

Г. Г. ЛИТВИНСКИЙ, Г. И. ГАЙКО, Н. И. КУЛДЫРКАЕВ

**СТАЛЬНЫЕ  
РАМНЫЕ КРЕПЫ  
ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТОК**

Київ "ТЕХНІКА" 1999

Рекомендовано до видання Вченою радою Донбаського гірнично-металургійного інституту (протокол № 2 від 02.04.99 р.)

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Зборицький М. П. (Донецький державний технічний університет); д-р техн. наук, проф. Шашенко О. М. (Національна гірнична академія України); д-р техн. наук, проф. Зорін А. М. (Інститут геотехнічної механіки АН України)

Литвинський Г. Г., Гайко Г. І., Кулдираєв М. І. Сталеve рамне кріплення гірничих виробок. — К.: Техніка, 1999. — 216 с.

ISBN 966-575-142-5

В монографії викладено основні відомості про застосування конструкцій сталевих рамних кріплень гірничих виробок. Дано аналіз досвіду їх експлуатації, запропоновані методи оцінки стану й прогнозу працездатності, розкрито особливості взаємодії з породним масивом. Розглянуто роботу окремих вузлів та елементів кріплення, технології їх виготовлення, монтажу й повторного використання. Запропоновано способи та засоби керування зусиллями в конструкціях, шляхи підвищення їх працездатності.

Для інженерно-технічних працівників гірничих підприємств, співробітників проектних та науково-дослідних інститутів, а також викладачів, аспірантів та студентів гірничих вузів.

Табл. 30. Іл. 119. Бібліогр.: 156 назв.

В монографии изложены основные сведения о применяемых конструкциях стальных рамных крепей горных выработок. Дан анализ опыта их эксплуатации, предложены методы оценки состояния и прогноза работоспособности, раскрыты особенности взаимодействия с породным массивом. Рассмотрены работа отдельных узлов и элементов крепи, технология их изготовления, монтажа и повторного использования. Предложены способы и средства управления усилиями в конструкциях, пути повышения их работоспособности.

Для инженерно-технических работников горных предприятий, сотрудников проектных и научно-исследовательских институтов, а также преподавателей, аспирантов и студентов горных вузов.

Л 2502010400 - 026  
202 - 99 Замов.

ISBN 966-575-142-5

© Литвинський Г. Г.,  
Гайко Г. І.,  
Кулдираєв М. І.,  
1999

## Предисловие

Стальные рамные крепи являются основным типом крепи, используемой в горной промышленности. В Украине ими поддерживается около 90% горных выработок и в ближайшей перспективе эта цифра заметно не изменится, поскольку с увеличением глубины разработки и усложнением 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 адаптироваться к формоизменению горных выработок без разрушения делает эти крепи одними из самых безопасных.

Вопросам применения и совершенствования стальных крепей уделяется постоянное внимание, о чем свидетельствует неиссякающий поток изобретений и публикаций в периодической печати по этой проблеме. Однако в изданных до настоящего времени работах, в том числе справочниках и монографиях, многочисленные данные разрознены, изложены краткими разделами или устарели, что затрудняет внедрение новых технических решений в этой области. Отсутствуют монографии, обобщающие и систематизирующие накопленный промышленностью опыт и научные исследования по разработке новых и совершенствованию существующих конструкций крепи.

Данная работа основана на выполненных в Донбасском горно-металлургическом институте исследованиях, проводимых по заказам шахт и шахтостроительных организаций в период 1985—1998 гг.

Авторы поставили перед собой цель свести воедино доступную им информацию в области крепления выработок стальными крепями, дополнив ее результатами собственных исследований и считая основным направлением развития стальных крепей не создание многочисленных модификаций известных решений, а разработку нового подхода, реализующего принципы оптимального проектирования конструкций путем управления усилиями в крепи и развития адаптивных свойств ее узлов и элементов.

В первом разделе обобщен опыт эксплуатации крепи, разработана методика объективной оценки ее состояния и прогноза работоспособности. Впервые сформулирован критерий недогруженного состояния крепи,

приведены количественные оценки ее работоспособности в зонах среднего и высокого метаморфизма горных пород.

Второй раздел посвящен проблеме взаимодействия крепи с массивом. Приведены фундаментальные закономерности развития разрушения пород вокруг выработки и вытекающая из них новая классификация проявлений горного давления. Дано определение "малых" и "больших" глубин разработки.

В третьем разделе проанализированы конструкции (около 30) рамной крепи и ее элементы, выявлены основные тенденции их совершенствования. Материал сопровождается подробными справочными сведениями. Авторы сочли возможным в ряде случаев дать свои оценки техническим решениям, не претендуя на бесспорность.

Одной из важных проблем рамного крепления является надежность межрамных ограждений, конструкции и работа которых рассмотрены в четвертом разделе. Предложены новые подходы к повышению работоспособности затяжки, приведены разработанные конструкции податливых (адаптивных) межрамных ограждений.

Пятый раздел освещает способы и средства обеспечения эффективно взаимодействия рамы с массивом пород. Рассмотрены пространственная работа рам, их расклинка, особенности заполнения закрепного пространства, предварительный распор крепи.

В шестом разделе изложены разработанные авторами способы повышения несущей способности крепи и снижения ее материалоемкости путем управления усилиями в конструкции рамы.

Седьмой раздел содержит сведения о технологии изготовления, возведения, ремонта и повторного использования рамной крепи. Дано описание машин, механизмов и приспособлений для осуществления этих технологических процессов. Приведены рекомендации по ведению текущего и капитального ремонта крепи.

Авторы выражают признательность работникам научных и производственных организаций, способствовавших выходу в свет этой книги, и с благодарностью примут все пожелания и критические замечания по существу изложенного ниже материала.

Отзывы просим направлять по адресу: 349104 г. Алчевск Луганской обл., пр. Ленина, 16, ДГМИ, каф. "Строительство шахт и подземных сооружений".

*Арка из спецпрофиля справедливо считается одним из лучших конструктивных решений, однако было бы ошибочным считать это решение универсальным.*

*Проф. Максимов А. П.*

## 1. Общие сведения и опыт применения стальных рамных крепей

### 1.1. Краткий исторический экскурс

Вся деятельность человека, начиная с глубокой древности и до настоящего времени тесно связана с освоением недр, в котором вопросы проведения и крепления выработок имеют первоочередное значение. Уже с V-IV тысячелетия до н. э. для предотвращения обрушения подземного сооружения применяется крепь, сперва в виде деревянных распорок (стоек), а позже, для повышения безопасности и функциональности выработки, — в виде сочетания стоек с поперечиной (верхняком) [1.1]. Долгое время рамные крепи, как и обычные строительные конструкции, возводились на основании накопленного опыта (так называемый «метод аналогий»). В 1550 г. один из основоположников горной науки Георг Агрикола (1494—1555) в книге «О горном деле и металлургии» [1.2] описывает рамную деревянную крепь штолен (рис. 1.1), состоящую из двух вертикальных стоек (А), заглубленных в почву выработки, верхняка (В), лежня (С) и затяжки (Е). На основании эмпирических данных рекомендует надежную толщину несущих элементов и расстояние между рамами.

