит в том, что практически все виды зольных отходов могут быть использованы как строительные материалы, но для каждого из них необходимо установить наиболее рациональное направление утилизации.

Зольная смесь является продуктом механического перемешивания золы уноса и мелких частиц шлака, улавливаемых системами очистки электростанции.

В табл. П 6 представлен гранулометрический состав золошлаковой смеси, приготовленной из отходов, полученных на Углегорской ГРЭС.

Зольная смесь из отходов, полученных на Кураховской ГРЭС, включает в основном мелкие фракции размером 1,25 мм и ниже (зола уноса).

Отходы этих тепловых электростанций могут быть хорошим сырьем для торкрет-растворов. Хотя возникает необходимость в проведении лабораторных испытаний для определения физико-механических и антикоррозионных свойств бетонов, приготовленных на основе данных отходов. При этом очень важным моментом является оценка химического состава шахтных вод и их влияние на металлическую крепь, защищенную торкрет-бетонной оболочкой в процессе эксплуатации подземных выработок.

В частности, был выполнен химический анализ подземных вод шахт «Алмазная» и «Добропольская» на различных уровнях ее очистки. В табл. 4.2 приведены для сравнительного анализа требования ГОСТа к воде технологического назначения и результаты химического анализа промышленной (котельной) воды, имеющейся на этих шахтах. Шахтные воды на любом уровне очистки имеют довольно высокое содержание ионов SO_4^{--} и Mg^{++} , значительно превышающее требуемое по ГОСТ 23732-79. Следовательно, цементный камень в подземных условиях может подвергаться воздействию шахтной воды с высоким содержанием сульфатов, т. е. может разрушаться в результате сульфатной агрессии.

Таблица 4.2

Химический состав шахтных и промышленных вод

Вид воды	Содержимое примесей и ионов эВ, мг/л			
	Растворимые соли	Ионы SO_4^{--}	Ионы Mg^{++}	Взвешенные частицы
Вода для затворения смесей по ГОСТ 23732-79	2000	600	350	20
Промышленная (котельная) вода	1513	225,5	148,8	0
Шахта «Алмазная»				
До поступления в пруд-отстойник	2803	922	552	126
После поступления в пруд	2596	1241	601	30
Шахта «Добропольская»				
До поступления в отстойник	2976	937	545	215
После поступления в отстойник	2788	934	489	63
После поступления в пруд	2604	928	398	17,6

Поэтому для затворения бетонных смесей необходимо применять промышленную (котельную) воду, которая по сравнению с требуемой ГОСТом от-

личается более низкой сульфатной агрессией. При этом возникает необходимость изучить в лабораторных условиях влияние шахтных сульфатных вод на прочность твердеющего торкрет-бетонного камня.

4.2. Предупреждение возможности возникновения коррозии металлической крепи под слоем торкрет-бетона

В условиях контакта крепи с почвой, а также при воздействии шахтной атмосферы коррозия металла имеет электрохимическую природу. Как отмечают многие авторы [37, 38, 84], для коррозии стали в бетоне характерна кислородная деполяризация, т. е. происходит восстановление кислорода на катоде с образованием иона гидроксида. Это подтверждается в большинстве случаев четким разделением катодных и анодных участков, о чем свидетельствует неравномерная коррозия металлической крепи и наличие местных коррозионных повреждений. Наиболее интенсивно защищенная бетоном крепь корродирует при относительной влажности воздуха 65...80 %. При более низкой и более высокой относительной влажности коррозия резко уменьшается, причем в первом случае вследствие малого содержания влаги, а во втором в связи с заполнением пор бетона влагой, затрудняющей доступ кислорода к металлу крепи.

Коррозия металлической крепи под защитным слоем бетона возможна в тех случаях, когда этот слой теряет свои защитные свойства по каким-либо причинам, например, в результате карбонизации извести цементного камня [103].

Процесс коррозии металлической крепи может быть инициирован наличием фильтрации воды в защитном слое торкрет-бетонного покрытия.

Вследствие любого коррозионного процесса на поверхности металлической крепи образуется ржавчина, которая, увеличиваясь в объеме примерно в 3 раза по отношению к объему проржавевшего металла, формирует избыточные внутренние напряжения в структуре бетона, вызывает образование трещин, разрушает защитный слой из бетона и саму металлическую конструкцию. После нарушения целостности защитного слоя коррозия металла протекает более интенсивно.

Вода, содержащая химические реагенты в количестве, превышающем допуски ГОСТ 23732-79, а также пресная вода-фильтр, проникающая через бетон, может вызывать один из видов его коррозии, а именно:

- растворение составляющих цементного камня, в первую очередь гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в результате фильтрующего действия пресной воды;
- реакцию обмена солей, содержащихся в минерализованной воде, с гидратными составляющими цементного камня и вынос продуктов этой реакции водой;
- появление труднорастворимых кристаллических новообразований вследствие химического взаимодействия солей, содержащихся в минерализованной воде, с гидратными составляющими цементного камня.
- деструктивные процессы в бетоне, вызванные увеличением объема:

– кристаллических новообразований, которые вначале откладываются в капиллярах и порах затвердевшего цемента, уплотняя его, а при дальнейшем их наполнении водой вызывают появление внутренних напряжений, что приводит к образованию трещин и резкому снижению защитных свойств бетонного покрытия;

– коррозионных новообразований на металле крепи, которые, возникая на границе контакта металла с бетоном, при дальнейшем росте способствуют появлению внутренних напряжений и, как следствие, образованию трещин в защитном покрытии и ускорению коррозионных процессов.

Для уменьшения или устранения процесса разрушения бетона, помимо выбора соответствующего цемента и заполнителя, необходимо: полностью или частично связать в бетоне свободный Ca(OH)_2 в нерастворимые или плохо растворимые водой соединения; максимально увеличить плотность и водонепроницаемость бетона и раствора; ввести добавки, уменьшающие объём пор и, следовательно, деформации расширения, гидрофобизацию этих материалов.

Для связывания свободного Ca(OH)_2 в бетонные или растворные смеси вводят добавки, содержащие активный, аморфный кремнезём. Эффективной добавкой в таком случае является жидкое стекло. Прочность при сжатии и электрическая прочность бетона, изготовленного на жидком стекле, выше, чем бетона с другими щелочными компонентами. Согласно данным, приведенным в работе [104], максимальная электрическая прочность и прочность при сжатии бетона на силикате натрия составляют 2400 кВт/м и 112 МПа соответственно, в то время как максимальные значения указанных характеристик для бетона, изготовленного на других щелочных компонентах, составляют соответственно 1980 кВт/м и 81 МПа. Средняя плотность бетона в образцах, изготовленных на силикате натрия также выше, чем в остальных.

Коррозия стальной арматуры в бетоне на шлакощелочном вяжущем идет медленнее, чем в бетоне на портландцементе, а особенно на шлакопортландцементе. Это объясняется наличием в этих материалах насыщенной щелочной среды [103]. Использование золы уноса взамен части вяжущего обеспечивает большую плотность смеси, а также водонепроницаемость, что в итоге улучшит антикоррозионные свойства торкрет-бетонного покрытия.

4.3. Подбор составов смесей для торкрет-бетонных покрытий

Приготовление торкрет-бетонной смеси производится из тех же материалов, что и обычного бетона, это вяжущее (цемент), заполнитель и вода. Однако требования к материалам для этого вида бетона как защитного покрытия для металлической крепи несколько отличаются от требований, предъявляемых к материалам для изготовления обычного бетона.

Для торкрет-бетонной смеси в качестве вяжущего применяют сульфатостойкий цемент марки 400. Минеральной добавкой служит зола крупностью до 1,25 мм, заполнителем – кварцевый песок средней крупности. Все составные

материалы торкрет-бетона должны отвечать общепринятым требованиям действующих стандартов.

Большое значение также имеет влажность заполнителей. Сухая смесь с использованием заполнителей пониженной влажности плохо перемешивается и смачивается водой в сопле, что приводит к ухудшению качества материала и к сильному запылению места выполнения работ. Повышенная же влажность заполнителей вызывает заторы в трубопроводе при работе машины. Практикой установлено, что оптимальная влажность этих материалов находится в пределах 3...7 %, что соответствует их естественной влажности.

Обеспечение необходимых сроков схватывания торкрет-бетонных смесей осуществляется путем применения специальных быстросхватывающихся и быстротвердеющих сортов цемента, либо введением в сухую смесь или воду специальных добавок-ускорителей. По технологическим признакам такие добавки разделены на жидкие (их добавляют в воду затворения) и сухие (вводят в сухую смесь). К жидким добавкам относятся хлористый кальций, жидкое стекло, алюминат натрия и др. К сухим – добавка оргэнергостроя (ОЭС), фтористый натрий. Отдельные из этих добавок применяются как в сухом, так и в жидком виде, их количество составляет 3...5 % от веса цемента. Применение хлористого кальция в качестве добавки, ввиду его коррозионной активности по отношению к металлу категорически запрещается.

Подбор состава торкрет-бетонных смесей происходит в следующей последовательности:

- назначают расход вяжущего для пробных замесов;
- определяют соотношение для заполнителей;
- выбирают оптимальное водосодержание (В/Ц).

После изготовления серии образцов различного состава определяли коррозионную стойкость покрытия, отмечали нарастание прочности на сжатие, измеряли объемную массу затворенной смеси, величины пластичности и удобоукладываемости, коэффициент выхода бетона.

Основным критерием подбора оптимального состава смесей, изготовленных на зольных заполнителях, было получение в лабораторных условиях необходимых защитных коррозионных свойств с сохранением проектных значений марочной прочности бетона в пределах 10...15 МПа (см. табл. П 7, рис. 4.1). К тому же принимали во внимание возможное увеличение прочности за счет действия эффекта уплотнения при нанесении смеси методом набрызгивания.

В лабораторных исследованиях при подборе состава смесей для торкрет-бетонных покрытий применялись следующие материалы: сульфатостойкий цемент М 400, зола уноса из отходов, образующихся на Кураховской ГРЭС, песок Краснолиманского карьера. Во время лабораторных исследований было испытано 5 составов смесей, каждый с использованием 24 образцов (всего 120). Среднее значение прочности определяли по результатам испытаний 3 образцов.

Поскольку частицы большинства заполнителей имеет большую удельную поверхность, то в целях получения удобоукладываемого торкрет-бетонного раствора требуется повышенный расход воды для затворения сухой смеси. В смесях, приготовленных на зольных заполнителях, недостаток воды столь же

вреден, как и ее избыток, так как легкие заполнители обладают способностью отсасывать воду, что приводит к понижению прочности материала из-за потери подвижности смеси, необходимой для плотной ее укладки. В то же время при выполнении данных операций избыток воды может вызвать расслоение смеси.

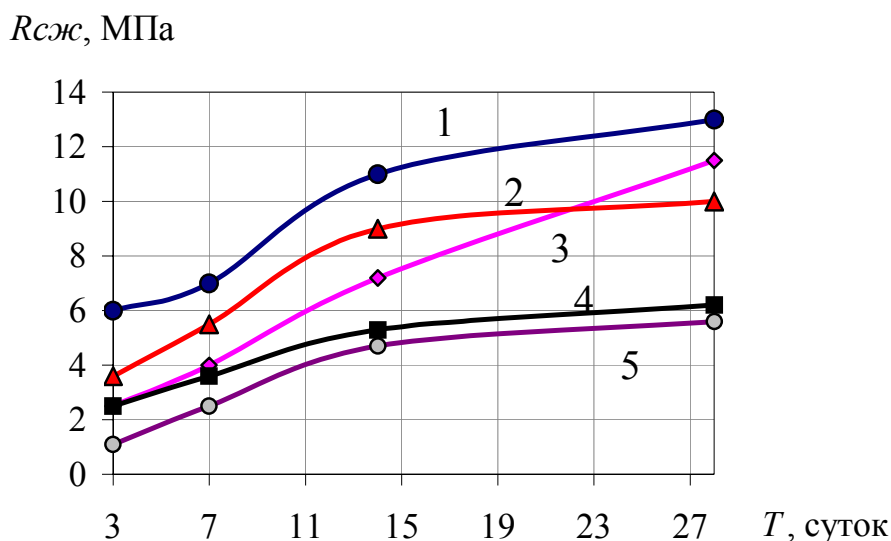


Рис. 4.1. Кривые нарастания прочности торкрет-бетонных смесей с различным содержанием исходных компонентов (цемент + зола уноса):
 1 – (0,9 + 0,1); 2 – (0,8 + 0,2); 3 – (0,7 + 0,3); 4 – (0,6 + 0,4); 5 – (0,5 + 0,5)

В результате проведенных лабораторных испытаний были определены 3 состава, в которых 10, 30 и 50 % цемента заменили золой уноса. Физико-механические параметры именно этих смесей были взяты за основу исследований по определению антикоррозионных свойств покрытий (табл. 4.8, рис. 4.1). Оптимальная величина водоцементного отношения для торкрет-бетонных смесей на зольных заполнителях, находится в пределах 0,55...0,7, при расходе вяжущего на 1 м³ торкрет-бетона 300...350 кг.

Коррозионная стойкость покрытия определялась в процессе проведения ускоренных коррозионных испытаний при изменении массы металлических образцов, с применением различных защитных покрытий до и после испытаний, а также после их удаления.

4.4. Испытания защитных покрытий на основе торкрет-бетона

Для того, чтобы определить защитные свойства различных составов смесей и на основе проведенного анализа рекомендовать наиболее подходящий из них, проводили сравнительные ускоренные коррозионные испытания (УКИ) исследуемых образцов торкрет-бетонных смесей. Для получения надежных данных о процессах, происходящих в металле на его границе с бетоном, выполняя эксперимент, постоянно использовали потенциостатический метод исследования [96, 105].

4.4.1. Сущность потенциостатического метода

Для испытаний использовались образцы стали марки Ст 5 толщиной 3 мм и размерами 100 × 50 мм. Перед проведением эксперимента их обезжиривали виннокислым аммонием 10 % + NH₄OH (при температуре 25...70 °С). Боковые грани стальных пластин покрывали слоем битума марки IV. Образцы помещались в формы, которые затем заполняли исследуемыми смесями. На протяжении трех дней образцы хранились в этих формах при естественной влажности воздуха и температуре 20 °С. Боковые грани бетонных образцов, армированных металлическими пластинами, были изолированы парафином. Рабочие поверхности не изолировали, поэтому они соответствовали длине металлических пластин. Один угол на каждом образце зачищался до металлической поверхности для проведения замеров. Готовые образцы были погружены в стеклянные емкости с 5-процентным раствором Na₂SO₄ (рис. 4.3).

Каждый день в течение месяца выполняли измерения электрического потенциала всех образцов. По изменению величины этого параметра определяли покрытия на водонепроницаемость, т. е. насколько быстро вода проникает через бетонное тело к поверхности металла, а также оценивали способность самого покрытия пассивировать защищаемую металлическую поверхность на начальном этапе развития процессов коррозии.

В качестве контрольного (так называемого электрода сравнения) был использован хлор-серебрянный электрод, с потенциалом + 0,201 В. Замеры производились при помощи потенциостата ПИ-50-1 с высокоомным вольтметром (рис. 4.2).

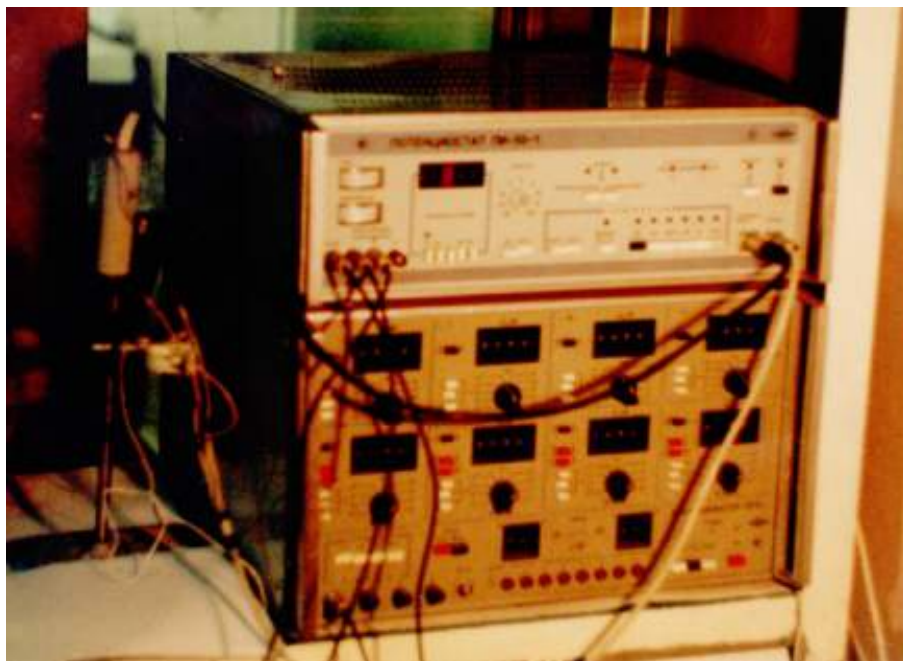


Рис. 4.2. Общий вид потенциостата ПИ-50-1, используемого для измерений при потенциостатическом методе исследования коррозионной стойкости бетонных покрытий

Первоначально определяли разницу потенциалов (т. н. ЭДС): $E = \varphi_K - \varphi_A$, при условии, что $\varphi_{ХС.} = + 0,2$ В. Преобразовав это выражение, получили иско-мое значение потенциала каждого из образцов.

В процессе эксперимента на определение коррозионной стойкости были исследованы защитные покрытия толщиной 10 и 25 мм (рис. 4.4). На основании полученных результатов замеров с использованием потенциостата, были построены зависимости изменения потенциалов торкрет-бетонных покрытий с различным содержанием исходных компонентов (цемента и золы уноса). Замеры выполняли во время ускоренных коррозионных испытаний (рис. 4.5, 4.6).

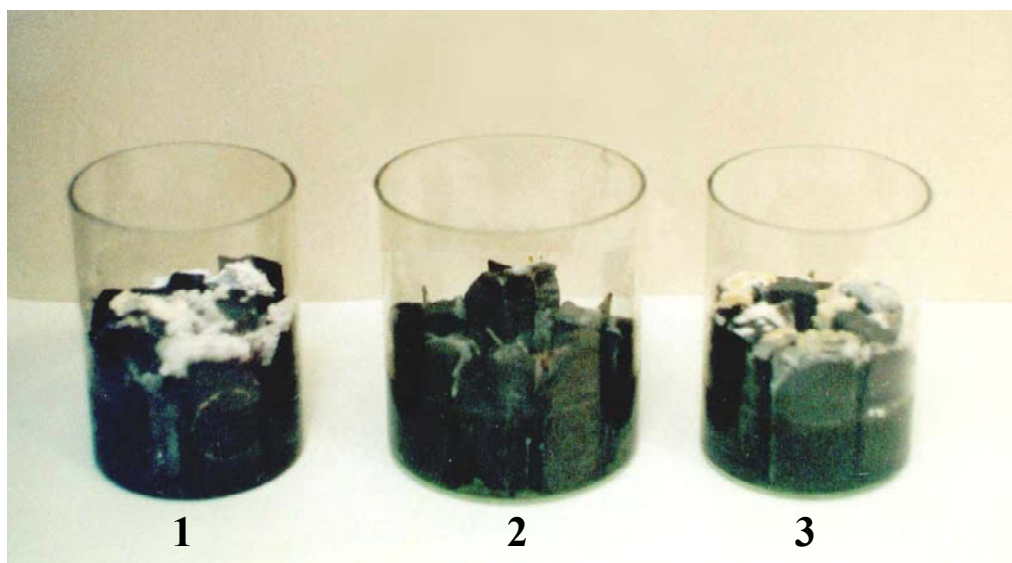


Рис. 4.3. Опытные образцы бетонных покрытий после испытания воздействием 5 % раствора Na_2SO_4 : состав (цемент : зола : песок) 1 – 0,9 : 0,1 : 3; 2 – 0,7 : 0,3 : 3; 3 – 0,5 : 0,5 : 3

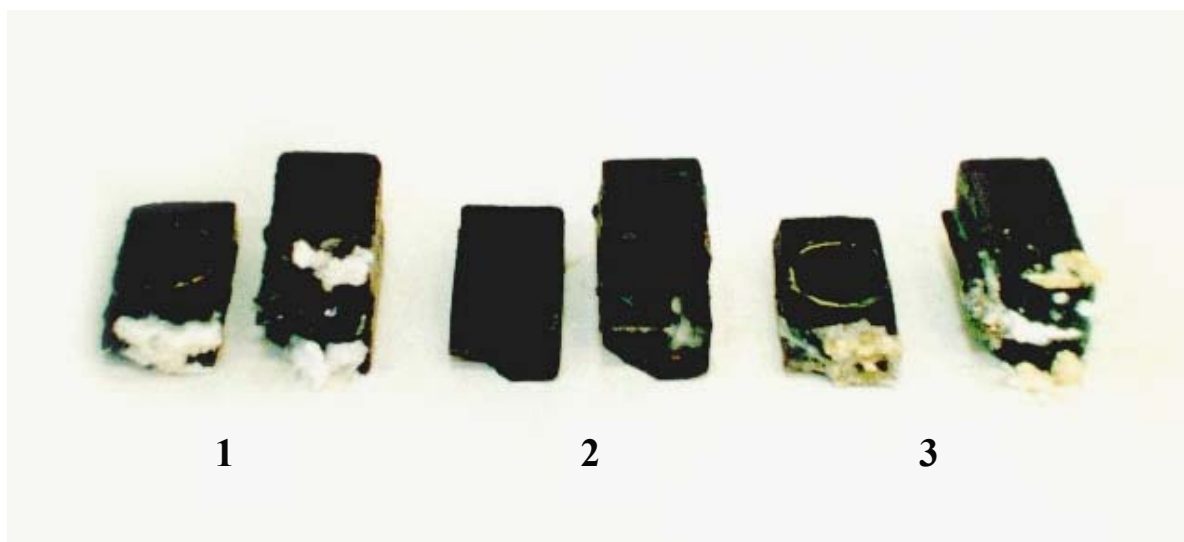


Рис. 4.4. Опытные образцы с толщиной покрытий 10 и 25 мм после проведенных испытаний: состав (цемент : зола : песок) 1 – 0,9 : 0,1 : 3; 2 – 0,7 : 0,3 : 3; 3 – 0,5 : 0,5 : 3

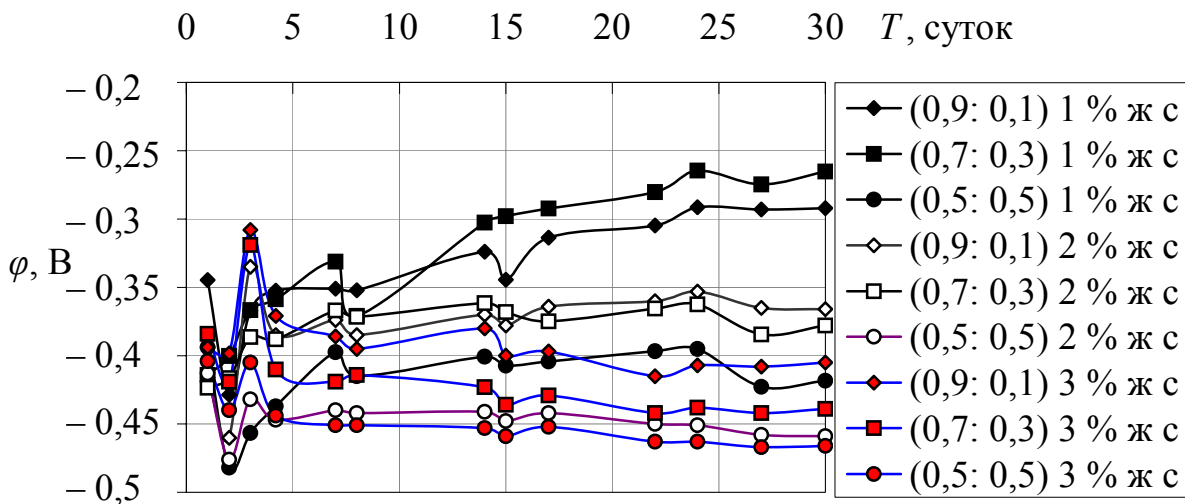


Рис. 4.5. Кривые изменения потенциала экспериментальных покрытий толщиной 10 мм с разным соотношением состава (цемент : зола уноса) и с процентной добавкой жидкого стекла

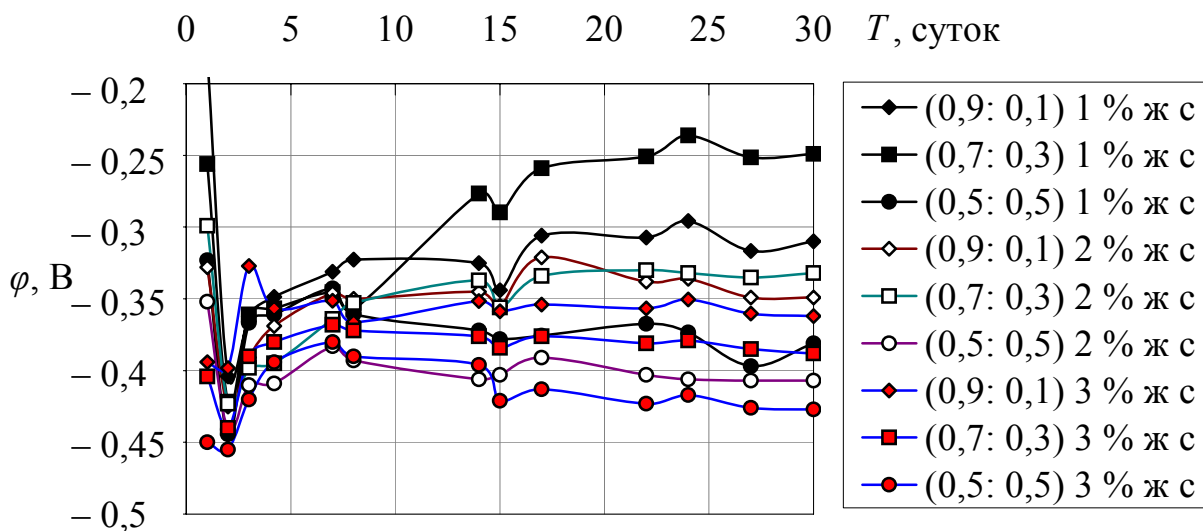


Рис. 4.6. Кривые изменения потенциала экспериментальных покрытий того же состава толщиной 25 мм

4.4.2. Результаты исследования коррозионной стойкости торкрет-бетонных покрытий потенциостатическим методом

Испытания покрытий в агрессивных средах (см. рис. 4.3, 4.4) показали изменение потенциалов на поверхности всех образцов. В течение первых суток на всех графиках наблюдается резкий скачок показаний потенциометра (см.

рис. 4.5, 4.6). Это объясняется пористой структурой бетонного тела, вследствие чего вода относительно быстро достигает поверхности металла и снижает его потенциал. Образование пассивирующей пленки на поверхности металла вызывает повышение потенциала до определенного значения в зависимости от состава исходных компонентов (цемент : зола : песок) и, соответственно, от коррозионной активности торкрет-бетонного покрытия. При толщине покрытия 25 мм в начальный период процессы, происходящие в образцах с разным соотношением золы и цемента, сходны по своей природе (см. рис. 4.6). В этот момент потенциал $\varphi = -0,35$ В. Однако, что касается образцов, покрытых составом в соотношении 0,5 : 0,5 : 3, то значение потенциала ($\varphi = -0,35$ В) на 7-е сутки незначительно снижается, а в течение месяца снижение составляет 7 %, если толщина покрытия $\delta = 25$ мм, и 5 %, если $\delta = 10$ мм. Большинство образцов, покрытых торкрет-бетонной смесью с содержанием 3 % жидкого стекла, несмотря на то, что имеют достаточно хорошие показатели изменения потенциалов, вследствие значительной активности самой добавки подвержены коррозии бетона III вида (сульфатной). Образцы, в составе которых содержится 1 % жидкого стекла, имели самые высокие показатели потенциалов, их диаграммы представлены на рис. 4.7 – 4.9.

Наилучшие результаты испытаний достигнуты при замене 30 % цемента золой. Увеличение потенциала (когда начальная величина $\varphi = -0,35$ В) достигает 30 % при толщине покрытия, равной 25 мм, и 23 % – в случае, когда $\delta = 10$ мм (рис. 4.8). Хорошие результаты были получены при использовании золы уноса взамен 10 % цемента. Увеличение потенциала составляло независимо от толщины 14...15 % (рис. 4.7). Сравнение диаграмм изменения потенциалов образцов с разной толщиной бетонного покрытия позволяет сделать вывод, что защитное действие торкрет-бетонной смеси при замене 10 % цемента проявляется в равной степени, когда $\delta = 10$ мм и $\delta = 25$ мм.

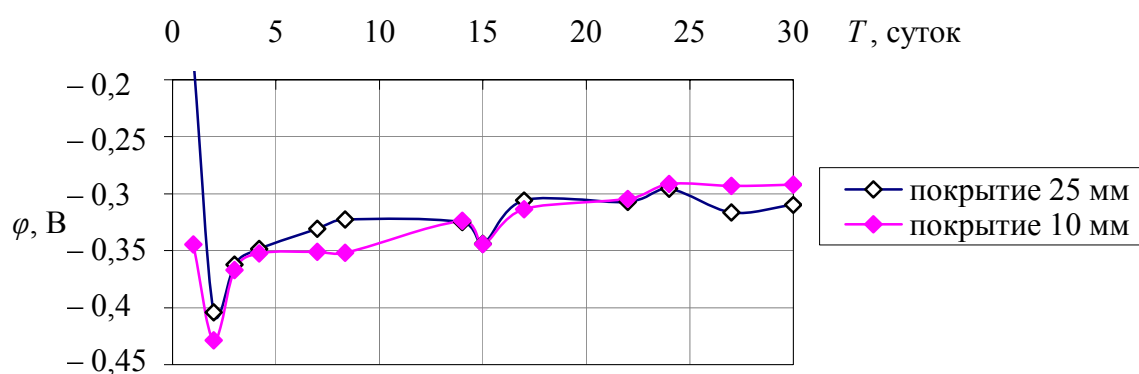


Рис. 4.7. Кривые изменения потенциала образцов (состав цемент : зола : песок – 0,9 : 0,1 : 3) при толщине бетонного покрытия 25 и 10 мм

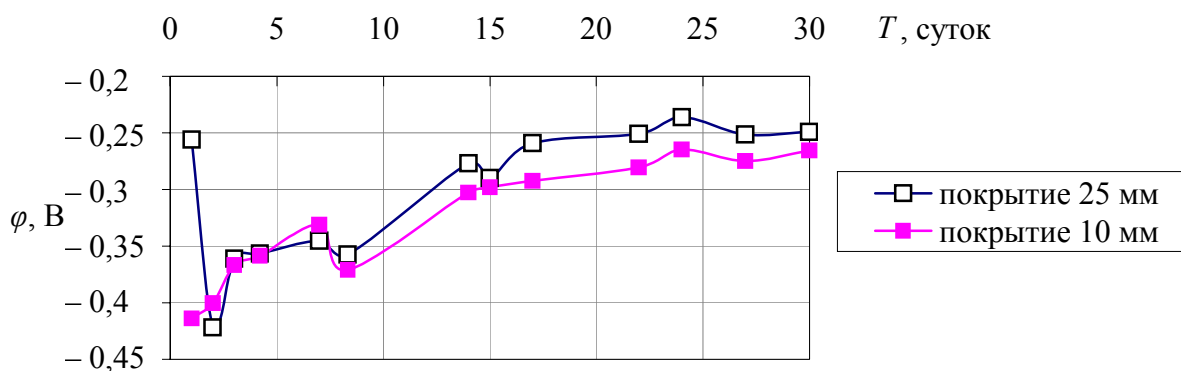


Рис. 4.8. Кривые изменения потенциала образцов (состав цемент : зола : песок – 0,7 : 0,3 : 3) при толщине покрытия 25 и 10 мм

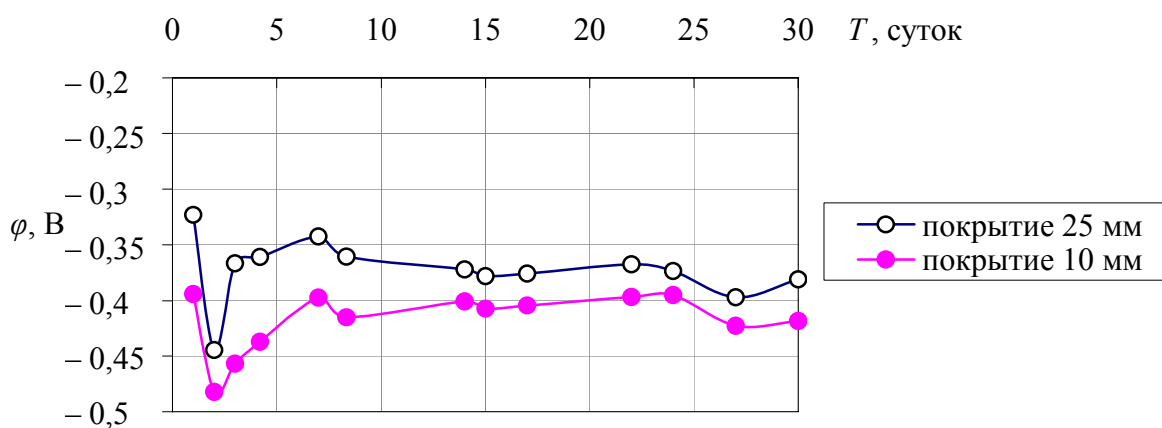


Рис. 4.9. Кривые изменения потенциала образцов (состав цемент : зола : песок – 0,5 : 0,5 : 3) при толщине покрытия 25 и 10 мм

В случае, если использована смесь, в которой 10 % цемента заменено золой, следует применять покрытия, толщина которых $\delta = 10$ мм, причем на участках крепи, испытывающих проектные нагрузки, тогда как области, испытывающие повышенные напряжения, следует защищать покрытиями толщиной 25 мм.