Развитие теории механики в XV-XVII вв. позволило обосновать расчетные методы проектирования строительных конструкций. Наиболее сложную проблему работы свода арки (рис. 1.2) одним из первых исследовал Леонардо да Винчи (1452—1519), но его труд не был опубликован и долгое время пребывал в забвении [1.3]. Галилео Галилей (1564—1642) первым рассмотрел работу балки на изгиб, априори приняв распределение напряжений одного знака по всей высоте сечения. Эдм Мариотт (1620—1684) исправил его ошибку, указав, что при изгибе имеют место напряжения двух знаков — растяжения и сжатия. Роберт Гук (1635—1703) сформулировал основополагающий закон линейной зависимости между внешней нагрузкой, действующей на тело, и его деформациями. Работы Галилея и Мариотта были связаны с определением предельной нагрузки, к чему вернулись исследователи в начале XX в.

Однако методы строительной механики, позволяющие эффективно проектировать строительные конструкции, оказались лишь частично применимы к подземным сооружениям, поскольку нагрузка на шахтную крепь зависит от изменчивости свойств горного массива и особенностей ее взаимодействия с окружающими породами. Научные основы проектирования крепи разрабатывались проф. М. М. Протодяконовым в начале XX в. и получили интенсивное развитие во второй его половине благодаря достижениям механики горных пород.

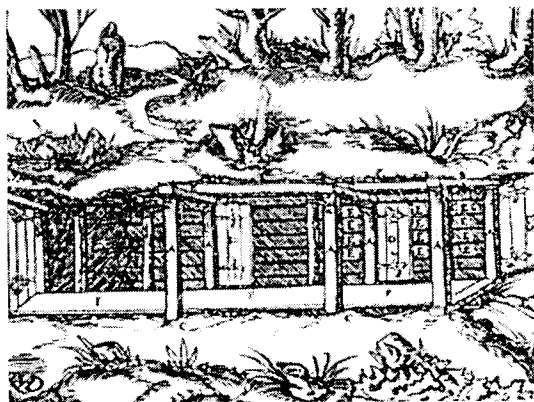


Рис. 1.1. Рамная деревянная крепь штолен времен Г. Агриколы

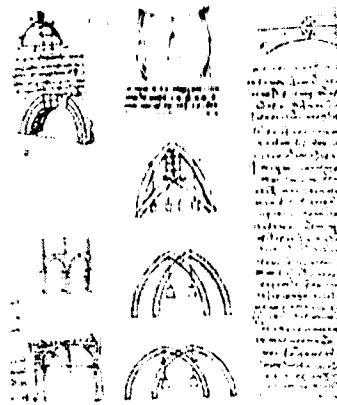


Рис. 1.2. Фрагмент рукописи Леонардо да Винчи «Исследование прочности арок»

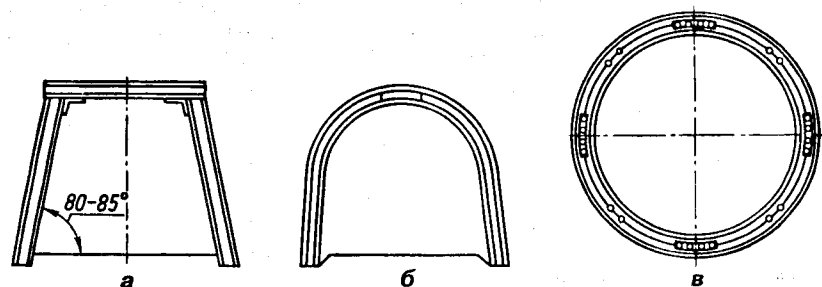


Рис. 1.3. Стальные жесткие крепи: а — трапециевидная; б — арочная; в — кольцевая

В 40-х годах XIX в. началось промышленное производство металлопроката, чуть позже появляются стальные рамные крепи на шахтах Германии и Чехии. Первоначально в горных выработках использовали жесткие рамы из стального двутаврового профиля или рельса (рис. 1.3). Однако значительные смещения породного контура приводили к недопустимым деформациям крепи и необходимости ее ремонта, поскольку жесткая конструкция может приспособиться к смещению пород только ценой остаточной деформации с последующим разрушением элементов рамы. Это обстоятельство дало основание в начале XX в. считать металлические конструкции непригодными для крепления горных выработок [1.4]. Впоследствии совершенствование стальных рамных крепей шло по пути увеличения их работоспособности и приспособления (адаптации) к формоизменению сечения выработки.

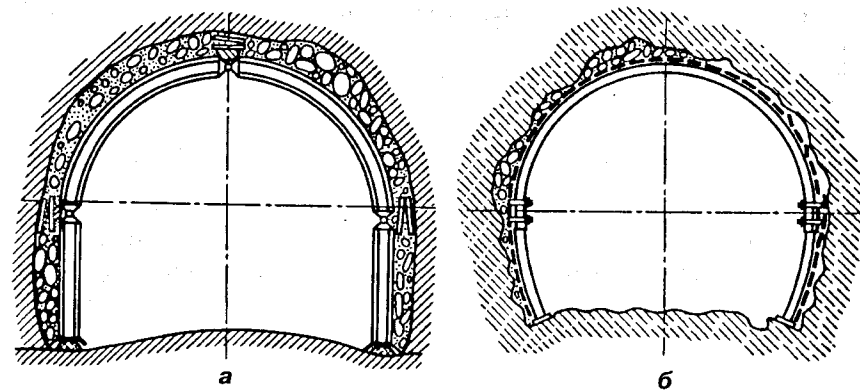


Рис. 1.4. Развитие стальных рамных крепей: а — шарнирная крепь фирмы Ф.Моля; б — податливая крепь фирмы Туссен-Хайнцман

На первом этапе (1924 г.) в конструкцию стальной арочной крепи были введены дополнительные шарниры (рис. 1.4, а), позволившие снизить неравномерность распределения внешних нагрузок за счет их передачи на окружающие крепь породы. Особая заслуга по внедрению шарнирных арок принадлежит фирме «Ф.В. Моль и сыновья» [1.5], благодаря которой в 30—40-е гг. стальная рамная крепь находит массовое применение на угольных шахтах Рура.

В 1932 г. фирма «Туссен-Хайнцман» (Германия) разрабатывает парные желобчатые профили различных типоразмеров и удачную конструкцию их соединений. Благодаря этому рамная крепь стала податливой и, сохранив свои функции, получила возможность «уходить» от горного давления без разрушения, приспособляясь к смещениям породного контура. После второй мировой войны податливые крепи (рис. 1.4. б) получают широкое распространение в большинстве промышленно развитых стран. К концу 50-х годов стальной рамной крепью поддерживалось в Германии 50% всех горных выработок, во Франции — более 60, в Англии — более 70, в Бельгии — до 90%.

В эти же годы началось широкое использование стали для крепления выработок на шахтах бывшего СССР (впервые промышленные испытания проведены в 1947 г.). Большой вклад в разработку стальной рамной крепи внесли отечественные научные школы, возникшие на базе горных вузов и отраслевых институтов. Первоначально работы по ее конструированию и внедрению были сосредоточены в ДонУГИ (г. Донецк). Здесь были разработаны параметрический ряд взаимозаменяемых спецпрофилей, особые стали для крепи, созданы нормативные материалы по изготовлению и применению податливых крепей типа АП (Комиссаров М. А., Зигель Ф. С. и др.). Важные исследования по изучению взаимодействия

крепей с массивом и определению нагрузок на крепь проведены проф. За-славским Ю. З.