На 15-е сутки испытаний на графике потенциалов, характеризующем образцы с содержанием золы 30 и 10 %, наблюдается скачок (см. рис. 4.6). Очевидно, это происходит вследствие образования на поверхности металла мало-растворимых соединений, из-за чего диффузия кислорода ограничена, а значит, затормаживаются процессы окисления и повышается потенциал.

4.4.3. Метод электрических сопротивлений

Для получения всесторонних данных о защитном действии антикоррозионных покрытий с различным содержанием исходных компонентов необходима

информация о количественных изменениях (коррозионных потерях), происходящих в металлических образцах.

Коррозионные процессы, приводящие обычно к уменьшению площади сечения образцов, а иногда и к более глубоким изменениям в самом материале (межкристаллитная коррозия, образование трещин, расслоение и т. п.), естественно, должны влиять на показатели электрического сопротивления. Поэтому методом измерения этого параметра образцов до возникновения коррозии и после него можно получить ценные результаты, которые будут характеризовать защитные свойства исследуемых покрытий по отношению к металлу крепи в данных условиях. Особенно сильное изменение сопротивления наблюдается при появлении межкристаллитной коррозии.

Для исследования были взяты отрезки проволоки (сталь марки Ст 5) длиной 1 м, свернутые в спираль. К каждому из концов исследуемого образца с целью обеспечения надежного контакта были припаяны по два медных проводника. Таким образом, сопротивление каждого образца измеряли при помощи 4 проводников, благодаря чему была достигнута высокая степень точности. Образцы помещались в металлические формы – кубики 50×50 мм, которые заполнялись экспериментальными растворами – смесями с различным содержанием исходных компонентов (зола и цемента). Затем эти смеси уплотнялись в металлических формах на вибростоле. Готовые образцы кубиков разного состава испытывали на защитные свойства по отношению к материалу крепи (рис. 4.10).

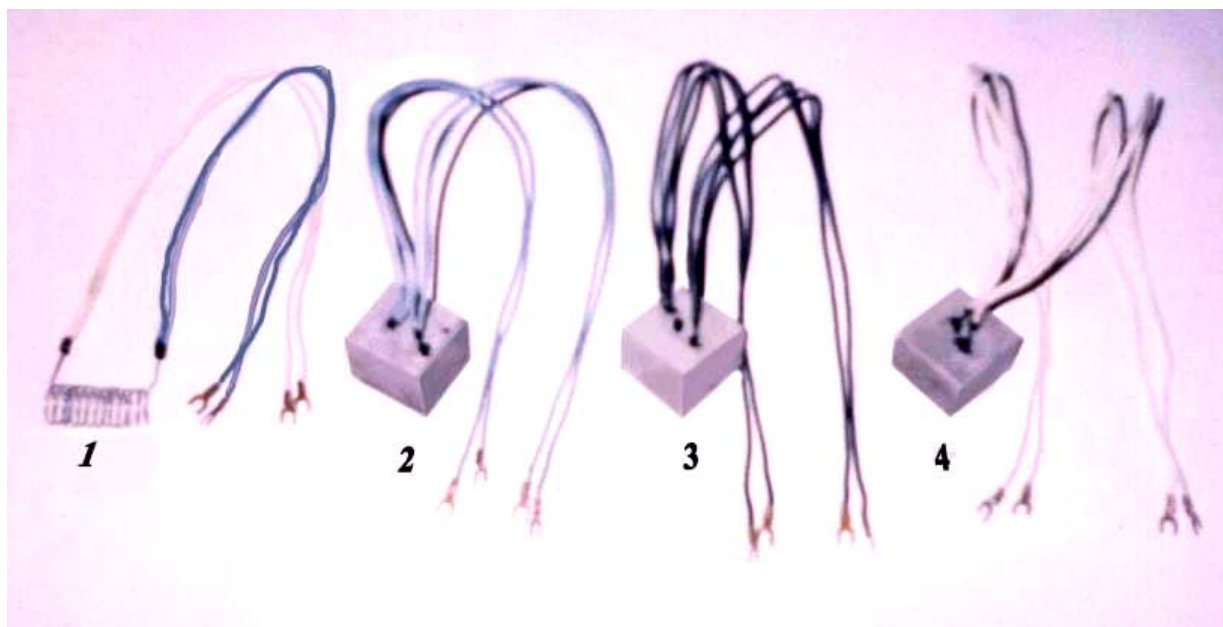


Рис. 4.10. Образцы для коррозионных испытаний: 1 – контрольный образец из стальной проволоки марки Ст 5; 2 – образец с исходными компонентами цемент : зола – 0,9 : 0,1; 3 – образец с исходными компонентами цемент : зола – 0,7 : 0,3; 4 – образец с исходными компонентами цемент : зола – 0,5 : 0,5

Испытание проводится при периодическом смачивании образцов. Кубики погружаются в емкости с соляным раствором на 12 часов, а затем вынимаются из раствора и сушатся в течение того же периода.

Проведенные УКИ создают условия, наиболее приближенные к реальным при эксплуатации металлической крепи в обводненных горных выработках с минерализованными шахтными водами.

Для измерений был использован универсальный измерительный прибор Р 4833 – универсальный мост постоянного тока (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Измерение коррозионного износа металлического оборудования по изменению сопротивления образцов

В ходе испытаний определяли коррозионный износ металлических образцов, учитывая изменение их электрического сопротивления. Класс точности прибора при использовании в качестве моста постоянного тока составил 0,1. Образцы подключали к клеммам моста с помощью специальных контактов, припаянных к концам образцов. Место спая было изолировано. Измеренные величины сопротивлений приводились к условиям, когда температура воздуха составляла 20 °С, по следующей формуле:

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha (t - t_0), \quad (4.1)$$

где R_t – приведенное сопротивление при температуре t ($T = 20$ °С); R_0 – сопротивление, измеренное при температуре t_0 ; α – температурный коэффициент, применительно к стальной проволоке составляет 0,004 [106].

Для исследования степени коррозионной стойкости бетонных покрытий образцы погружались в 0,5н. (3 %) раствор NaCl, его pH = 7.

Если ρ_0 – удельное сопротивление образца; l_0 – длина; D_0 – исходный диаметр; D_1 – конечный диаметр после коррозии, то начальное электрическое сопротивление образца

$$R_0 = \frac{4\rho_0 l_0}{\pi D_0^2} \quad (4.2)$$

Вследствие коррозии изменится диаметр проволоки и сопротивление возрастет до таких значений:

$$R_1 = \frac{4\rho_0 l_0}{\pi D_1^2}; \quad (4.3)$$

$$R_1 - R_0 = \frac{4\rho_0 l_0}{\pi} \left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_0^2} \right). \quad (4.4)$$

Абсолютное и относительное изменение сопротивления определяется следующими уравнениями:

$$\frac{(R_1 - R_0)\pi}{4\rho_0 l_0} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_1^2 D_0^2}; \quad (4.5)$$

$$D_0^2 - D_1^2 = \frac{(R_1 - R_0)\pi D_1^2 D_0^2}{4\rho_0 l_0}; \quad (4.6)$$

$$\frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} = \frac{(R_1 - R_0)\pi D_1^2}{4\rho_0 l_0}; \quad (4.7)$$

Учитывая, что

$$\frac{\pi D_1^2}{4\rho_0 l_0} = \frac{1}{R_1}, \quad (4.8)$$

получаем такое выражение: $1 - \frac{D_1^2}{D_0^2} = \frac{R_1 - R_0}{R_1}.$ (4.9)

Таким образом, измерив сопротивление до и после коррозии, можно определить новый диаметр образца, а стало быть, и глубину проникновения коррозии. Учитывая, что $D_1^2 = (D_0 - \Delta D)^2$, уравнение (4.9) можно преобразовать следующим образом:

$$1 - \frac{(D_0 - \Delta D)^2}{D_0^2} = \frac{R_1 - R_0}{R_1}; \quad (4.10)$$

$$\frac{R_1 - R_0}{R_1} = \frac{2\Delta D}{D_0} - \frac{\Delta D}{D_0^2} \approx \frac{2\Delta D}{D_0}. \quad (4.11)$$

В ходе эксперимента регистрировалось сопротивление металлических образцов в виде функции: $R = f(T)$, с последующим пересчетом их на величину коррозионных потерь K по следующей формуле:

$$K = D_0 \frac{(R_1 - R_0)}{2R_1}, \quad (4.12)$$

где D_0 – начальный диаметр образцов ($D_0 = 1$ мм); K – коррозионные потери, мм.

На основании полученных закономерностей: $K = f(D, R)$, определяем защитные свойства составов исследуемых покрытий. Данные исследования позволяют получить количественную характеристику защитного действия этих материалов. По результатам измерения сопротивлений в образцах (рис. 4.12) удалось получить ценные данные о коррозионном износе металлических образцов, покрытых торкрет-бетонными смесями с различным содержанием исходных компонентов (рис. 4.13, 4.14).

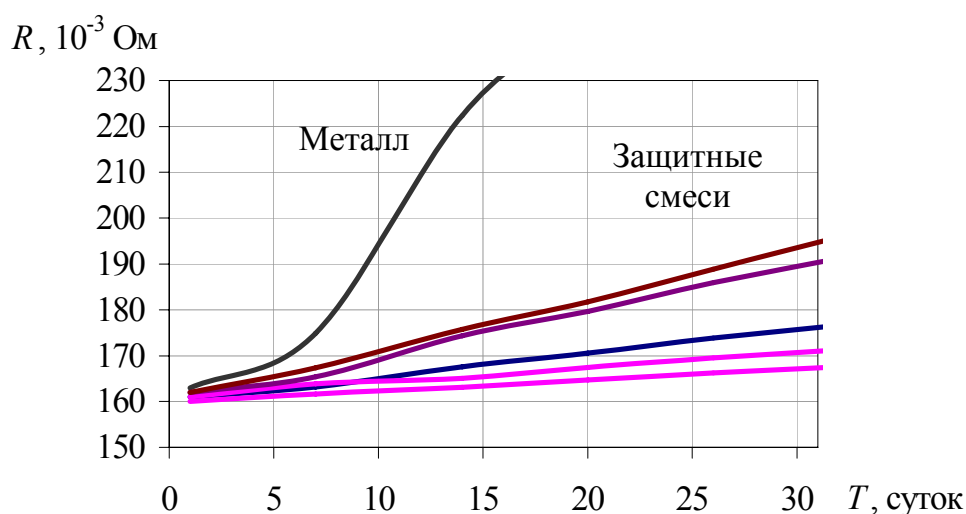


Рис. 4.12. Кривые изменения сопротивления металлических образцов (провода), защищенных покрытиями из экспериментальных смесей

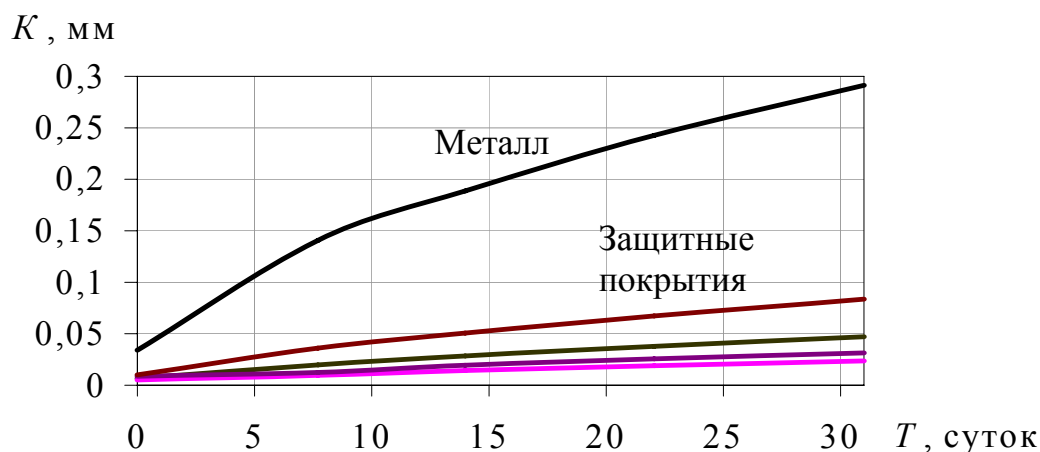


Рис. 4.13. Сравнительная диаграмма зависимости скорости коррозии металла от наличия защитных покрытий

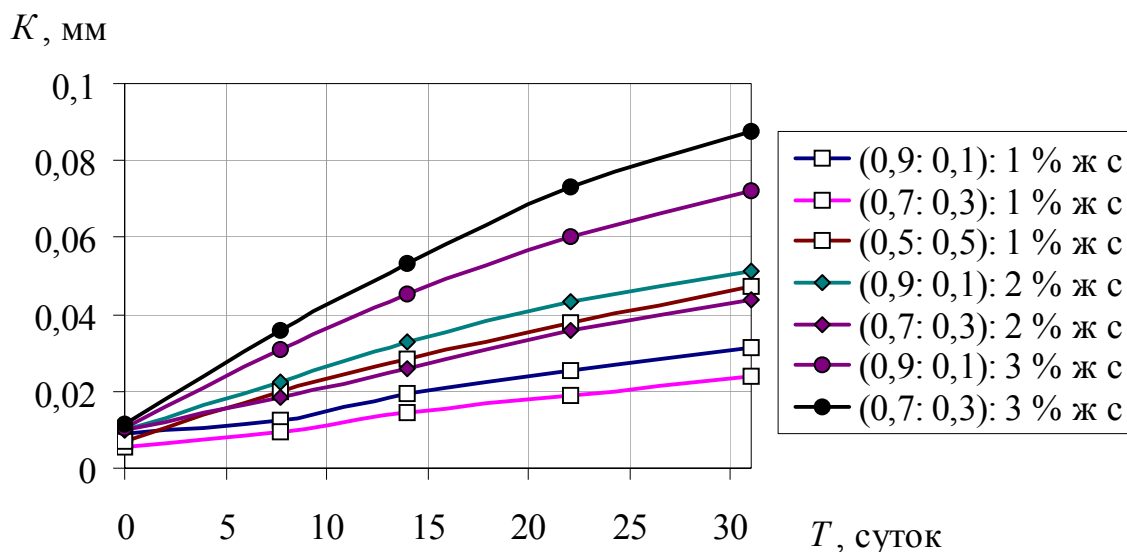


Рис. 4.14. Кривые коррозионного износа металлических образцов, которые покрыты торкрет-бетоном различного состава с добавлением жидкого стекла

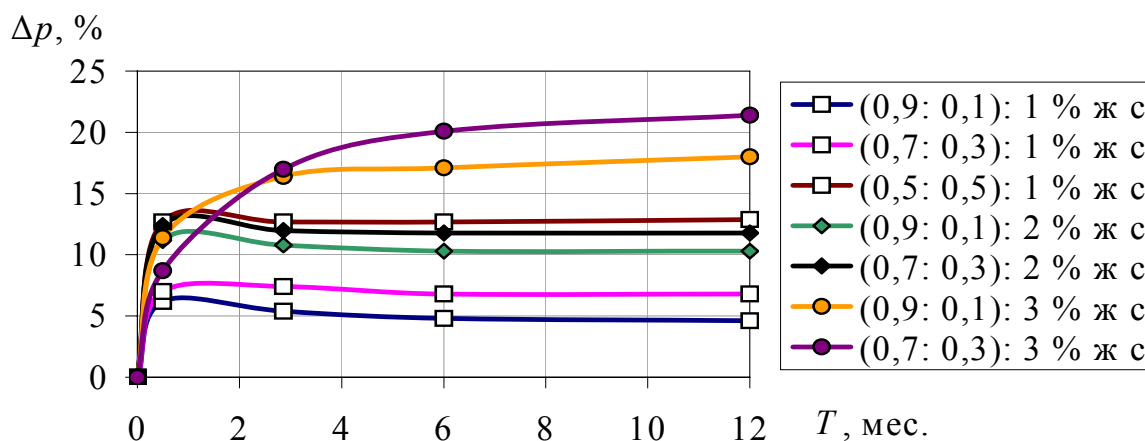


Рис. 4.15. Кривые набухания образцов бетонного покрытия в шахтной воде в зависимости от его состава при соотношении цемент : зола уноса : жидкое стекло

4.4.4. Анализ результатов лабораторных исследований

Лабораторные опыты проводились в описанной ниже последовательности. Перед проведением замеров прибор Р 4833 (универсальный мост постоянного тока) прогревали в течение 30 мин и выполняли калибровку при помощи эталонов омического сопротивления заданной величины. Замер электрического сопротивления в каждом образце продолжался в течение 1 мин, после чего при-

бор выключали на 15 мин. Измерения сопротивления каждого образца выполняли трижды. Дисперсия полученных значений колебалась в пределах 5 %. Данные измерений позволяют сделать некоторые выводы. Исследования защитных свойств покрытий, проведенные с учетом изменений сопротивления в образцах, подтверждают защитное действие на металл используемых в данных покрытиях экспериментальных смесей. Использование золы уноса в качестве минеральной добавки с заменой до 30 % цемента обеспечивает защитному покрытию наилучшие антикоррозионные характеристики. Коррозия металла, защищенного торкрет-бетоном на основе состава цемент : зола уноса (0,7 : 0,3) с добавлением 1 % жидкого стекла, являлась наименьшей и составила 0,018 мм (см. рис. 4.14) в условиях УКИ (ускоренных коррозионных испытаний). Эти испытания моделируют реакцию защитных покрытий в течение длительного периода эксплуатации конструкции. За весь период испытания минимальное изменение массы образцов (набухание до 10 %) наблюдалось также у покрытий на основе состава цемент : зола уноса (0,7 : 0,3) с добавлением 1 % жидкого стекла (см. рис. 4.15). Хорошие коррозионные характеристики покрытия, а также химическая стойкость состава, в котором 30 % цемента заменено золой уноса, объясняются наиболее сбалансированным соотношением компонентов цемента и золы (0,7 : 0,3) при фиксированном количестве песка, в результате чего образуются нерастворимые соединения, и бетонное тело приобретает достаточно высокую водонепроницаемость.

Защитные покрытия, содержащие в составе золу вместо 10 % цемента, также показали хорошие результаты, при этом коррозия металла составила 0,022 мм, а увеличение массы образцов достигало 14 %. Зола уноса является активной минеральной добавкой, поэтому при меньшем содержании золы в составе торкрет-бетона наблюдается снижение активности самого покрытия. Однако среди образцов, в которых золой было заменено 50 % цемента, отмечалось снижение водонепроницаемости, а также коррозионной стойкости по отношению к агрессивным сульфатным водам (рис. 4.14, 4.15). Коррозия металла в образцах на основе состава цемент : зола уноса (0,5 : 0,5) с добавлением 1 % жидкого стекла возрасла почти в 2 раза по сравнению с образцами, покрытыми бетоном, где золой заменено 10 и 30 % цемента.

Образцы, имеющие в своем составе 2 и 3 % жидкого стекла, характеризуются меньшей коррозионной стойкостью бетона, худшими антикоррозионными свойствами по отношению к защищаемому металлу, если их сравнить с другими покрытиями (рис. 4.13), а также низкой водонепроницаемостью (рис. 4.15). На основании проведенного анализа в условиях шахт «ДТЭК Добропольеуголь», где отмечена сульфатная агрессия шахтных вод, а показатель pH = 6,5...7, для защиты металлической крепи от коррозии можно рекомендовать торкрет-бетонные покрытия, в которых использована зола уноса Кураховской ГРЭС. При этом наиболее оптимальными в составе смесей, используемых для этих покрытий, приняты следующие соотношения цемента, золы уноса и песка: (0,7 : 0,3 : 3) и (0,9 : 0,1 : 3) с добавкой 1 % жидкого стекла.

4.4.5. Определение коррозии металла под защитным покрытием торкрет-бетона различной толщины в условиях воздействия минерализованных вод

Металлические образцы (Ст 5) размером $50 \times 100 \times 3$ мм, покрытые слоем из торкрет-бетона (соотношение цемента и золы уноса равно 0,7 : 0,3) толщиной 10, 25 и 50 мм в течение месяца подвергались воздействию минерализованной воды (раствор 0,1; 1; 3 % NaCl) в ходе проведения ускоренных коррозионных испытаний в аэродинамической трубе, где скорость движения воздушной струи составляла 8 м/с, относительная влажность 70 %, температура воздуха 25 °С. Основную часть времени образцы находились в сосудах с растворами указанных ранее концентраций. Утром их подвешивали на штатив аэродинамической трубы и в течение 5 часов они находились в зоне влияния воздушного потока, затем их погружали на 20 минут в сосуды с растворами, после чего продолжали испытания в аэродинамической трубе на протяжении последующих 5 часов. В конце каждого дня, по окончании испытаний в трубе, образцы снова погружали в сосуды с растворами. Методика подготовительных работ соответствовала изложенной в п. 4.4.1, УКИ проводились в течение 30 суток. По истечении этого срока с металлических образцов были удалены защитные покрытия, а затем выполнены замеры коррозионного износа металла при помощи аналитических весов. Перед измерениями была выполнена химическая зачистка металлических образцов от ржавчины с использованием 10 % H_2SO_4 (99 об. %), СНОН (1 об. %) при температуре 18...25 °С.

На основании результатов проведенного исследования построены зависимости коррозии металлических образцов от толщины защитных покрытий при различной минерализации воды (рис. 4.16).

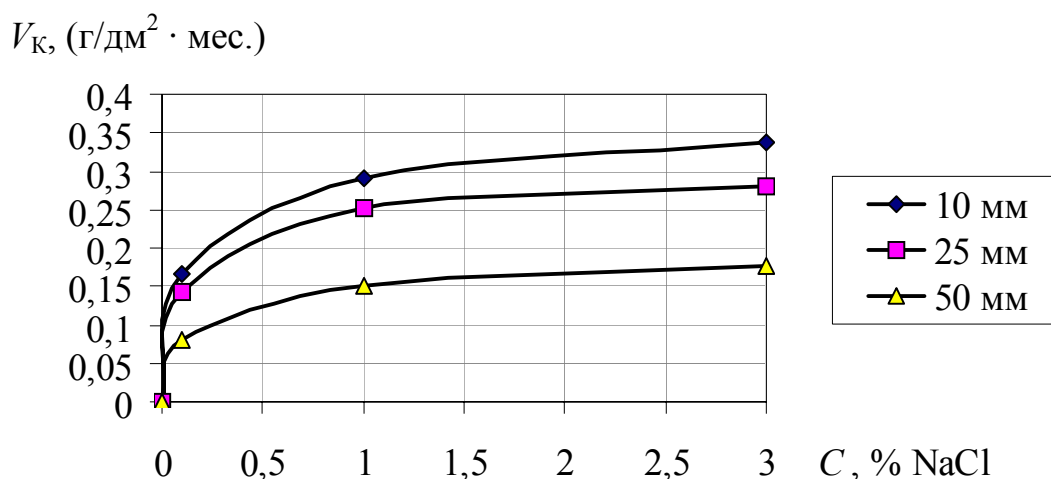


Рис. 4.16. Кривые зависимости коррозии металла под защитным покрытием из торкрет-бетона от степени минерализации вод

Описанные в п. 2.3.3 исследования по определению влияния концентрации нейтральных солей на скорость коррозии стали марки Ст 5 позволяют сравнить интенсивность этого процесса под защитным покрытием и без него

при данной минерализации вод. После обработки полученных результатов построен график для определения толщины торкрет-бетонного покрытия с учетом условий эксплуатации (рис. 4.17).

Из рисунка 4.17 следует, что с увеличением толщины защитного покрытия от 10 до 25 мм скорость коррозии снижается на 15 %, а если толщина торкрет-бетонного слоя составляет 50 мм, то снижение скорости коррозии достигает 50 % по сравнению со скоростью коррозии незащищенного металла, что равно 1 г/(дм² · мес.). В особо агрессивных условиях эксплуатации металлокреп, при увеличении толщины покрытия от 10 до 25 мм, показатель K снижается на 12 %, а при толщине покрытия 50 мм скорость коррозионных процессов снижается на 44 %.

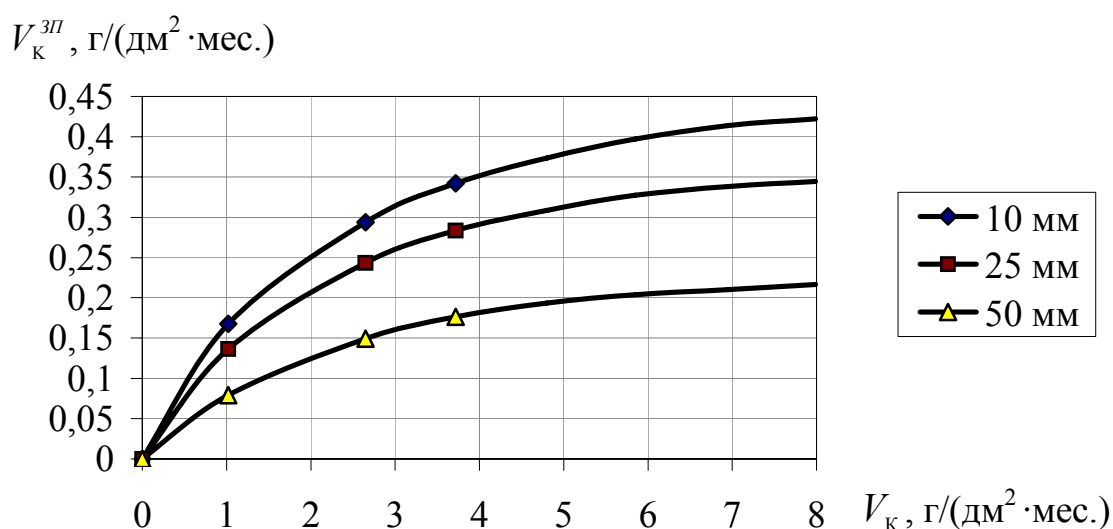


Рис. 4.17. Кривые сравнения скорости коррозии металла под защитным покрытием и коррозии незащищенного металла в реальных условиях эксплуатации

Таким образом, можно сделать вывод, что защитное действие торкрет-бетона по отношению к металлу характеризуется нелинейной зависимостью. При увеличении толщины покрытия от 25 до 50 мм антикоррозионное действие покрытия на металл усиливается, что можно объяснить снижением проницаемости торкрет-бетона для коррозионных агентов (вода, кислород) с увеличением толщины покрытия.

Графическая зависимость, представленная на рис. 4.17, позволяет определять коррозию защищенного металла при различной толщине торкрет-бетонного покрытия и в условиях эксплуатации, характеризующихся различной степенью агрессивности среды.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. В разделе определены основные требования к исходным компонентам торкрет-бетонной смеси, предназначенной для защиты металлической крепи от коррозии в условиях воздействия минерализованных шахтных вод.

2. На основе проведенных исследований в целях защиты металлической крепи от коррозии разработаны составы смесей торкрет-бетона с использованием золы уноса в качестве замены части цемента.

3. Проведен анализ защитного действия данных покрытий по отношению к металлу крепи. При использовании потенциостатического метода рассмотрена реакция металла, покрытого торкрет-бетоном различного состава. На основе метода электрических сопротивлений получены количественные характеристики защитного действия этих покрытий. В результате сравнительного анализа рекомендовано использовать состав торкрет-бетонной смеси, в котором 30 % цемента заменено золой уноса, как обеспечивающий наименьшую скорость коррозии защищаемого металла.

4. Проведен также анализ защитного действия торкрет-бетонной смеси рекомендованного состава в условиях воздействия минерализованной воды с использованием покрытий различной толщины (10, 25 и 50 мм).

Глава 5

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА ЗАЩИТЫ АРОЧНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ ТОРКРЕТ-БЕТОНОМ

5.1. Определение толщины торкрет-бетонного покрытия и технологии нанесения защитного слоя

Различные и постоянно меняющиеся условия эксплуатации подземных сооружений требуют от проектировщиков решения все более сложных задач. Наиболее перспективными и надежными с точки зрения эксплуатации считаются металлические крепи. Однако, в течение длительного срока эксплуатации металлическая крепь подвержена коррозии. В условиях наличия в шахтной среде минерализованных вод темпы коррозии значительно возрастают, поэтому крепь относительно быстро теряет свою несущую способность, в результате чего ее приходится часто менять или неоправданно завышать несущую способность этой конструкции. Поэтому в настоящее время решается более сложная задача – обеспечение надежной защиты металлической крепи от коррозии в течение длительного срока эксплуатации.

При разработке параметров и технологии нанесения торкрет-бетонного покрытия нужно учитывать кинетику геомеханических процессов, протекающих в породном массиве вследствие проведения выработки. Основную часть информации о том, каким образом происходит процесс деформирования горных пород вокруг выработки, можно получить, основываясь на анализе натуральных замеров величины смещений её контура, кинетики их развития во времени. Современная литература по горному делу располагает значительным количеством описаний подобных замеров, выполненных в различных горно-геологических условиях, что позволяет анализировать их с достаточным уровнем надежности.

Характер деформирования горных пород может быть двух типов (рис. 5.1).