В ИГД им. А. А. Скочинского (г. Люберцы) под руководством проф. Гелескула М. Н. и проф. Киселева Е. С. изучены вопросы повышения производительности труда и экономии металла на горноподготовительных работах, созданы новые стальные податливые крепи типа МПК, МИК с кулачковыми и клиновыми узлами податливости. Научной школой проф. Каретникова В. Н. и Клейменова В. Б. (ТулГУ, г. Тула) разработаны методы расчета крепи как пространственной системы, новые элементы усиления конструкций, улучшенный спецпрофиль СВПУ и др. Оригинальные исследования проведены в С.-Петербургском ГГУ проф. Смирняковым В. В., который одним из первых создал шарнирно-податливый узел и разработал крепи повышенной податливости. При освоении Западного Донбасса, где выработки проходили по слабым размокающим породам, заметный вклад в развитие конструкции и технологии возведения крепи внесли ученые г. Днепропетровска: проф. Максимов А. П. (НГА Украины), проф. Пиньковский Г. С. (Днепрогипрошахт), проф. Усаченко Б. М. (ИГТМ АН Украины) и др. Нормативные материалы по расчету и применению крепи в горных выработках разработаны во ВНИМИ (г. С.-Петербург) и НИИОМШС (г. Харьков). Задача снижения расхода металла в стальных рамных крепях путем применения анкеров решена в КузНИИшахтострое проф. Ерофеевым Л. М. (г. Кемерово). Проблема управления усилиями в рамных крепях с целью достижения их равнопрочности и повышения работоспособности исследовалась в ДГМИ (г. Алчевск).

Многочисленные разработки по созданию и совершенствованию отдельных элементов крепи, особенно узлов податливости, проведены многими исследователями в НГАУ (г. Днепропетровск), КрТУ (г. Кривой Рог), ДонГТУ (г. Донецк), КузГТУ (г. Кемерово), КНИУИ (г. Караганда) НИИОГР (г. Пермь) и др.

Исследование «линии жизни» [1.6] технической системы стальной рамной крепи за последние 30 лет — анализ объемов и области ее применения,

количества выпускаемых конструкций, изобретений, продлевающих срок эксплуатации системы, и др. — позволяет сделать вывод об ее S-образном характере во времени (рис. 1.5), т. е. система уже прошла исходный этап быстрого совершенствования и последующий этап стабильного роста, темпы ее развития начинают спадать, хотя объемы применения еще достаточно высоки. В дальнейшем, в соответствии с законом «жизни» технических сис-

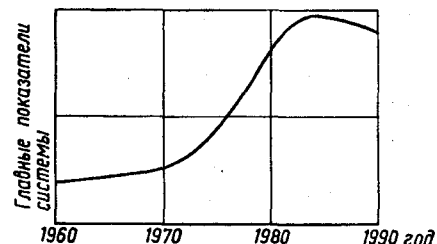


Рис. 1.5. «Линия жизни» технической системы стальной рамной крепи (данные по бывшему СССР)

тем [1.7], стальная рамная крепь либо вытеснится принципиально иной системой (анкерные, породонесущие конструкции и др.), что в ближайшие 10 — 20 лет маловероятно из-за высокой инерционности развития горной промышленности, либо перейдет на существенно более высокий уровень своего технического развития.

## 1.2. Опыт использования и анализ состояния основных видов крепи

В 80-х годах на шахтах Украины проводилось до 3 тыс. км горных выработок, а общая протяженность поддерживаемых выработок составляла около 16 тыс. км в год. В условиях шахт Донецкого угольного бассейна в выработках различного назначения и срока службы применялось до 100 типов и подтипов крепи [1.8], в большинстве случаев — ограниченного (в пределах одного-двух опытных участков) применения. Объемы использования основных видов крепи по данным [1.8] и общие сведения по их состоянию приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Объемы применения основных типов шахтной крепи

Крепи	Объем применения, %	Деформировано, % объема	Отремонтировано, % деформированных
Бетонная	5,9	35	28
Металлобетонная	8,6	56	40
Стальная жесткая	5,3	90	60
Стальная податливая	52,3	40	60
Набрызг железобетонная	6,4	72	30
Смешанная	7,6	32	40
Комбинированная	1,8	—	—
Анкерная	0,8	—	—
Набрызг-бетонная	0,8	—	—
Деревянная	7	30	25
Прочие	3,5	52	10
Из них:			
замкнутые	4	90	20
незамкнутые	96	49	36

Анализ табличных данных показывает, что наиболее распространенной является стальная податливая крепь (52,3 %), за ней следуют металлобетонная (8,6 %) и смешанная (7,6 %). Удельный вес остальных конструкций, в том числе таких перспективных, как анкерная и набрызг-бетонная, незначителен. Такое положение обусловлено, с одной стороны, простотой конструкции и универсальностью применения стальной крепи, а с другой — «невосприимчивостью» угольной отрасли к новым

техническим решениям, требующим применения наукоёмкой технологии и высокой профессиональной квалификации исполнителей.

Если сравнить крепи по проценту деформированных, что отражает надежность их работы в выработке, то оказывается, что несмотря на установку стальной крепи в самых неблагоприятных условиях ее показатель эксплуатационной надежности уступает только показателям смешанной, бетонной и деревянной крепи. Однако надо иметь в виду, что указанные типы крепи используют, как правило, в более благоприятных условиях, где проявления горного давления незначительны. По показателю ремонтпригодности стальная податливая крепь превосходит все остальные конструкции, и ее широкое применение оправдано с точки зрения эксплуатационных качеств. Другие типы крепи используют там, где стальная крепь нецелесообразна (в долговременных капитальных горных выработках, в условиях высокой агрессивности подземных вод, при повышенных требованиях к водо- или газонепроницаемости конструкции, ее аэродинамическому сопротивлению и др.).

Представляют интерес данные [1.8—1.10], в которых проводится технико-экономический анализ различных применяемых конструкций шахтной крепи, отраженный в табл. 1.2.

Таблица 1.2 Техничко-экономические показатели шахтных крепей

Крепь	Относительная стоимость крепления 1 м <sup>2</sup> площади в свету*	$C_m/q_T$ **	Увеличение размеров выработки, %	Трудоемкость крепления 1 м <sup>2</sup> площади в свету, чел.-мин	Трудоемкость ремонта 1 м <sup>2</sup> площади в свету, чел.-мин	Объем извлечения, %
Стальная податливая	1,0	5,15	20	32	20	70
Деревянная	0,35	6,0	25	24	23	20
Блочная и тюбинговая	1,14	7,3	30	41	32	—
Бетонная	1,19	6,15	30	46	18	—
Металлобетонная	1,74— 2,83	15	35	106	40	10
Набрызг-бетонная	0,33— 0,44	3,5	8	10	—	—
Анкерная	0,33— 0,44	3,97	8	12	—	10

\* Стоимость крепления отнесена к стоимости стальной податливой крепи.

\*\* Отношение стоимости крепежного материала ( $C_m$ ) к технической несущей способности крепи ( $q_T$ ).

По стоимости крепления 1 м<sup>2</sup> площади выработки в свету наиболее выгодны анкерные и набрызг-бетонные крепи, которые дешевле арочной

податливой (базовой) в 2—3 раза, хотя область их самостоятельного применения в угольной промышленности весьма ограничена. Остальные крепи, если не рассматривать деревянную из-за ее малоперспективности и повывисшейся в последнее время стоимости, заметно уступают по этому показателю стальной податливой крепи, и это несмотря на ошибки по ее проектированию и эксплуатации. К сожалению, рассматриваемый во многих исследованиях показатель  $C_m/q_T$  не вполне учитывает взаимодействие крепи с массивом, поскольку сама по себе «техническая несущая способность» значительно различается в зависимости от принятой расчетной схемы и фактического распределения внешней нагрузки со стороны пород на крепь. Поэтому более правильно было бы использовать реальную несущую способность крепи в данных горно-геологических условиях. Тем не менее, по этому показателю стальная податливая крепь уступает только малораспространенным в угольной промышленности анкерной и набрызг-бетонной крепям. То же касается и других технологических показателей. Таким образом, с позиций стоимости и надежности работы стальной рамная крепь является в настоящее время вполне конкурентоспособной конструкцией.

С увеличением глубины и усложнением горно-геологических условий разработки в горной промышленности многие страны пошли по экстенсивному пути повышения несущей способности крепи за счет использования тяжелых профилей. Так, по данным [1.11], всего за три года (с 1980 по 1983 гг.) в бывшем СССР произошло существенное изменение структуры применения специального взаимозаменяемого профиля СВП (табл. 1.3).

Спецпрофиль СВП-14 еще до 80-х годов вышел из применения, удельный объем использования спецпрофиля СВП-17 снизился более чем в четыре раза, тогда как применение тяжелых спецпрофилей увеличилось в три раза. Именно этим и было обусловлено резкое увеличение расхода металлопроката (до 30 %) при почти таком же объеме проведения горных выработок, что привело к их значительному удорожанию. В последующие годы эта тенденция сохранилась, и уже в начале 90-х годов в угольной промышленности почти не применялись спецпрофили СВП-17 и СВП-19. Оставшиеся типоразмеры стали повсеместно использоваться для всех горных выработок и горно-геологических условий, что

Таблица 1.3. Объемы применения спецпрофилей СВП различной массы (1980 г./1983 г.)

Тип спецпрофиля	Объем применения	
	тыс. т	% общего объема
17	66,7/21,3	20/4,8
19	100/111,4	30/25,4
22	138/189	41,6/42,5
27	22,2/6,7	6,7/21,5
33	5,6/1,7	1,7/5,8
Всего	333/443	100/100

привело к нерациональному использованию стального проката при креплении, повышению трудоемкости работ, стоимости сооружения выработок и, в конечном счете, повышению себестоимости угля.

В 1991 г. Украина использовала на крепление горных выработок 550 тыс. т нового металлопроката, в выработках находилось около 7 млн т металлокрепления, из 16 тыс. км поддерживаемых выработок 12 тыс. км были закреплены металлом [1.12].

С 1994 г. при значительном сокращении объемов проведения горных выработок и заметно возросшем повторном использовании восстановленной крепи расход нового стального проката снизился до 150 тыс. т. Однако тенденция увеличения удельного объема применения стальных крепей, особенно из тяжелых типов спецпрофилей, сохраняется. При новом строительстве шахт и горизонтов их распространение достигает 80 %, а в подготовительных выработках — более 90 %. На угольных шахтах России, Германии, Великобритании, Чехии и Польши стальные крепи также являются основными, наиболее широко используемыми конструкциями [1.13—1.17].

Широкую область применения стальной крепи в угольной промышленности можно объяснить ее определенными достоинствами, в первую очередь, работой в податливом режиме с возможностью регулирования степени податливости (от 300 до 1000 мм и более), что делает эту крепь уникальной. Удачно выбранная форма и типоразмерный ряд специального взаимозаменяемого профиля позволяют обеспечить простоту его прокатки, удобство изготовления элементов крепи различных типоразмеров на рудоремонтных заводах отрасли и в механических цехах шахт.

В податливой крепи достигнуто удачное сочетание несущей способности профиля и сопротивления податливости, которые примерно равны. Последнее обеспечивается за счет клинового эффекта от вложенных друг в друга профилей СВП при достаточно простой конструкции их соединения. Обычно достигаемое сопротивление податливости крепи в пределах 40—60 кПа в большинстве случаев достаточно для удержания возникающих над крепью сводов обрушения. В случае работы крепи за пределами эксплуатационного режима ее остаточная несущая способность полностью не исчерпывается, нагрузка за счет запредельного деформирования элементов перераспределяется по периметру крепи и большая часть сечения выработки сохраняется. Смещения элементов крепи происходят достаточно плавно, без резкой потери устойчивости и внезапных разрушений, что позволяет считать ее одной из самых безопасных. Стальная податливая крепь наиболее устойчива к сейсмическим нагрузкам и, как показали исследования [1.18], без разрушений выдерживает скорость колебания породного массива 125—150 см/с, что превосходит возможности других конструкций в 4—6 раз. Она даже в деформированном состоянии ремонтпригодна. Ее можно усиливать, заменять отдельные рамы, извлекать и перекреплять на большом протяжении. Извлеченные элементы крепи допускают восстановление и повторное использование, что значи-

тельно снижает издержки производства. Стальная крепь частично сохраняет свою работоспособность даже при ошибках проектирования и монтажа, что свидетельствует о ее высоких адаптивных возможностях. При проектировании паспортов крепления повсеместно используют типовые решения, предложенные в нормативных документах, что способствует ее массовому применению, при снятии ответственности с исполнителей за отказы или недогруженное состояние крепи.

В то же время, как показывает длительный опыт применения, стальные рамные крепи имеют ряд существенных недостатков. Прежде всего следует отметить их неудовлетворительную работу в условиях значительной неравномерности распределения горного давления по контуру крепи и вдоль выработки. Как правило, при проведении выработок буровзрывным способом переборы породы достигают 20 % и более вместо допустимых по нормам 5—7 % [1.19]. Кроме этого, размеры закрепного пространства должны быть увеличены в кровле выработки на размер монтажного зазора (10—15 см), позволяющего «накинуть» верхник на стойки. Это ведет к дополнительной выемке 0,3—0,5 м<sup>3</sup> породы на 1 м выработки. Отсутствие контакта установленной рамы с массивом пород ведет к беспрепятственному (со стороны крепи) и потому ускоренному росту зоны неупругих деформаций. При этом происходит формирование повышенной односторонней нагрузки на крепь, что может служить причиной ее отказов. Обеспечить удовлетворительный контакт крепи с окружающими породами можно лишь путем тщательного оконтуривания выработки при буровзрывных работах и плотной забутовки закрепного пространства, что при проведении выработок на шахтах наблюдается крайне редко.

Однако даже при правильной установке крепи часто наблюдается несовпадение направления главных смещений пород с направлением ее податливости. Если угол рассогласования превышает 10—15°, происходит нарушение нормальной работы узлов податливости. При этом узел податливости со стороны падения заклинивает и происходит увеличенное проскальзывание второго узла с одновременным его деформированием из-за повышенных изгибающих моментов, чем и объясняется часто наблюдаемый разрыв скоб и отрыв днища спецпрофиля в стойках. Запас податливости крепи при такой ее деформации существенно снижается, что повышает вероятность изгиба и кручения ее элементов.

Большинство применяемых на практике узлов податливости несовершенны. Им присущи неравномерность сопротивления податливости, скачкообразное проскальзывание элементов крепи при предельных нагрузках, отсутствие возможности регулирования сопротивления податливости, плохое восприятие действующих в крепи изгибающих моментов, опасное снижение сопротивления податливости в процессе эксплуатации за счет «обтяжки» (пластического деформирования) скоб, сложность и трудоемкость монтажа и др. Поэтому рамная крепь с существующими узлами податливости работает, как правило, не в оптимальном режиме

взаимодействия с массивом, что значительно снижает ее работоспособность и эксплуатационные характеристики.