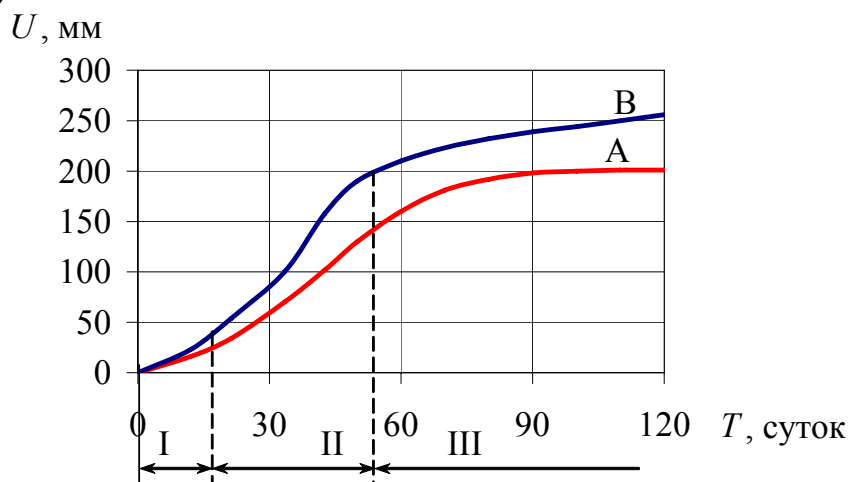


Рис. 5.1. Кривые, описывающие характер деформирования горных пород в окрестностях выработки

Кривая *A* характеризует деформирование пород, склонных к затухающей ползучести, и кривая *B* иллюстрирует реакцию пород с незатухающей ползучестью. В связи с этим работы, направленные на повышение долговечности горных выработок, должны проводиться по двум направлениям: а) применительно к выработкам, пройденным в «обычных» породах; и б) в так называемых «пучащих» породах.

Натурные наблюдения показывают, что процесс активного деформирования приконтурной зоны, когда происходит до 80 % смещений, длится в разных горно-геологических условиях от 1,5 до 3 месяцев. В это время по длине выработки, начиная от забоя, можно выделить три зоны [78] (рис. 5.1)

Зона I – это область влияния забоя выработки. В её пределах смещения очень малы, поскольку плоскость забоя не даёт возможности им развиваться.

Зона II является областью, в которой происходит активное трещинообразование. В это время по всей её длине наблюдается до 80 % смещений контура выработки и её начало является той самой точкой отсчета, начиная с которой математическую модель выработки можно рассматривать с позиций плоской задачи теории упругости.

Зона III – это область стабилизирующегося горного давления при условии, что выработка заложена в породах, соответствующих типу *A*. В том же случае, если выработка пройдена в породах, склонных к пучению, эта зона характеризуется непрерывным ростом давления на крепь.

После установки подпорной крепи из спецпрофиля (зона I) в массиве пород происходит перераспределение напряжений, вызванное образованием породного обнажения после проведения выработки. Горная порода смещается в сторону выработанного пространства, в результате чего происходит ее растрескивание, увеличение в объёме и рост давления на крепь (зона II).

Арка из спецпрофиля, обладая податливостью, «уходит» от сил давления смещающихся пород, давая возможность свободно развиваться процессу трещинообразования и формированию вокруг выработки зоны неупругих деформаций. Спустя 20...30 дней после проведения выработки, когда происходит приблизительно 50...60 % смещений пород, на поверхность крепи наносится торкрет-бетонное покрытие. К этому моменту подпорная крепь практически реализовала функцию податливости, причем величина ее отпора окружающим породам возросла, что позволяет сохранить от разрушения торкрет-бетонное покрытие. С оставанием 3...5 дней после торкретирования осуществляется тампонаж закрепного пространства (зона III), который обеспечивает долговечность защитного покрытия в течение длительного срока эксплуатации выработки.

Шахтные инструментальные наблюдения за развитием зоны неупругих деформаций вокруг капитальных горных выработок, выполненные Литвинским Г.Г. и Дружко Е.Б. [81], показали, что разрыхление горных пород наиболее интенсивно происходит в течение первого месяца после прохождения выработки. Особенности конструкции и технологии возведения крепи типа «арка – набрызг – тампонаж» позволяют учитывать кинетику геомеханических процессов, происходящих в массиве, за счет чего значительно снижается величина давления, воспринимаемая этой крепью, что позволяет обеспечить надеж-

ную работу защитного торкрет-бетонного покрытия по отношению к металлической арочной крепи в течение длительного срока эксплуатации выработки.

5.2. Разработка методики определения толщины торкрет-бетонного покрытия на металлической крепи с учетом условий эксплуатации

В результате проведенной работы определено рациональное соотношение исходных компонентов торкрет-бетонной смеси. Для использования рекомендован состав, в котором соотношение частей цемента, золы уноса и песка равно 0,7 : 0,3 : 3. Водоцементное отношение В/Ц = 0,5...0,4. В качестве ускорителя схватывания используется жидкое стекло в количестве 1 % от массы золоцементной смеси. Покрытие наносится заходками толщиной по 10...20 мм.

С учетом того, что на процесс коррозии влияет угол наклона элемента металлической крепи и соответственно скорость коррозии будет неравномерной, толщина защитного слоя торкрет-бетона также должна изменяться в зависимости от вероятности возникновения коррозии. В нормативных документах [110] содержится методика определения изменений скорости коррозии относительно начального значения в различных условиях эксплуатации на основе специальных коэффициентов, которые учитывают эти условия. Данную методику используют при выборе толщины профиля крепи. В этом же источнике предложено представленное ниже выражение (5.1), при помощи которого определяем толщину защитного покрытия и которое является составной частью более сложного выражения, позволяющего определять изменение скорости коррозии под влиянием горно-технических факторов (угол наклона элемента крепи, наличие замковых соединений, минерализация вод, действие максимальных изгибающих моментов).

Таким образом, условия эксплуатации отдельных элементов конструкции можно охарактеризовать следующим выражением [110]:

$$K_{\text{усл}} = K_1 \cdot K_2, \quad (5.1)$$

где $K_{\text{усл}}$ – коэффициент влияния условий эксплуатации на скорость коррозии; K_1 – коэффициент влияния типа сечения элементов на скорость коррозии стальных конструкций (табл. 5.1); K_2 – коэффициент влияния угла наклона элемента конструкции к горизонтали на скорость коррозии крепи.

Таблица 5.1

Значения коэффициента влияния типа сечения элемента на скорость коррозии стальных конструкций

Углеродистая сталь и сталь марок 10ХСНД, 15ХСНД	Одиночный прокатный или гнутый профиль	Составной профиль
K_1	1,4	2

Коэффициент влияния угла наклона элемента конструкции K_2 на скорость коррозии крепи определяем по таблице 5.2.

Таблица 5.2

Значения коэффициента влияния угла наклона элемента конструкции K_2 на скорость коррозии крепи

Угол наклона, град	Одиночный прокатный или гнутый профиль	Составной профиль
0	1	1
15	0,9	0,934
30	0,8	0,867
45	0,7	0,8
60	0,634	0,734
75	0,567	0,667
90	0,5	0,6

Отсутствующие в табл. 5.2 коэффициенты определяются по её исходным данным методом интерполяции.

На основе данных табл. 5.1, 5.2 построена табл. 5.3, показатели которой используются для выполнения дальнейших расчётов по определению коэффициента влияния условий эксплуатации на скорость коррозии.

Таблица 5.3

Сводные данные для определения коэффициентов K_1 и K_2

Угловая координата, град	Итоговое значение K_2	Итоговое значение K_1	$K_{\text{усл}} = K_1 \cdot K_2$
90	1	1,4	1,4
75	0,9	1,4	1,26
60	0,8	1,4	1,12
45	0,8	2	1,6
30	0,634	1,4	0,89
15	0,567	1,4	0,8

На основании данных табл. 5.3 построена зависимость коэффициента влияния условий эксплуатации от угловой координаты θ (рис. 5.2).

Для участков крепи, соответствующих показателям отрезков графика I и III, коэффициент влияния условий определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{усл}}^1 = -0,0077 \cdot \theta + 1,4. \quad (5.2)$$

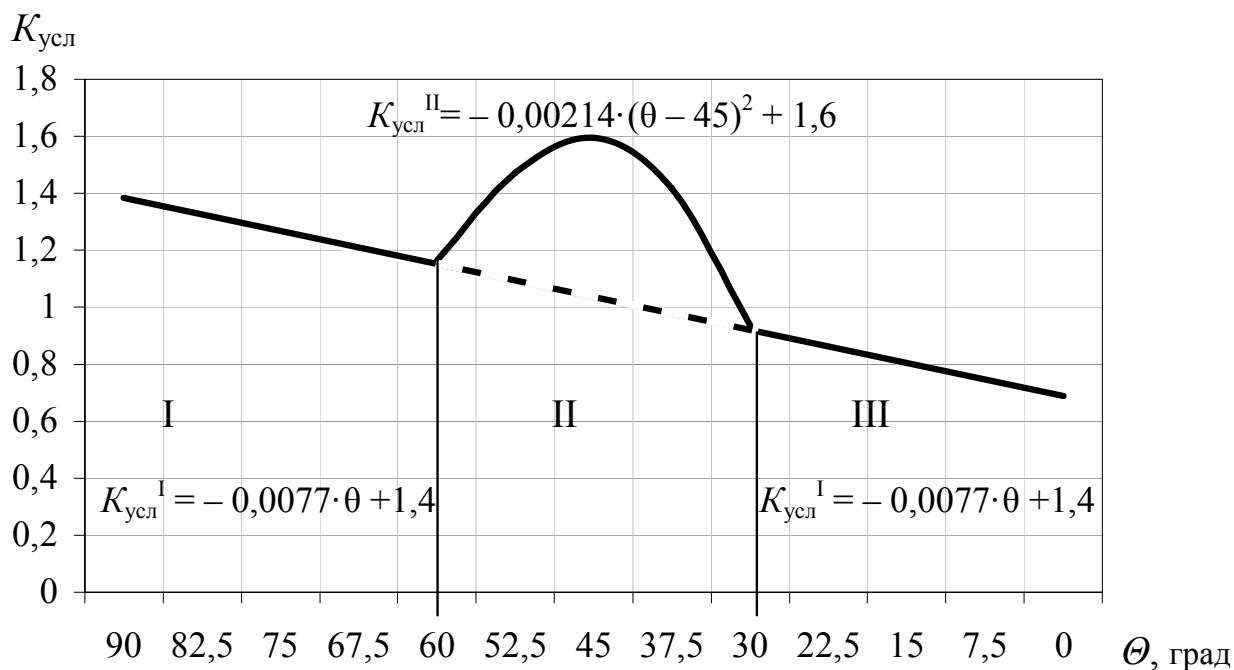


Рис. 5.2. График для определения коэффициента влияния условий эксплуатации $K_{\text{усл}}$ на скорость коррозии по угловой координате, его отрезки соответствуют: I – своду арочной крепи; II – участку крепи в районе замковых соединений и составного профиля; III – стойкам металлической крепи

Для участков крепи, соответствующих зоне II графика, коэффициент влияния условий определяется из такого выражения:

$$K_{\text{усл}}^{\text{II}} = -0,00214 \cdot (\theta - 45)^2 + 1,6. \quad (5.3)$$

Также, проектируя параметры торкрет-бетонного покрытия, его толщину определяем по максимальным изгибающим моментам, которые возникают в крепи. При этом на основании проведенных исследований (п. 2.3.5) выделяем участки с максимальными изгибающими моментами, на которых действуют напряжения: $\sigma > 150 \text{ МПа}$ (1500 кг/см^2), что соответствует рис. 5.3.

По известным значениям изгибающих моментов, а также их угловых координат производим расчет величины скорости коррозии на данном участке. Определяющим фактором в этом расчете является величина максимальных изгибающих моментов, которые отвечают такому условию:

$$M_{\text{max}} > \sigma \cdot W_x = 1500 \cdot W_x, \text{ кг}\cdot\text{см}.$$

Изменение скорости коррозии в точке, соответствующей максимальному значению изгибающего момента, на участке с напряжениями свыше 150 МПа, определяем, учитывая коэффициент влияния нагрузки на процессы коррозии крепи (см. п. 2.3.5).

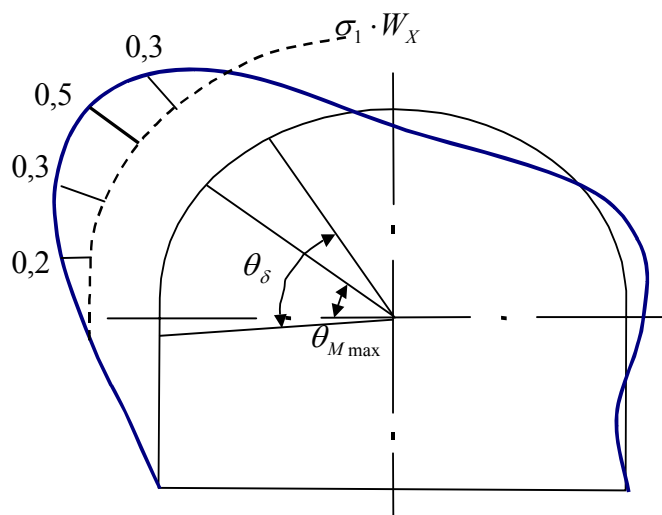


Рис. 5.3. Эпюры для определения участков крепи с максимальными изгибающими моментами при условии, что $\sigma > 150$ МПа

Используя формулу (2.3), уравнение по определению коэффициента влияния максимальных изгибающих моментов на скорость коррозии можем записать в следующем виде:

$$K_M = (1,13 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma^2 - 1,84 \cdot \sigma + 30) \cdot 10^{-3}, \quad (5.7)$$

Из формулы следует, что K_M изменяется от 0 в точке, где изгибающий момент $\sigma \cdot W_x \leq 1500 \cdot W_x$ (т. е. влияние нагрузки на коррозию отсутствует или незначительно) до 0,52...0,54 на участках крепи, где $\sigma \cong 280$ МПа (см. рис. 5.3). Учитывая, что $\sigma = \frac{M}{W_x}$, и подставляя эту величину в выражение (5.7), получаем

уравнение для определения коэффициента влияния изгибающих моментов на скорость коррозии при использовании известных значений $M(\theta)$, то есть

$$K_M = (1,13 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{M(\theta)}{W_x}\right)^2 - 1,84 \cdot \frac{M(\theta)}{W_x} + 30) \cdot 10^{-3}. \quad (5.8)$$

В итоге формула, по которой определяют коэффициент изменения скорости коррозии под влиянием горнотехнических факторов, принимает такой вид:

$$K_{ГТФ} = K_{усл} + K_M,$$

где $K_{ГТФ}$ – коэффициент влияния горнотехнических факторов на изменение скорости коррозии; $K_{усл}$ – коэффициент влияния условий эксплуатации на скорость коррозии; K_M – коэффициент влияния максимальных изгибающих моментов, которые возникают в элементах крепи, на скорость коррозии.

В п. 2.3.3 представлены результаты исследований по определению влияния концентрации нейтральных солей на скорость коррозии стали марки Ст 5.

Данная зависимость носит нелинейный характер. Увеличение скорости коррозии в зависимости от уровня минерализации шахтных вод также будет характеризоваться нелинейной зависимостью. Используя данные, приведенные на рис. 2.14 (п. 2.3.3), построили зависимость изменения скорости коррозии от уровня минерализации шахтных вод с учетом влияния горнотехнических факторов (рис. 5.4).