Нельзя считать удовлетворительно решенным вопрос о конструкции и месте установки межрамных связей (стяжек) в рамных креплениях. Несмотря на обилие их конструктивных решений, они не всегда обеспечивают устойчивость крепи к динамическим нагрузкам при ведении взрывных работ и снижении изгибно-крутильных деформаций профиля из плоскости крепи оказывают слишком большое удельное давление на участках своего опирания, и существующие конструктивные меры по повышению сопротивления вдавливания в почву (приваренные диафрагмы) оказываются явно недостаточными. Это особенно характерно для пород со слабым метаморфизмом (шахты Лисичанска, Первомайска, Стаханова, Западного Донбасса и др.). Крезь без принятия особых мер (лежни, опоры, обратные своды) быстро оказывается «задавленной» в породы почвы даже невысоким давлением на верхняк, что создает эффект ложного пучения, вынуждая производителей принимать неверные решения по подрывке пород почвы.

Значительное ограничение на сроки эксплуатации крепи накладывает коррозия металла, особенно высокая в шахтной влагонасыщенной среде с интенсивным обменом воздуха. Скорость разрушения поверхностного слоя металла в агрессивных шахтных средах достигает до 0,2—0,54 мм в год [1.20]. Коррозия ежегодно разрушает 5—7 % массы крепи [1.12]. Поэтому для увеличения срока службы крепи и расширения области ее применения в обводненных горных выработках необходима антикоррозийная защита металла, предусматривающая улучшение сталей и их антикоррозионные покрытия (битумные и каменноугольные лаки, органосиликатные, полимерные и другие покрытия). Достаточно высокое аэродинамическое сопротивление рам вентиляционной струе повышает общешахтную депрессию, что может стать источником больших издержек производства при установке рамной крепи в главных вентиляционных выработках.

Оценивая оптимальность конструкции крепи в целом, можно отметить существенное различие напряженного состояния элементов крепи по ее периметру. В частности, наиболее напряженными (вплоть до исчерпания запаса прочности) участками в крепи на пологом падении пород являются элементы, расположенные со стороны наибольших смещений кровли, тогда как остальные участки имеют излишний запас прочности. Это свидетельствует о нерациональном использовании материала в конструкции, поскольку все ее элементы выполнены из одинакового спецпрофиля и большая их часть оказывается недогруженной даже в момент разрушения крепи. Оптимальным является такое распределение усилий и материала, когда все участки работают с одинаковым запасом прочности (или равноудалены от предельного состояния). Однако достижение этой цели требует изменения конструкции и управления усилиями в ней в соответствии с конкретным распределением внешней нагрузки и контакт-

ных условий взаимодействия с массивом, что требует качественного информационного обеспечения проектных решений.

Степень достижения оптимальности в каждой конструкции можно определить с помощью критерия оптимальности

$$K_0 = \int_0^s \frac{\sigma_i}{[\sigma]} ds \leq 1, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_i$  и  $[\sigma]$  — соответственно действующие и допустимые (предельные) напряжения в  $i$ -м сечении;  $s$  — периметр крепи.

Чем ближе значение  $K_0$  к своему пределу, тем оптимальнее конструкция. Данный критерий позволяет сравнивать различные крепи, давая численную оценку эффективности использования в ней материала. По критерию оптимальности наиболее выгодна анкерная крепь, в которой  $K_0$  приближается к единице, тогда как в стальной арочной крепи  $K_0 = 0,2 \div 0,4$ , что говорит о наличии резервов по ее значительному усовершенствованию. Этого можно достичь с помощью «гибких» (адаптивных) решений по управлению усилиями в конструкции, учитывающих особенности изменения внешней нагрузки вдоль выработки и по периметру рамы.

Основной причиной, сдерживающей темпы проходки (особенно при комбайновом способе проведения) и повышающей стоимость выработок, является трудоемкий ручной процесс их крепления. В проходческом цикле при комбайновом проведении выработки операции по возведению арочной крепи занимают до 50—75 % времени. Процесс крепления является одним из наименее механизированных. Если степень механизации буровых работ достигает 75 %, а уборки породы — до 70 %, то при возведении рамных крепей она не превышает 10—20 %. Значительные затраты времени приходятся на операции по соединению элементов крепи, установке распорок и межрамных связей, ориентации рам по направлению выработки, расклиниванию крепи, установке затяжки и заполнению пустот за крепью. Большинство из этих работ практически невозможно механизировать. Поэтому весьма актуален при разработке новых рамных крепей поиск решений, снижающих удельный вес ручного труда. Например, для решения этой задачи ДонУГИ при разработке арочной пятизвенной крепи предложен верхняк крепи, выполняющий одновременно несущую, ограждающую и связывающую функции [1.21]. Одним из интересных решений является предложенная С.-Пб. ГГУ складывающаяся крепь [3.24], рамы которой собирают на поверхности или в выработке на некотором расстоянии от забоя, затем в сложенном виде доставляют в забой, где устанавливают с помощью крепеукладчика или лебедки. Возможность трансформирования рамы обеспечивают введенные в конструкцию дополнительные шарниры. Тем не менее, существенно повысить степень механизации в традиционных рамных креплениях пока не представляется воз-



можным из-за многооперационности процесса крепления и его технологических особенностей в зависимости от условий проходки.

Несмотря на податливый режим работы и высокую работоспособность, а также применение тяжелых типоразмеров спецпрофиля, эксплуатационное состояние крепи на многих шахтах является неудовлетворительным. Различные исследователи приводят разные сведения об объемах деформированных крепей в выработках. Так, по данным проф. И. Г. Коскова [1.22] на шахтах Донбасса крепи деформированы в более чем 50 % выработок, по данным проф. К. В. Кошелева [1.8] деформировано 40 % стальных податливых крепей, по результатам обследований горных выработок, проведенных авторами на шахтах Луганской области [1.23], — около 30%. Разброс значений объясняется как объемами и «географией» статистических данных, так и различиями методик обследования и оценок состояния крепи. До настоящего времени остается неизученным вопрос об удельном объеме недогруженных рам крепи в различных горно-геологических условиях (так называемая проектная ошибка первого рода).

С учетом того, что далеко не все деформированные выработки ремонтируются, ежегодные объемы перекреплений тем не менее составляют 8—10 % протяженности поддерживаемых выработок, а на их ремонте занято 11 % всех подземных рабочих [1.24]. Основными причинами неудовлетворительного состояния крепей являются несоответствие горнотехнических условий их применения техническим показателям конструкции, проектирование в условиях неопределенности прогноза проявлений горного давления, недостаточно высокое качество их изготовления, возведения и эксплуатации.

Рассмотренные недостатки стальной рамной крепи отнюдь не исключают ее неоспоримых достоинств, обеспечивающих эксплуатационную устойчивость выработки в условиях, где другие крепи менее эффективны при значительных смещениях породного контура выработки, в большом вероятностном разбросе величин и направлениях внешних нагрузок. К наиболее перспективным направлениям повышения ее эффективности следует в первую очередь отнести достижение равнонапряженности основных элементов конструкции, снижение их массы, улучшение условий контактирования с породным обнажением, обеспечение податливого режима взаимодействия с массивом с предельным отпором, упрощение отдельных узлов и элементов, снижение трудоемкости процессов крепления. Следует пересмотреть действующие нормативные материалы по определению нагрузки на крепь и разработке паспортов крепления, которые не соответствуют современному уровню науки о горном давлении.

Постоянно ведущиеся исследования в области механики горных пород и крепления дают основание надеяться, что следующий этап развития стальных рамных крепей приведет к значительному снижению издержек производства, трудовых и материальных затрат при проведении горных выработок.

### 1.3. Шахтные наблюдения и прогноз работоспособности

#### 1.3.1. Оценка работоспособности конструкции

Накопление и систематизация сведений об условиях поддержания горных выработок и состоянии крепи дают возможность сопоставить проектные решения с фактическим опытом эксплуатации, позволяют решать задачи, связанные с оптимизацией и выбором эффективных параметров крепи, принимать обоснованные решения по их усилению и ремонту.

Несмотря на многочисленность трудоемких обследований состояния выработок, наблюдается большое разнообразие в методах исследований и обобщении результатов натурных замеров. До настоящего времени нет общепринятых методик шахтных обследований, не выработаны общие подходы к трактовке различных состояний крепи.

В большинстве случаев [1.25—1.27 и др.] оценка работоспособности крепи состоит в отнесении ее к двум взаимоисключающим состояниям:

надежной работе крепи (деформации незначительны и не представляют помех для нормального функционирования выработки);

отказам крепи (опасные деформации, ведущие к разрушению крепи и требующие ее ремонта).

Однако такой подход является слишком упрощенным, снижает достоверность прогнозных моделей и не позволяет учесть переходные состояния крепи, по которым можно было бы принимать инженерные решения без риска допустить значимую ошибку. Проф. Смирняковым В. В. предложены уточненные категории состояния крепи [1.28]:

1 — устойчивое: деформации крепи отсутствуют или встречаются в виде единичных мелких нарушений случайного характера;

2 — средней устойчивости: существующие отдельные деформации крепи не развиваются во времени и не представляют помех для нормального функционирования выработки;

3 — удовлетворительное: деформации крепи носят систематический характер, но не опасны для работающих людей и машин; выработка выполняет свое назначение, перекреплений не требуется;

4 — неустойчивое: деформации крепи препятствуют нормальной эксплуатации выработки, требуется ремонт и перекрепление отдельных участков;

5 — аварийное: эксплуатация невозможна, имеются вывалы пород с кровли и боков, существует реальная опасность крупных обрушений.

Г. Бушман (ФРГ) также рекомендует пять категорий оценки состояния элементов крепи: отсутствие деформации, небольшие деформации, сильные деформации, небольшие разрушения, сильные разрушения [1.29]. Существуют и другие подобные классификации, основанные на визуальных признаках взаимодействия крепи с массивом. Они нашли широкое использование благодаря своей простоте, доступности и нагляд-

ности и позволяют оперативно исследовать большое число выработок (один специалист за смену может обследовать до 20 штреков [1.29]). Основная цель методик обследования — принять решение о необходимости ремонта или перекрепления выработки. Однако они носят субъективный характер, поскольку не опираются на четко сформулированные численные критерии, что делает полученные на их основе рекомендации недостаточно достоверными и зависящими от личностных предпочтений и опыта специалиста.

Основной недостаток существующих классификаций — отсутствие весьма важной и информативной категории, характеризующей степень «недогруженного» состояния крепи. Действительно, практика обследования выработок свидетельствует о довольно распространенных случаях, когда несущая способность установленной крепи значительно превышала уровень действующих на нее нагрузок, причем в некоторых случаях нет контакта крепи с массивом горных пород по ее периметру на протяжении всего срока службы выработки. Следовательно, такая крепь выполняет не грузонесущую, а лишь ограждающую функцию, и ее запас прочности чрезмерен. Как известно, излишний запас прочности конструкции ведет к перерасходу трудовых и материальных затрат и является резервом ресурсосбережения при сооружении выработок.

Поэтому классификация состояний крепи должна в качестве обязательной включать новую категорию, характеризующую степень «недогруженности» крепи и содержать как минимум три базовые (главные) категории:

недогруженное состояние: усилия и деформации в конструкции далеки от предельных значений;

нормальная работа: усилия и деформации соответствуют условиям нормальной эксплуатации крепи;

неустойчивое состояние (отказы): деформации перешли в предельную стадию.

Дальнейшая детализация состояний крепи может производиться в рамках этих основополагающих категорий, а численным критерием состояния крепи в самом общем случае целесообразно принять комбинацию коэффициентов запаса прочности  $K_{з.п}$  и запаса деформационной способности (податливости)  $K_{з.д}$  конструкции в целом. В самом общем случае эти коэффициенты можно определить так:

$$K_{з.п} = [S]/S, \quad (1.2)$$

где  $[S]$  и  $S$  — соответственно, допустимая и действующая нагрузки на крепь;

$$K_{з.д} = [U]/U, \quad (1.3)$$

где  $[U]$  и  $U$  — соответственно, допустимая и фактическая деформации крепи.

Предлагаемая классификация состояния податливой крепи на основе предложенных численных критериев выглядит следующим образом:

недогруженное состояние:  $K_{з.п} > 1$  и  $K_{з.д} > 1$ ;

нормальная работа:  $K_{з.п} = 1$  и  $K_{з.д} > 1$ ;

неустойчивое состояние (отказы):  $K_{з.п} < 1$  или  $K_{з.д} < 1$ .

Такая классификация не нуждается в дальнейшей детализации, поскольку состояние податливой конструкции будет полностью описываться численными значениями критериев запаса. Для жестких конструкций классификация включает только один численный показатель — коэффициент запаса прочности  $K_{з.п}$ , так как деформация жесткой крепи недопустима и приводит к отказу. Отметим, что режим податливости с возрастающим сопротивлением не вполне эффективен, поскольку крепь работает ниже своей предельной грузонесущей способности до момента исчерпания запаса податливости, что снижает ее работу по сопротивлению смещениям пород.

Следовательно, исходя из приводимых теоретических обоснований, жесткие конструкции могут характеризоваться только двумя состояниями — недогруженным и отказом по критерию запаса прочности. Крепи возрастающего сопротивления характеризуются такими же состояниями, но по критерию запаса деформационной способности  $K_{з.д}$  (податливости). Состояние нормальной работы конструкции в жестком и возрастающего сопротивления режимах вырождается в точку на графике деформационно-силовой характеристики крепи, т. е. этот этап ее работы является ничтожно малым по сравнению с остальными (подробнее см. раздел 2).

Однако практическая реализация классификации, основанной на численных значениях критериев запаса прочности и деформационной способности, наталкивается на значительные трудности, связанные с измерением и расчетом действующего и допустимого напряженных и деформационных состояний крепи. Это требует достоверного инструментального определения большого числа исходных данных о свойствах пород, горном давлении, параметрах взаимодействия крепи с массивом и т. д., что само по себе представляет достаточно сложную и до сих пор нерешенную проблему механики подземных сооружений. Поскольку определение численных значений коэффициентов запаса в большинстве случаев затруднительно, приходится прибегать к косвенным критериям, условно связанным с теоретическими и позволяющим дать с той или иной степенью достоверности представление о состоянии крепи. При этом если о деформированном состоянии крепи достаточно просто судить путем визуального обследования выработок, то оценить уровень действующих напряжений можно приближенно, фиксируя некоторые косвенные признаки поведения крепи под нагрузкой. Искусство исследователя заключается в умелом выборе таких критериев работоспособности, которые с достаточной степенью достоверности, с одной стороны, и доступности и простоты, с другой, позволяют судить о состоянии крепи.

Для разработки простого и доступного метода оценки состояния крепи и получения объективных данных о ее работоспособности необходимо выделить наиболее важные показатели, отражающие результат взаимо-

действия конструкции с массивом и достаточно полно характеризующие ее основные эксплуатационно-технологические характеристики (табл. 1.4).