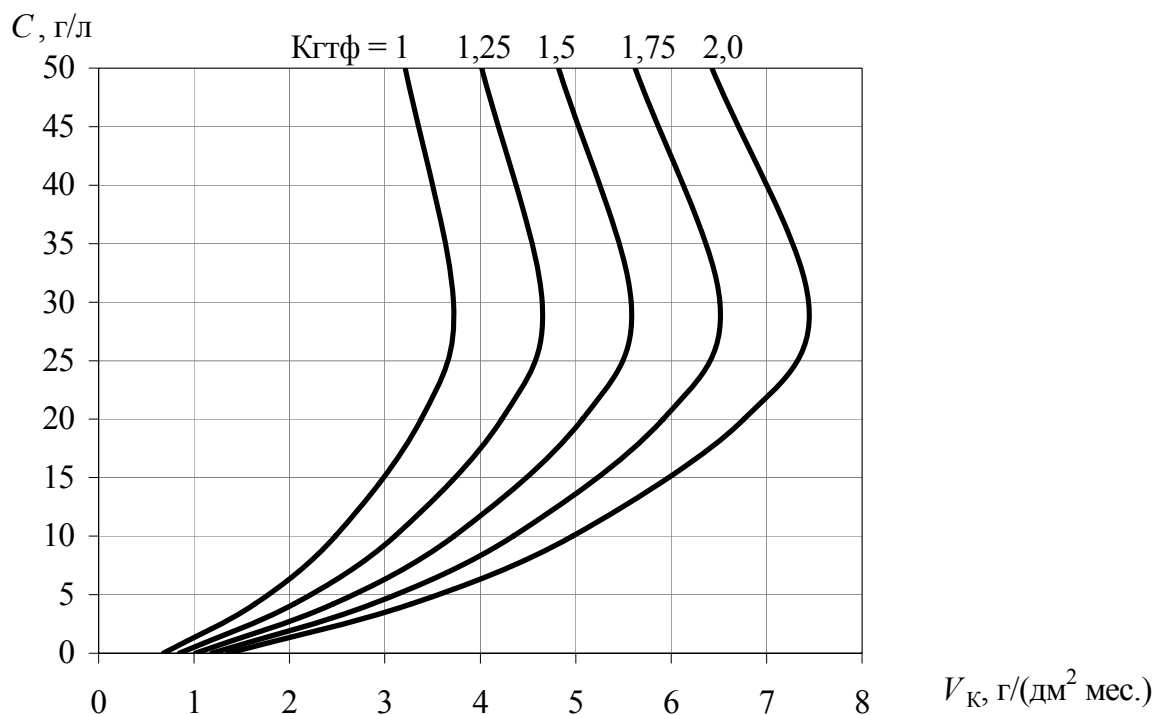


Рис. 5.4. График изменения скорости коррозии под влиянием минерализации вод и с учетом влияния горнотехнических факторов

Нормативными документами [108, 109] регламентируется минимальная толщина бетонного покрытия: 25 мм – в условиях слабоагрессивной среды, 30 мм – если агрессивность средняя и 35 мм – при эксплуатации в сильноагрессивной среде. Однако, учитывая тот факт, что торкрет-бетон по своим свойствам (плотность, водонепроницаемость, антикоррозионные характеристики) значительно превосходит обычный бетон, для определения толщины покрытия из этого материала руководствуемся результатами проведенных исследований, описанными в п. 4.4.5. На основании зависимостей, представленных на рис. 4.17 и 2.14, удалось построить номограмму для определения толщины торкрет-бетонного покрытия (рис. 5.5).

В ходе выполнения расчетов, прежде всего, на нижнем графике номограммы определяют значение начальной скорости коррозии элементов металлической крепи, учитывая особенности шахтной среды (особенно уровень минерализации вод), а также то, что начальное значение коэффициента $K_{ггф} = 1$. Потом проводят вертикальную проекцию из найденной точки на верхний график номограммы до пересечения с кривой, характеризующей зависимость скорости коррозии металла под защитным покрытием торкрет-бетона минимальной тол-

щины от скорости коррозии незащищенного металла, находящегося в тех же условиях. Далее по графику находят значение скорости коррозии металла под защитным покрытием (V_k^{3II}) и проводят горизонтальную линию для определения среднего и максимального значений толщины защитного покрытия, при которых будет обеспечено сохранение минимально допустимой скорости коррозии под слоем торкрет-бетона в случае ухудшения внешних условий и увеличения коэффициента $K_{ГТФ}$.

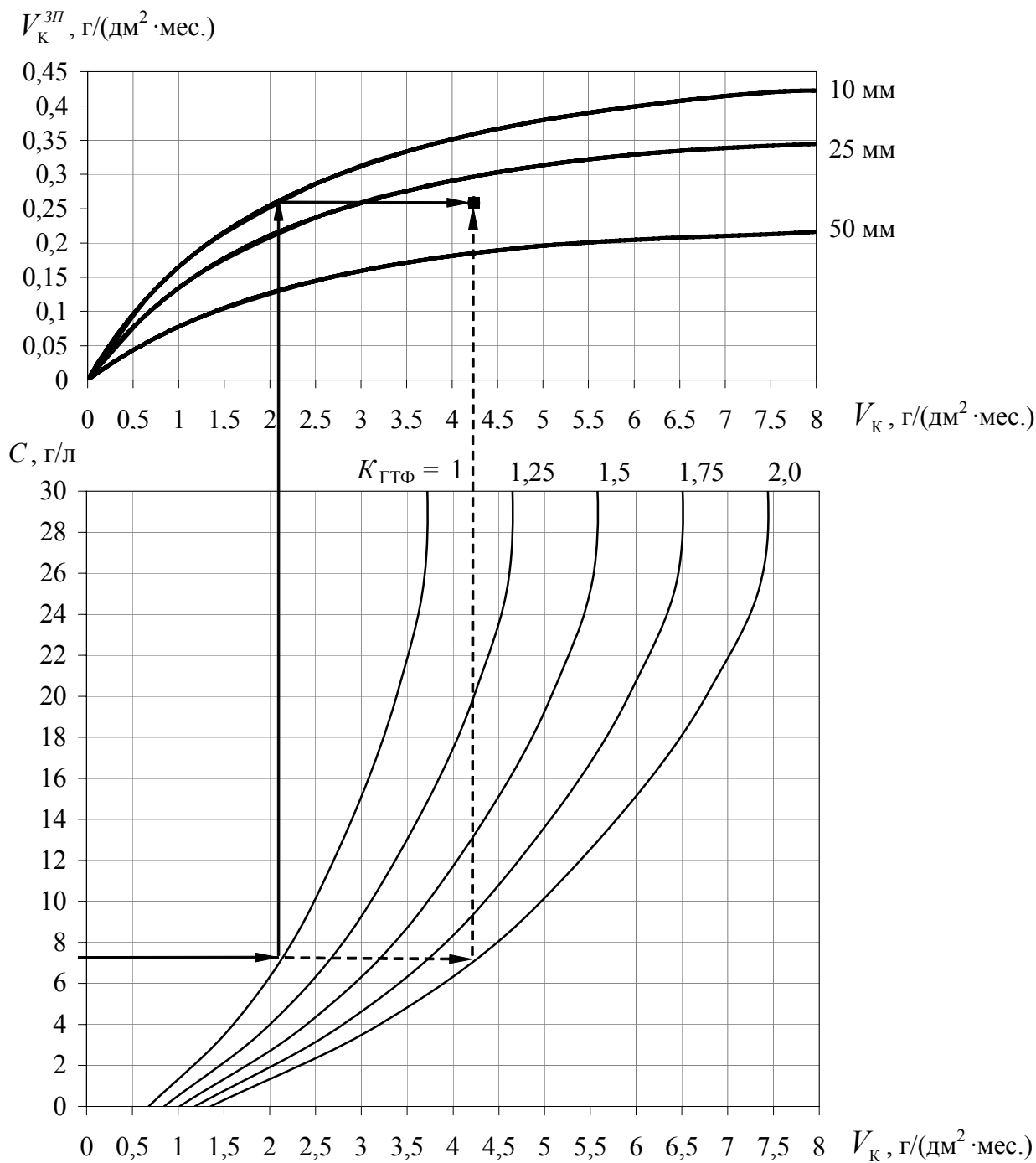


Рис. 5.5. Номограмма для определения параметров толщины защитного покрытия из торкрет-бетона с учетом минерализации шахтных вод и коэффициента влияния горнотехнических факторов

По известным значениям коэффициента влияния горнотехнических факторов на нижнем графике номограммы определяется максимальная скорость коррозии металла в данных условиях и проводится вертикальная проекция на верхний график. Точка пересечения двух прямых на верхнем графике номограммы представляет собой искомую величину максимальной толщины защитного покрытия именно для этих наиболее неблагоприятных условий.

Толщина покрытия на металлической крепи будет изменяться от минимального значения, равного величине δ (рис. 5.6) на стойках, до величины δ_1 в области замков и δ_2 в области свода.

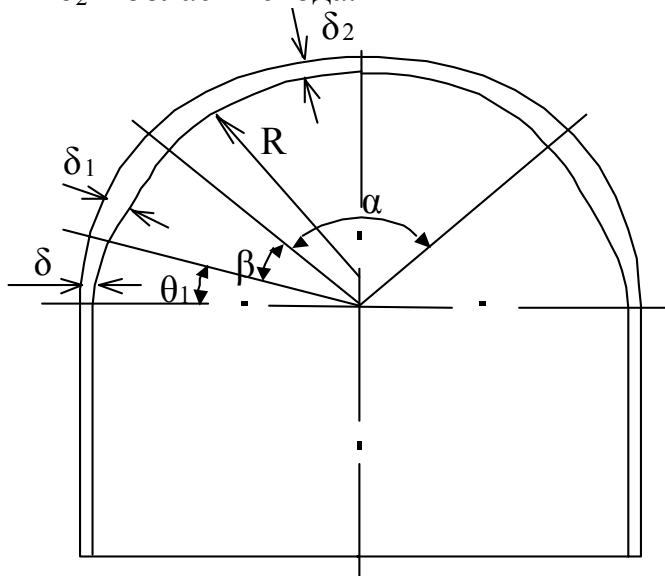


Рис. 5.6. Схема толщины защитного покрытия в зависимости от условий эксплуатации

Таким образом, толщина покрытия изменяется от минимального значения на стойках, до среднего в области свода и максимального на участках действия максимальных изгибающих моментов (см. рис. 5.6).

5.2.1. Технология нанесения защитного торкрет-бетонного покрытия на элементы металлической крепи

Перед началом работ по защите металлической крепи от коррозии производят замеры кривизны арок. Полученные результаты измерений нескольких арок обрабатывают с целью определения общих, наиболее характерных значений изгибающих моментов, которые действуют на металлокрепь в условиях горной выработки. Результаты натурных измерений используются для расчетов скорости коррозии вместе с коэффициентами влияния горнотехнических условий. Для среднего и максимального значений скорости коррозии по рис. 5.5 определяются параметры толщины защитного покрытия. На основании результатов расчетов составляется план работ, где указывают значения минимальной толщины торкрет-бетонного покрытия δ_0 , участки крепей, на которых толщина должна быть не менее определенной величины δ , а также максимальное значение толщины покрытия δ_{\max} с угловой координатой θ .

Торкрет-бетон наносится заходками, количество которых кратно величине минимальной толщины покрытия. Между заходками осуществляется контроль толщины покрытия, для чего выполняют контрольные замеры. После нанесения минимальной толщины торкрет-бетона по всему сечению арок, согласно плану работ определяются участки, на которых производится дополнительное нанесение покрытия. Одновременно с нанесением торкрет-бетона на крепь проводится торкрет-бетонирование в области боков и кровли выработки толщиной слоя 10...20 мм в зависимости от обводненности окружающих пород.

Обеспечение надежного контакта на границе «крепь – массив» вызывает снижение экстремальных значений изгибающих моментов, действующих на крепь. При условии качественной забутовки возможен более плотный контакт крепи с породами, тогда передаваемая на нее нагрузка носит более равномерный характер, а эпюра моментов имеет меньшие значения экстремумов.

Учитывая, что при водонасыщении все основные углевмещающие породы в 1,5...3 раза снижают свои прочностные свойства, применение мероприятий, направленных на ограничение водопритока в выработку (тампотаж закрепного пространства), существенно повлияет на устойчивость горных выработок. Результатом этих мероприятий является уменьшение водонасыщенности пород в приконтурной зоне и, как следствие, снижение нагрузок на крепь.

Способ сохранения длительной несущей способности металлической крепи капитальных выработок с использованием торкрет-бетонирования и последующего проведения тампожа закрепного пространства может обеспечить надежную защиту участков крепей, испытывающих одновременно значительные изгибающие моменты и действие агрессивных шахтных вод при атмосферной коррозии.

Торкрет-бетонную защиту можно осуществлять в выработке, пройденной и закрепленной металлической крепью из СВП, после того, как уже произошли основные смещения со стороны приконтурных пород. Эта защита будет уместна при наличии в выработке минерализованных, со значительным содержанием сульфатов и хлоридов, коррозионно-активных шахтных вод.

Следует подчеркнуть, что на действующих шахтах имеются магистрали сжатого воздуха, которые можно использовать для работы торкрет-бетонных установок, имеющих следующие технические характеристики:

- вид энергии – сжатый воздух;
- способ торкрет-бетонирования – «мокрый» (по рабочему трубопроводу подается готовая смесь);
- напорная подача в сопло ускорителей схватывания и твердения смеси;
- модульная компоновка узлов;
- подача смеси в шахту в сухом виде.

После проведения торкрет-бетонных работ проводится тампотаж закрепного пространства. Цель тампожа – ограничение доступа шахтных вод в выработку, а также снижение напряжений, действующих на крепь, за счет использования породонесущей оболочки как элемента крепи [99]. Тампотаж закрепного пространства выполняется нагнетанием раствора под давлением, не пре-

вышающем 0,2...0,3 МПа. Эту операцию осуществляют с целью заполнения пустот в горных породах вокруг выработки, а также между породами и крепью.

Шахтные исследования процесса тампонажа закрепного пространства как в нашей стране, так и за рубежом позволили экспериментально подтвердить то обстоятельство, что при давлении нагнетания, не превышающем 0,2...0,3 МПа, тампонажный раствор распространяется на 1,5...2 м вглубь массива [112].

Перед нанесением покрытия поверхности металлической крепи следует очистить от грязи, ржавчины и слоя окалины при помощи дробеструйного аппарата. Для этих целей допускается применять смесь кварцевого песка с водой. Кварцевый песок, используемый для очистки, должен иметь зерна размером 0,5...0,25 мм, а давление сжатого воздуха, при помощи которого нагнетается абразивная смесь, должно быть не менее 4 атм. Для пескоструйной очистки металлических поверхностей наиболее широко применяется дробеструйный аппарат АД-240 УМХЗ. Чтобы подсоединить его к магистрали сжатого воздуха, используют предусмотренные комплектацией напорные рукава (шланги) диаметром 25 мм типа Ш-63-25-38-У и длиной до 50 м.

Чтобы предотвратить развитие ранней коррозии очищенных от грязи и окалины поверхностей конструкций крепи, в воду, которая поступает в пескоструйный аппарат, следует вводить пассивирующие добавки: до 1 % нитрита натрия, до 2 % тринатрийфосфата или до 0,5 % хромпика [110].

5.3. Рациональная область применения торкрет-бетона для защиты металлической крепи от коррозии

Условия применения разработанного метода защиты металлической крепи от коррозии определяются таким сочетанием внешних факторов, при котором на крепь выработки воздействует постоянная нагрузка, формирующая установившиеся деформации породного массива, а также наличие шахтных минерализованных вод, в которых показатель рН = 7...8. Торкрет-бетонная смесь, состоящая из цемента, золы, песка в соотношении частей 0,7 : 0,3 : 3 обладает защитными антикоррозионными свойствами по отношению к хлоридной и сульфатной агрессии шахтных вод. Она предназначена для защиты от коррозии арочной металлической крепи в капитальных выработках шахт, имеющих соответствующие горно-геологические условия. Рекомендуется также применение торкрет-бетона для защиты от коррозии армировки вертикальных стволов. Сохранение геометрических параметров выработки в течение длительного срока ее эксплуатации оценивается коэффициентом устойчивости K_y , который равен отношению несущей способности крепи $q_{пр}$, к действующей нагрузке q , то есть

$$K_y = \frac{q_{пр}}{q} \quad (5.12)$$

Согласно формуле (5.12) крепь устойчива, если $K_y > 1$, и неустойчива, если $K_y < 1$.

При определении рациональной области применения торкрет-бетона в качестве защиты металлической крепи от коррозии руководствуемся коэффициентом устойчивости. Как правило, металлическая крепь, параметры которой определяются проектом, имеет некоторый запас прочности (20...30 %). Для расчетов используется коэффициент устойчивости, величина которого $K_y = 0,7$. Это означает, что действующие нагрузки составляют 70 % от несущей способности крепи (рис. 5.7).