Таблица 1.4. Критерии работоспособности стальной рамной крепи

Критерий работоспособности	Недогруженное состояние	Нормальная работа	Неустойчивое состояние (отказ)
Смещения элементов крепи в узлах податливости, мм	Менее 50	50—300	Более 300
Прогиб верхняка в своде, мм	Менее 50	50—200	Более 200
Изгиб стоек, мм	Менее 50	50—100	Более 100
Разрывы скоб узлов податливости, %	0	Менее 5	Более 5
Количество поломанных затяжек, %	Менее 5	5-10	Более 10

Следует различать критерии работоспособности крепи и горной выработки, которые могут отличаться по численному значению и смысловому значению. В частности, критерии работоспособности менее общи и строги по сравнению с критериями выработки. Даже при вполне работоспособной крепи могут встречаться случаи, когда выработка оказывается неустойчивой (однако обратное неверно!), например, при неправильно выбранном сечении выработки с заниженным «запасом на осадку». В табл. 1.4 рассматриваются менее общие критерии работоспособности крепи. Предложенные критерии, по мнению авторов, способны достаточно полно охарактеризовать состояние конструкции и дать косвенную оценку запаса ее работоспособности, но могут быть дополнены или уточнены в зависимости от цели обследования выработок и особенностей конструкции крепи.

Дискуссионным вопросом при этом является назначение численных значений каждого критерия. Предложенные диапазоны их изменения должны учитывать не только предельные значения податливости, но и наблюдаемые на практике вариации значений, обусловленные неточностью монтажа, случайным влиянием технологических факторов проведения выработки, неравномерным натяжением узлов податливости, вариацией смещений пород вдоль выработки, направления наибольших смещений относительно оси симметрии крепи и др.

Одним из наиболее важных среди перечисленных критериев является смещение элементов в узлах податливости, поскольку оно связано с предельным значением податливости крепи и может трактоваться в своем относительном измерении как коэффициент запаса податливости. Критерии деформирования верхняков и стоек отражают важную специфику работы конструкции, главным образом, при изгибе в плоскости и из

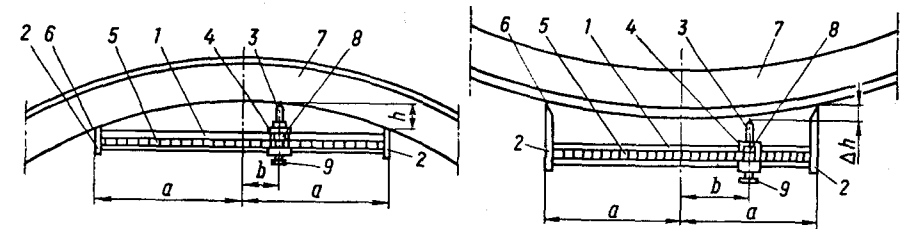


Рис. 1.6. Прогибомер для измерения усилий в элементах арочной крепи  
Рис. 1.7. Измерение усилий в деформированных прямолинейных элементах рамных крепей

плоскости рамы. При этом следует учитывать, что еще до исчерпания податливости конструкции могут возникнуть неупругие деформации ее элементов, однако в пределах 200 мм они несущественно влияют на работоспособность крепи в целом. С другой стороны, технология изготовления крепи на заводах, упругие деформации изгиба при работе крепи под нагрузкой позволяют принять исходный критерий по изгибу на уровне 50 мм. Такого же рода соображения обосновывают принятые пределы изменения по остальным критериям. По мере изменения технологии изготовления и возведения крепи и целей исследования эти критерии неизбежно будут конкретизироваться и уточняться.

Для оценки состояния крепи, особенно для выявления запаса прочности ее элементов, целесообразно использовать разработанный в ДГМИ прогибомер [1.30]. Он состоит (рис. 1.6) из основания 1 с двумя опорами 2 и измерительного стержня 3, калиброванного по высоте и закрепленного на отсчетном кольце 4, с возможностью продольного перемещения последнего по основанию 1. Основание 1 снабжено измерительной шкалой 5, симметричной относительно начала отсчета, помещенного в центре основания 1. Опоры 2 выполнены с заостренными, взаимно параллельными кромками 6, контактирующими с элементом рамной крепи 7. Отсчетное кольцо снабжено нониусом 8 и фиксатором в виде зажимного винта 9.

Прогиб измеряют на участке элемента крепи между кромками опор. Для этого отсчетное кольцо вместе с измерительным стержнем перемещают вдоль основания от его центра вплоть до касания поверхности элемента крепи. По смещению измерительного стержня относительно центра основания определяют изгибающий момент, действующий на участке между опорами:

$$M = EI \left[ \frac{2h}{\sqrt{h^2 + (a+b)^2} \cdot \sqrt{h^2 + (a-b)^2}} - R_0^{-1} \right], \quad (1.5)$$

где  $EI$  — изгибная жесткость элементов крепи,  $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ;  $h$  — калиброванная высота измерительного стержня, м;  $a$  — половина расстояния между

кромками опор, м;  $b$  — смещения стержня относительно центра основания, м;  $R_0$  — начальный радиус кривизны элемента крепи, м.

Прогибомер можно использовать для исследования усилий в элементах крепи не только арочной, но и прямолинейной формы. В случае прогиба прямолинейного элемента внутрь выработки (рис. 1.7) используют опоры, превышающие высоту калиброванного стержня на величину  $\Delta h$ , которая должна быть больше стрелы ожидаемого прогиба деформированного элемента. При измерениях отчетное кольцо смещают от опоры до касания с элементом крепи, а изгибающий момент определяют по формуле

$$M = EI \left[ \frac{2\Delta h}{\sqrt{\Delta h^2 + (a+b)^2} \cdot \sqrt{\Delta h^2 + (a-b)^2}} \right].$$

Точность определения усилий при использовании прогибомера ДГМИ в 5—10 раз выше, чем в аналогичных приборах, использующих прямое измерение стрелы прогиба [1.31]. Полученные значения изгибающих моментов следует сопоставить с допустимыми, что дает возможность судить о реальном запасе прочности крепи на момент измерения прогиба:

**Предельные значения изгибающих моментов шахтных профилей по условию начала текучести стали**

Типоразмер спецпрофиля	17	19	22	27	33
Предельный пластический момент $M_{пл}$ , кН·м	18,4	22,2	27,4	36,9	46,7

Таким образом, с помощью прогибомера ДГМИ можно достоверно оценивать работоспособность крепи по критерию изгиба составляющих ее грузонесущих элементов.

Хотя каждый из критериев работоспособности (см. табл. 1.4) в некоторой мере автономен, оценку состояния крепи целесообразно выполнять по их совокупности, с помощью процедуры свертки. Наиболее приемлемым является определение состояния крепи по принципу одновременного учета всех критериев, сводящееся к следующим правилам:

если все значения критериев находятся в одном и том же диапазоне состояния крепи, то принимается это состояние;

если показатели распределились между первым и вторым состоянием крепи, то принимается тот из них, в пределах которого оказалось большее число показателей;

если показатели распределились между вторым и третьим состоянием крепи, то принимается третье состояние (отказ);

если наблюдается разброс значений критериев по всем трем состояниям, то данные бракуются и подлежат уточнению.

Разработанные критерии легли в основу методики шахтных обследований, включающей также план контроля текущего состояния и прогноз работоспособности рамной крепи.