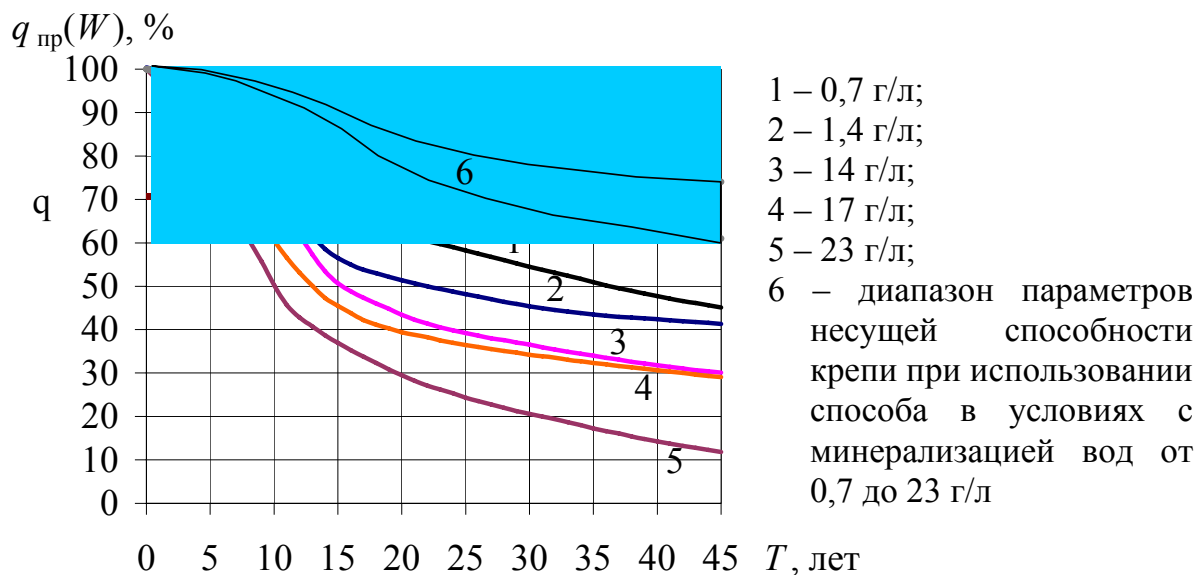


Рис. 5.7. Диаграмма изменения во времени несущей способности незащищенной (1 – 5) и защищенной (6) металлической крепи в условиях шахт с разной минерализацией вод

В процессе эксплуатации на крепь действуют агрессивные шахтные воды и нагрузки. Коррозионный износ снижает несущую способность металлических конструкций и выработка со временем теряет свою устойчивость. На основе лабораторных исследований и результатов шахтных инструментальных измерений предложена методика для определения диапазона параметров несущей способности крепи при использовании способа защиты от коррозии.

5.4. Прогноз применения торкрет-бетона в качестве защиты металлической крепи от коррозии

Исследования устойчивости горных выработок, поддерживаемых металлической крепью, в условиях агрессивного действия шахтных вод – довольно сложная и многоплановая задача, требующая выполнения не только аналитических и лабораторных исследований, но и шахтных инструментальных измерений.

Образцы, покрытые с двух сторон торкрет-бетоном, были подвешены на металлической крепи и находились в шахтных условиях в течение двух лет. Исследовалось 5 образцов. Обработка результатов натурных наблюдений осуществлялась по методике, приведенной в гл. 2.

Проведенные исследования показали, что на металлических образцах, защищенных торкрет-бетонным покрытием и находившихся в условиях горных выработок с минерализацией вод 1,4 г/л (шахта «Алмазная» «ДТЭК Добропольеуголь»), при эксплуатации в течение двух лет следов коррозии не обнаружено. На основе натуральных наблюдений и ускоренных коррозионных испытаний [102] с учетом условий на шахтах с различной минерализацией шахтных вод было спрогнозировано повышение длительной несущей способности металлической крепи при использовании данного типа покрытий в качестве защиты от коррозии. Согласно полученным результатам, при эксплуатации металлической крепи в течение 15 лет ее коррозионный износ составит 3 мм, а потеря несущей способности будет равна 36 %. В случае использования для защиты металлических конструкций от коррозии рассмотренной технологии предусмотрено, что те же характеристики будут равны 0,3...0,5 мм и 8...10 % соответственно. Таким образом, длительная несущая способность металлической крепи, защищенной торкрет-бетоном, повысится на 26...28 % в течение данного срока эксплуатации.

Описанные выше положительные качества способа, а также высокий уровень механизации работ по нанесению торкрет-бетонного покрытия являлись определяющими факторами при расчете экономической эффективности применения новой технологии по сравнению с традиционными способами защиты.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

1. В главе разработана и представлена номограмма для определения толщины торкрет-бетонного покрытия в зависимости от горнотехнических условий эксплуатации металлической крепи.

2. На основании анализа условий эксплуатации крепей разработана диаграмма изменения скорости их коррозии под влиянием минерализации вод в зависимости от воздействия горнотехнических факторов.

3. Изложена технология нанесения защитного торкрет-бетонного покрытия на элементы металлической крепи.

4. Определена область рационального использования торкрет-бетона в качестве защиты металлической крепи от коррозии в условиях шахт с высокой минерализацией вод.

Список используемой литературы

1. Жикаляк, Н.В. Природные энергоносители и экономика Украины: состояние, проблемы, перспективы [Текст] / Н.В. Жикаляк, А.М. Назаренко, А.В. Михелис // Уголь Украины. – 2000. – № 8. – С. 14 – 19.
2. Топливо-энергетический комплекс Украины в 2002 году (экспресс-анализ оперативной информации) [Текст] // Энергосбережение. – 2003. – № 2. – С. 7 - 9.
3. Тулуб, С.Б. Перспективы инвестиционных проектов в Донбассе [Текст] / С.Б. Тулуб, В.Г. Агеев, С.В. Мартыненко // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 3. – С. 14.
4. Сургай, Н.С. Приоритеты в угле и цена их недооценки [Текст] / Н.С. Сургай // Науковий вісник НГА України. – 2000. – № 5. – С. 9 – 14.
5. Лысенко, А.Н. Некоторые аспекты развития угольной отрасли Украины и меры по стабилизации объемов добычи угля [Текст] / А.Н. Лысенко, Ю.П. Иванов // Уголь Украины. – 1999. – № 4. – С. 3 – 7.
6. Косков, И.Г. Основные направления совершенствования крепления горных выработок [Текст] / И.Г. Косков // Шахтное строительство. – 1985. – № 1. – С. 3 – 5.
7. Литвинский, Г.Г. Стальные рамные крепи горных выработок [Текст] / Г.Г. Литвинский, Г.И. Гайко, Н.И. Кулдыркаев. – К.: Техніка, 1999. – 216 с.
8. Лошкарева, Р.Н. Анализ потребления материальных ресурсов в угольной промышленности [Текст] / Р.Н. Лошкарева, В.Г. Халангот // Уголь Украины. – № 6. – 1992. – С. 45 – 47.
9. Зигель, Ф.С. Арочные крепи из новых профилей проката [Текст] / Ф.С. Зигель, В.Ф. Компанец // Уголь Украины. – 1992. – С. 59 – 61.
10. Зигель, Ф.С. Новые спецпрофили для крепей горных выработок [Текст] / Ф.С. Зигель, Ф.В. Компанец, А.А. Сытник // Шахтное строительство. – 1988. – № 10. – С. 15 – 17.
11. Каира, З.С. Определение рациональных объемов извлечения и повторного использования металлокрепи [Текст] / З.С. Каира // Уголь Украины. – 1992. – № 10. – С. 44 – 45.
12. Максимов, А.П. Горное давление и крепь выработок [Текст] / А.П. Максимов. – М.: Недра, 1973. – 288 с.
13. Гелескул, М.Н. Поддержание горных выработок [Текст] / М.Н. Гелескул, Б.М. Усан-Подгорнов. – М.: Недра, 1973. – 256 с.
14. Силин, Е.М. Техника и технология заполнения закрепного пространства при проведении выработок в СССР и за рубежом: Обзор / ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ Минуглепрома СССР [Текст] / Е.М. Силин, И.М. Приймак. – М., 1988. – С. 8.
15. Вильд, Х.В. 125 лет применения металлических крепей в горном деле и туннелестроении [Текст] / Х.В. Вильд // Глюкауф. – 1987. – № 27. – С. 3 – 7.
16. Заславский, Ю.З. Новые виды крепи горных выработок [Текст] / Ю.З. Заславский, Е.Б. Дружко. – М.: Недра, 1989. – 256 с.

17. Косков, И.Г. Новые материалы и конструкции крепи горных выработок [Текст] / И.Г. Косков. – М.: Недра, 1987. – 196 с.
18. Ерофеев, Л.М. Повышение надежности крепи горных выработок [Текст] / Л.М. Ерофеев, Л.А. Мирошникова. – М.: Недра, 1992. – 224 с.
19. Мартиненко, С.В. Про можливість підвищення несучої здатності профілю СВП [Текст] / С.В. Мартиненко // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 5. – С. 23 – 24.
20. Компанец, В.Ф. Крепление выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт [Текст] / В.Ф. Компанец, Г.Г. Сугатенко, А.В. Курилин // Уголь Украины. – 1996. – № 1. – С. 26 – 28.
21. Мирончак, О.П. Новые крепи подготовительных выработок [Текст] / О.П. Мирончак, Г.Г. Сугаренко // Уголь Украины. – 1998. – № 12. – С. 42.
22. Смирняков, В.В. Совершенствование конструкций металлических крепей горных выработок [Текст] / В.В. Смирняков, В.К. Подолян // Шахтное строительство. – 1985. – № 4. – С. 26 – 28.
23. Каретников, В.Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок: Справочник [Текст] / В.Н. Каретников, В.Б. Клейменов, А.Г. Нуждихин. – М.: Недра, 1989. – 571 с.
24. Полухин, В.А. Определение напряженно-деформированного состояния массива и повышение устойчивости выработки [Текст] / В.А. Полухин // Уголь Украины. – 1999. – № 7. – С. 25 – 26.
25. Обеспечение устойчивости магистральных выработок в слабых углевмещающих породах [Текст] / В.С. Пиховкин, В.И. Полтавец, В.Я. Ткачев, Е.В. Шишков // Уголь Украины. – 1992. – № 9. – С. 31 – 36.
26. Кириченко, В.Я. Экономичная крепь КВТ для условий высокого горного давления [Текст] / В.Я. Кириченко, Б.М. Усаченко // Геотехническая механика. – 1998. – № 9. – С. 56 – 59.
27. Крепление горных выработок дисперсно-армированным набрызгбетоном [Текст] / Э.В. Казакевич, В.В. Ройзен, В.Б. Глобинюк, В.Г. Марцинкевич // Шахтное строительство. – 1988. – № 6. – С. 14 – 16.
28. Комиссаров, М.А. Исследование металлических конструкций податливой крепи для подготовительных выработок [Текст] / М.А. Комиссаров, Г.П. Барсук // Крепление горных выработок: Сб. № 13. – М. – Х.: Углетехиздат, 1953. – С. 28 – 29.
29. Казакевич Э.В. Эффективная антикоррозионная защита металлов – актуальная задача шахтостроителей [Текст] / Э.В. Казакевич, Н.Г. Лисковский // Шахтное строительство. – 1989. – № 2. – С. 5 – 6.
30. Компанец, В.Ф. Совершенствование сталей для крепей и защита их от коррозии [Текст] / В.Ф. Компанец // Уголь Украины. – 1995. – № 9. – С. 16 – 18.
31. Шлугер, М.А. Коррозия и защита металлов [Текст] / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. – 216 с.
32. Стрижевский, Н.В. Подземная коррозия и методы защиты [Текст] / Н.В. Стрижевский. – М.: Металлургия, 1986. – 112 с.
33. Карпенко, К.П. Полимерные и металлизационно-лакокрасочные покрытия для защиты от коррозии [Текст] / К.П. Карпенко, П.И. Мучник, М.Е. Поливанова и др. // Шахтное строительство. – 1975. – № 2. – С. 17 – 19.

34. Янко, С.В. Итоги работы угольной промышленности Украины [Текст] / С.В. Янко // Уголь Украины. – 1998. – № 1. – С. 3 – 6.
35. Рачев, Х. Справочник по коррозии [Текст]: Пер. с болг. С.И. Нейковского / Х. Рачев, С. Стефанова. – М.: Мир, 1982. – С. 10 – 11.
36. Коррозия металлов [Текст]: пер. с англ. В.В. Скорчеллетти. – Л. – М.: Госхимиздат, 1952. – Кн. 1. – 651 с.
37. Акимов, Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов [Текст] / Г.В. Акимов. – М.: Metallurgizdat, 1946. – 463 с.
38. Жук, Н.П. Введение в коррозию и защиту металлов [Текст] / Н.П. Жук. – М.: Metallurgia, 1970. – 43 с.
39. Коваленко, В.В. Исследование коррозионной стойкости металлической арочной крепи угольных шахт [Текст] / В.В. Коваленко // Науковий вісник НГА України. – 2001. – № 6. – С. 21 – 24.
40. Летов, Н.А. Коррозия и способы борьбы с ней на шахтах Кизеловского угольного бассейна [Текст] / Н.А. Летов. – М.: Углетехиздат, 1950. – 55 с.
41. Третьяк, А.М. Коррозия металлов и борьба с ней [Текст] / А.М. Третьяк. – М.: Книга, 1981. – 31 с.
42. Красноярский, В.В. Коррозия и защита подземных металлических сооружений [Текст] / В.В. Красноярский, Л.Я. Цикерман. – М.: Высш. шк., 1968. – 296 с.
43. Макаров, В.А. Анодная электрохимическая защита [Текст] / В.А. Макаров // Коррозия и защита от коррозии. – 1974. – Вып. 3. – С. 84 – 152.
44. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов [Текст] / Н.П. Жук. – М.: Metallurgia, 1976. – 472 с.
45. Борисенко, А.И. Повышение антикоррозионных свойств защитных покрытий [Текст] / А.И. Борисенко, К.А. Вященко. – Л.: Наука, 1983. – 40 с.
46. Антропов, Л.И. Ингибиторы коррозии металлов [Текст] / Л.И. Антропов, Е.М. Макушин, В.Ф. Панасенко. – К.: Техніка, 1981. – 183 с.
47. О защитных свойствах и долговечности противокоррозионных покрытий шахтных металлоконструкций [Текст] / П.И. Мучник, Т.А. Ходжай, Б.М. Руденко, В.И. Шагайденко // Шахтное строительство. – 1975. – № 4. – С. 5 – 6.
48. Отечественный и зарубежный опыт производства противокоррозионных работ [Текст] // ЦБНТИ. – М., 1972. – 20 с.
49. Цикерман, Л.Я. Прогноз опасности коррозии и экономика защиты [Текст] / Л.Я. Цикерман, Г.С. Кесельман, Л.В. Жилина. – М.: ВНИИОЭНГ, 1970. – 169 с.
50. Тейндл, Й. Борьба с коррозией оборудования угольных шахт [Текст]: пер. с чеш. Й. Тейндл. – М.: Недра, 1966. – С. 45 – 48.
51. Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине [Текст] / О. Кукурс, А. Ушите, И. Хонзак и др. – Рига: Зинатне, 1980. – 163 с.
52. Розенфельд, И.Л. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов [Текст] / И.Л. Розенфельд, К.А. Жигалова. – М.: Metallurgia, 1966. – 347 с.

53. Берукштис, Г.К. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях [Текст] / Г.К. Берукштис, Г.Б. Кларк. – М.: Наука, 1971. – 159 с.
54. Дятлова, В.Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов [Текст]: справоч. – 2-е изд. / В.Н. Дятлова. – М.: Машиностроение, 1964. – 352 с.
55. Колотыркин, Я.М. Металл и коррозия [Текст] / Я.М. Колотыркин. – М.: Metallurgy, 1985. – 88 с.
56. Чалый, В.П. Гидроокиси металлов (закономерности образования, состав, структура и свойства) [Текст] / В.П. Чалый. – К.: Наук. думка, 1972. – 153 с.
57. Иванов, Е.С. Ингибиторы коррозии металлов [Текст] / Е.С. Иванов, С.С. Иванов. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
58. Розенфельд, И.Л. Ингибиторы атмосферной коррозии [Текст] / И.Л. Розенфельд, В.П. Персианцева. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
59. Максимов, А.П. Влияние качества забутовки на несущую способность металлической арочной крепи [Текст] / А.П. Максимов, А.Н. Шашенко, А.Н. Роечко // Шахтное строительство. – 1987. – № 3. – С. 21 – 23.
60. Либерман, Ю.М. Давление на крепь капитальных выработок [Текст] / Ю.М. Либерман. – М.: Наука, 1969. – 114 с.
61. Руководство по определению экономической эффективности антикоррозионной защиты строительных конструкций промышленных зданий и сооружений [Текст]. – М.: Стройиздат, 1969. – 81 с.
62. Шашенко, А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук. / А.Н. Шашенко. – Д., 1988. – 507 с.
63. Агеев, В.Г. Устойчивость подземных выработок угольных шахт в трещиноватом породном массиве [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / В.Г. Агеев. – Д., 2000. – 123 с.
64. Смирняков, В.В. Выбор параметров крепи направленной податливости [Текст] / В.В. Смирняков // Устойчивость и крепление выработок: межвуз. сб. – Вып. 3. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1978. – С. 42 – 48.
65. Кошелев, К.В. Охрана и ремонт горных выработок [Текст] / К.В. Кошелев, П.А. Петренко, А.О. Новиков. – М.: Недра, 1990. – 218 с.
66. Заславский, Ю.Э. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна [Текст] / Ю.Э. Заславский. – М.: Недра, 1966. – 180 с.
67. Якоби, О. Практика управления горным давлением [Текст] / О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
68. Солодянкин, А.В. Обоснование параметров способа усиления крепи подготовительных выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Солодянкин. – Д., 1996. – 243 с.
69. Иванчишин, С.Я. Обоснование способа повышения несущей способности металлической арочной крепи [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / С.Я. Иванчишин. – Д., 1992. – 159 с.
70. Смирняков, В.В. Расчетные схемы металлической крепи [Текст] / В.В. Смирняков // Устойчивость и крепление горных выработок. Исследование

взаимодействия массива с крепью выработок: Межвуз. сб. науч. тр. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1988. – С. 4 – 11.

71. Родин, И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление [Текст] / И.В. Родин // Исследования горного давления. – 1960. – С. 343 – 374.

72. Булычев, Н.С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок [Текст] / Н.С. Булычев, Н.Н. Фотиева, Е.В. Стрельцов. – М.: Недра, 1986. – 288 с.

73. Краев, Ю.К. Несущая способность арочной крепи различной конфигурации [Текст] / Ю.К. Краев // Изв. вузов: Горный журнал. – 1980. – № 4. – С. 34 – 41.

74. Унифицированные типовые сечения горных выработок, закрепленных металлической арочной крепью из взаимозаменяемого шахтного профиля [Текст]. – К.: Будівельник, 1971. – 298 с.

75. Копылов, А.Ф. Повышение устойчивости надрабатываемой выработки [Текст] / А.Ф. Копылов, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1994. – № 8. – С. 23 – 24.

76. Исследование физико-механических свойств горных пород и проявлений горного давления в подготовительных выработках глубоких шахт Донбасса [Текст] / В.Т. Глушко, И.И. Ваганов, И.С. Кравцов, Б.С. Усатенко // Реферативная информация. – К.: Наукова думка, 1969. – 72 с.

77. Кошелев, К.В. Повышение устойчивости капитальных горных выработок на больших глубинах [Текст] / К.В. Кошелев, В.Ф. Трубочёв. – М.: Недра, 1973. – 127 с.

78. Коваленко, В.В. Повышение несущей способности металлической крепи капитальных горных выработок в условиях агрессивных шахтных вод [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / В.В. Коваленко. – Д., 2003. – 185 с.

79. Ржаницын, А.Р. Строительная механика [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Высш. шк., 1991. – 439 с.

80. Насонов, И.Д. Моделирование горных процессов [Текст] / И.Д. Насонов. – М.: Недра, 1978. – 256 с.

81. Литвинский, Г.Г. Шахтные наблюдения за развитием зоны неупругих деформаций вокруг капитальных выработок [Текст] / Г.Г. Литвинский, Е.Б. Дружко // Проектирование и строительство угольных предприятий. – 1970. – № 3. – С. 34 – 38.

82. ГОСТ 18662-83. Профили горячекатаные СВП для крепи горных выработок [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 3 с.

83. Коваленко, В.В. Исследование влияния действующей нагрузки на коррозионную стойкость металлической арочной крепи угольных шахт [Текст] / В.В. Коваленко // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – Д.: НГАУ, 2001. – № 11. – С. 224 – 229.

84. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы бетонов и железобетонов [Текст] / В.И. Бабушкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 187 с.

85. Пути снижения расхода цемента на предприятиях Минуглепрома СССР [Текст]: Обзор. – М.: ЦНИЭИуголь, ЦБНТИ, 1989. – С. 5.

86. Шталь, Р. Применение набрызгбетона для крепления горных выработок [Текст] / Р. Шталь // Глюкауф. – 1964. – № 9. – С. 560 – 575.

87. Коваленко, В.В. Обеспечение длительной устойчивости металлической крепи в условиях активного развития процессов коррозии [Текст] / В.В. Коваленко // История кафедры строительных геотехнологий и геомеханики Национального горного университета. – Д. – Донецк: Норд-пресс. – 2004. – С. 386 – 390.
88. Казакевич, Э.В. Набрызгбетон – высокопроизводительный и экономический вид крепи [Текст] / Э.В. Казакевич // Всесоюз. науч.-техн. конф. по производительности труда. – Донецк: Донбасс, 1972. – С. 38 – 42.
89. Применение набрызгбетона в угольных шахтах Центрального Донбасса [Текст] / Э.В. Казакевич, М.А. Клименко, В.А. Шейко и др. // Шахтное строительство. – 1973. – № 10. – С. 9 – 11.
90. Казакевич, Э.В. Определение оптимального технологического режима набрызгбетонирования [Текст] / Э.В. Казакевич, Л.Ф. Жуков, Д.И. Пономаренко // Горный журнал. – 1975. – № 12. – С. 31 - 33.
91. Стрельцов, Е.В. Крепление горных выработок угольных шахт набрызгбетоном [Текст] / Е.В. Стрельцов, Э.В. Казакевич, Д.И. Пономаренко. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
92. Применение местных материалов в строительстве / А.М. Сергеев, Г.Д. Дибров, Е.И. Шмитько и др. – К.: Будівельник, 1975. – 184 с.
93. Дибров, Г.Д. Эффективность применения зол ТЭС в цементных композициях [Текст] / Г.Д. Дибров, А.М. Сергеев // Энергетическое строительство. – 1982. – № 4. – С. 5 – 7.
94. Павленко, С.И. Кассетное производство изделий улучшенного качества с добавкой золы ТЭС [Текст] / С.И. Павленко, Н.И. Федьнин // Бетон и железобетон. – 1974. – № 6. – С. 16 – 18.
95. Афанасьев, Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы [Текст] / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. – К.: Будівельник, 1989. – 128 с.
96. Коваленко, В.В. Изучение антикоррозионных свойств набрызгбетона по отношению к металлу [Текст] / В.В. Коваленко // Науковий вісник НГА України. – 2002. – № 3. – С. 59 – 60.
97. Соловьёв, В.И. Бетоны с гидрофобизирующими добавками [Текст] / В.И. Соловьёв. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1990. – 108 с.
98. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 186 с.
99. Друцко, В.П. Повышение устойчивости горных выработок [Текст] / В.П. Друцко // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 4. – С. 9 – 10.
100. Войтович, В.А. Средства для окрашивания прородированной поверхности черных металлов [Текст] / В.А. Войтович. – М.: ВНИИОЭНГ, 1974. – 53 с.
101. Зинова, Т.Н. Исследование долговечности герметизирующих покрытий [Текст] / Т.Н. Зинова, Г.Т. Галата // Шахтное строительство. – 1978. – № 5. – С. 5 – 7.
102. Коваленко, В.В. Исследование защитного действия набрызгбетонного покрытия на коррозионную стойкость металлической арочной крепи в условиях угольных шахт ГХК «Добропольеуголь» [Текст] / В.В. Коваленко // Вісник

Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2001. – № 2. – С. 364 – 366.

103. Гончаров, В.В. Гидротехнические бетоны [Текст] / В.В. Гончаров. – К.: Будівельник, 1978. – 151 с.

104. Автономов, И.В. Шлакощелочной резистивный материал [Текст] / И.В. Автономов, В.П. Горелов, Г.А. Пугачев. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1989. – С. 46.

105. Фрейман, Л.И. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите [Текст] / Л.И. Фрейман, В.А. Макаров, И.Е. Брыксин; под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 239 с.

106. Эйхенвальд, А.А. Электричество [Текст] / А.А. Эйхенвальд. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1981. – С. 125.

107. Роечко, А.Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.Н. Роечко. – Д., 1995. – 426 с.

108. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – переизд. 1989 – 01 – 01. – М.: Стройиздат, 1988. – 124 с.

109. СНиП II-28-73. Защита строительных конструкций от коррозии. Нормы проектирования [Текст]. – Введ. 1973 – 07 – 12. – М.: Стройиздат, 1974. – 33 с.

110. СНиП 3.04.03-85. Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии. Правила производства и приёмки работ [Текст]. – Введ. 1986 – 07 – 01. – М.: Стройиздат, 1986. – 56 с.

111. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. [Текст]. – Введ. 1986 – 01 – 01. – М.: Стройиздат, 1986. – 56 с.

112. Стрельцов, Е.В. Крепление горных выработок угольных шахт набрызгбетоном [Текст] / Е.В. Стрельцов, Э.В. Казакевич, Д.И. Пономаренко. – М.: Недра, 1978. – 237 с.

113. Максимов, А.П. Тампонаж закрепного пространства капитальных выработок как средство обеспечения их устойчивости [Текст] / А.П. Максимов, В.В. Евтушенко // Уголь Украины. – 1970. – № 8. – С.47 – 48.

114. Мощанский, Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред [Текст] / Н.А. Мощанский. – М.: Госстройиздат, 1962. – 235 с.

115. Скрыль, А.С. Справочник по антикоррозионным работам в строительстве [Текст] / А.С. Скрыль, С.П. Арапов. – К.: Будівельник, 1986. – 192 с.

116. Обеспечение качества крепи горных выработок – неотложная задача / П.Я. Большаков, В.В. Гамаюнов, В.П. Дручко и др. // Уголь Украины. – 2002. – № 12. – С. 19 – 20.

117. Ковалевская, И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка метода расчета их рациональных параметров [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02; 05.15.11 / И.А. Ковалевская. – Д., 1995. – 16 с.

118. Максимов, А.П. Тампонаж горных пород [Текст] / А.П. Максимов, В.В. Евтушенко. – М.: Недра, 1978. – 180 с.

Данные о гранулометрическом составе песков, добываемых на карьерах и комбинатах Донецкой и Днепропетровской областей

Таблица П 1

Гранулометрический состав песка Присяновского каолинового комбината

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	–	–	–
2,5	55	5,5	5,5
1,25	190	19,0	24,5
0,63	345	34,5	59,0
0,315	200	26,0	85,0
0,14	100	10,0	95,0
Дно	50	5,0	100

Песок относится к классу крупных (модуль крупности $M_{кр} = 2,7$). Включения крупных фракций размером больше 5 мм достигает 3,7 %, содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц до 3 %. Песок имеет угловатую форму зерен, их поверхность частично гроховатая. Плотность песка составляет 2,65 т/м³, объемная масса составляет 1,378 т/м³, пустотность 48 %, естественная влажность 6,7 %.

Таблица П 2

Гранулометрический состав песка Краснолиманского карьера (КЛК)

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	–	–	–
2,5	10	1,0	1,0
1,25	40	4,0	5,0
0,63	110	11,0	16,0
0,315	330	33,0	49,0
0,14	440	44,0	93,0
Дно	70	7,0	100

Песок относится к классу мелких (модуль крупности $M_{кр} = 1,64$). Включение фракций размером более 5 мм составляет около 1,5 %. Объемная масса песка в уплотненном состоянии равна 1470 кг/м³, в уплотненном – 1705 кг/м³. Пустотность составляет 31 %. Степень загрязнения весьма незначительна – 0,1 %, влажность 4 %.

Таблица П 3

Гранулометрический состав краснополянского песка

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	–	–	–
2,5	10	1,0	1,0
1,25	35	3,5	4,5
0,63	75	7,5	12,0
0,315	250	25,0	37,0
0,14	500	50,0	87,0
Дно	130	13,0	10,0

Песок отличается низким модулем крупности, то есть $M_{кр} = 1,4$. Объемная масса в естественном состоянии равна 1300 кг/м^3 , пустотность 38 %. Песок имеет илистые, глинистые и пылеватые включения, степень загрязнения высокая, достигает 6 %, влажность равна 5 %.

Таблица П 4

Гранулометрический состав криворожского песка

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	88	4,4	–
2,5	3	0,3	0,3
1,25	24	2,4	2,7
0,63	38	3,8	6,5
0,315	58	5,8	12,3
0,14	753	75,3	87,6
Дно	124	12,4	10,0

Песок мелкий, отличается высокой степенью загрязнения, из-за чего использовать его в качестве заполнителя нежелательно. Включения фракций размером больше 5 мм составляют 4,4 %. Объемная масса равна 1210 кг/м^3 , пустотность 40,5 %, степень загрязнения 10 %.

Таблица П 5

Гранулометрический состав песка шахты «Алмазная»

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	–	–	–
2,5	1	0,1	0,1
1,25	4	0,4	0,5
0,63	55	5,5	6,0
0,315	210	21,0	27,0
0,14	565	56,5	87,6
Дно	165	16,5	10,0

Песок мелкий, почти не имеет включений крупных фракций, загрязнен илстыми, глинистыми и пылеватыми частицами, содержит также комья глины (до 0,9 %).

Гранулометрический состав золошлаковой смеси из отходов, полученных на Углегорской ГРЭС

Отверстия сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
20	40	0,40	0,40
15	–	–	–
10	340	3,40	3,80
5	1120	11,20	15,0
2,5	2760	27,60	42,60
1,25	540	5,4	48,00
0,63	1040	10,40	58,40
0,315	420	4,20	62,60
0,14	2960	29,60	92,20
Дно	780	7,80	100

Золошлаковая смесь имеет более 40 % частиц размером выше 2,5 мм. Включение крупных фракций размером до 20 мм составляет 0,4 %. Эта часть смеси является для растворов крупным заполнителем. Остальная часть – зола уноса. Мелкая фракция размером меньше 1,25 мм составляет почти 45 %.

Результаты испытаний на прочность образцов из цементно-песчаного раствора с добавлением золы уноса

Массовый состав (цемент + зола уноса): песок	Продолжительность выдержки, сутки	Среднее значение прочности на сжатие, МПа
(0,9 + 0,1) : 3	3	6,0
	7	7,0
	14	11,0
	28	13,0
(0,8 + 0,2) : 3	3	3,6
	7	5,5
	14	9,0
	28	10,0
(0,7 + 0,3) : 3	3	2,5
	7	4,0
	14	7,2
	28	11,5
(0,6 + 0,4) : 3	3	2,5
	7	3,6
	14	5,3
	28	6,2
(0,5 + 0,5) : 3	3	1,3
	7	2,5
	14	4,7
	28	5,6

Наукове видання

Коваленко Владислав Вікторович

**ЗАХИСТ МЕТАЛЕВОГО КРІПЛЕННЯ ВІД КОРОЗІЇ З
ВИКОРИСТАННЯМ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ**

Монографія
(Російською мовою)

Редактор О.Н. Ільченко

Підписано до друку 02.03.2012. Формат 30×42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 6,2
Обл.-вид. арк. 8,4. Тираж 300 пр. Зам. № 331.

Підготовлено до друку та видруковано в Державному ВНЗ «Національний гірничий університет». Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК №1842 від 11.06.2004 р.

49027 м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19