### 1.3.2. План контроля состояния рамной крепи

Важными вопросами методики шахтных обследований являются выбор представительного участка горной выработки, обоснование количества контрольных рам, на которых производятся замеры, и расстояний между ними. Эти вопросы недостаточно обсуждались и не нашли общепринятого решения в существующих методиках, хотя они предопределяют достоверность конечных выводов исследований. Как правило, при обследованиях расстояние между контрольными рамами выбирается произвольно (от 10 до 30 м у различных исследователей) и принимается одинаковым по всей длине выработки. Данный подход не всегда обеспечивает требуемую надежность и предполагает обследование большого количества рам для обеспечения минимального объема статистической выборки. В связи с этим в ДГМИ разработан план контроля, позволяющий с заданной надежностью отнести обследуемый участок или всю выработку к той или иной категории работоспособности (устойчивости) путем четкого обоснования требуемого количества контрольных рам, подлежащих обследованию, и регламентации выбора расстояний между ними. Наиболее приемлемы для достижения этих целей статистические методы, которые должны стать основой для методики шахтных наблюдений. Среди таких методов различают (в терминах методики шахтных наблюдений):

план «одиночного» обследования (контроля), согласно которому выработку делят на отдельные участки и по достаточно большому объему выборки принимают решение об устойчивости или отказах крепи на всем участке (традиционные методы шахтных наблюдений);

план «двойного» контроля, заключающийся в том, что после взятия выборки либо принимают окончательное решение о состоянии крепи, либо повторяют обследование (контроль) путем расширения выборки;

последовательный («поштучный») контроль, который предполагает изменение объема выборки в зависимости от текущих результатов контроля.

Сравнительный анализ одиночного, двойного и последовательного контролей состояния крепи позволяет отдать предпочтение последнему, так как с его помощью обеспечивается заданная надежность обследования при минимальной его трудоемкости. Последовательный контроль [1.32] представляет собой систему проверки гипотез А. Вальда, в которой используется критерий отношения вероятностей, в предположении, что количество рам крепи по длине выработки значительно превышает объем выборки (количество контрольных рам). При этом вывод о принятии того или иного состояния крепи может быть сделан путем поэтапного строго регламентированного увеличения объема выборки до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий надежности.

Требования к участку обследования задают следующими параметрами:

$$P_1, Q_1, \alpha_1, \beta_1 (P_1 + Q_1 = \alpha_1 + \beta_1 = 1);$$

$$P_2, Q_2, \alpha_2, \beta_2 (P_2 + Q_2 = \alpha_2 + \beta_2 = 1),$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — доля (вероятность) отказавших рам, соответственно, допустимая (при которой состояние крепи считают работоспособным) и недопустимая (при которой состояние крепи считают неработоспособным);  $Q_1$  и  $Q_2$  — предельная доля работоспособных рам в выработке, соответственно, допустимая и недопустимая для рассматриваемых альтернативных состояний крепи;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — вероятность отбраковки участка, соответственно, с работоспособной и отказавшей крепью;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — вероятность решения, что участок, соответственно, с работоспособной и отказавшей крепью является пригодным.

При этом  $\alpha_1$  называют ошибкой 1-го рода, если участок с работоспособной крепью принимают за непригодный, а  $\beta_2$  — ошибкой 2-го рода, если участок с отказавшей крепью принимают за устойчивый.

В данной методике обследования необходимо задаться априори значением ошибок 1- и 2-го рода ( $\alpha_1$  и  $\beta_2$ ). Поэтому, в зависимости от целей и задач исследования, а также степени достоверности исходных данных, при проведении обследований можно принимать значения вероятностей этих ошибок в широких пределах. Следует иметь в виду, что чем меньше уровень ошибок или, что то же самое, выше требования к надежности выводов по результатам шахтных наблюдений, тем больший объем выборки требуется изучить и проанализировать. Очевидно, что эти ошибки не могут быть меньше, чем точность критериев по оценке состояния каждой отдельной взятой рамы крепи (см. табл. 1.4) и вариации горно-геологических условий на участке выработки (иными словами, однородности выборки). Поэтому значения рассматриваемых ошибок не обязательно должны быть равны друг другу и, во всяком случае, быть меньше 0,1—0,2. Учитывая, что подобного же рода подход будет использован далее для прогноза работоспособности рамной крепи, когда уровень ошибок обоснован экономическими последствиями их реализации, целесообразно принять их такими же, как и для прогноза  $\alpha_1 = 0,3$  и  $\beta_2 = 0,1$ .

План контроля состояния крепи\* строился исходя из следующих параметров:  $P_1 = 0,1$ ;  $Q_1 = 0,9$ ;  $\alpha_1 = 0,3$ ;  $\beta_1 = 0,7$ ;  $P_2 = 0,2$ ;  $Q_2 = 0,8$ ;  $\alpha_2 = 0,9$ ;  $\beta_2 = 0,1$ . Отсюда следует, что допустимая доля отказавших рам, при которой состояние участка считают устойчивым, равна 0,1, а недопустимая, при которой состояние участка считают неработоспособным, — 0,2.

При обследовании состояния крепи на участке выработки рамы необходимо выбирать случайным образом, используя таблицу или генератор случайных чисел. Это дает гарантию достаточной представительности полученной выборки и исключает субъективный подход в процессе проведения обследования.

Определим число отказавших рам из выборки, при котором участок обследования следует считать:

- неустойчивым (обусловлено браковочным числом рам  $R_n$ );
- устойчивым (предопределено приемочным числом  $A_n$ ).

\* В разработке плана контроля эксплуатационного состояния крепи принимал участие канд. техн. наук Мележик А. И.

Эти параметры находим из уравнений [1.32]:

$$R_n = (h_2 + bh) / L; \quad A_n = (-h_1 + bh) / L, \quad (1.6)$$

где  $n$  — количество обследованных рам (объем выборки);

$$h_1 = \lg(\beta_1 / \beta_2); \quad h_2 = \lg(\alpha_2 / \alpha); \\ b = \lg(Q_1 / Q_2); \quad L = \lg[Q_1 P_2 / (Q_2 P_1)]. \quad (1.7)$$

Если число отказавших рам крепи обозначить через  $d$ , то обследованный участок выработки следует считать неустойчивым каждый раз, когда  $d \geq R_n$  в выборке объема  $n$ . Участок считается устойчивым, когда  $d \leq A_n$ . Обследование с целью увеличения объема выборки следует продолжить, если  $A_n < d < R_n$ .

Для выбранных параметров представим план обследования участка выработки для отнесения к определенной категории состояния крепи:

#### План контроля состояния рамной крепи на участке горной выработки

Суммарный объем выборки $n$	15	19	22	25	29	32	35	39	42	46	49	52
Приемочное число $A_n$	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
Браковочное число $R_n$	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10

Как видим, начальный объем случайно организованной выборки не может быть меньше 15 рам. Если при этом все рамы работоспособны, то принимается решение об устойчивом состоянии всего участка с надежностью 0,7. Решение о неустойчивом состоянии крепи на участке с надежностью 0,9 принимается в случае обнаружения четырех или более отказавших рам. Если число отказавших рам в выборке данного объема (15) окажется, менее четырех, но больше 0, то следует продолжить обследование, задавшись следующим объемом выборки — 19 рам. Если неопределенность ситуации по числу отказавших рам повторяется, необходимо последовательно переходить на все большие объемы обследованных рам. Чем более жесткие условия предъявляются к надежности принимаемого решения (чем меньше допустимые значения ошибок 1- и 2-го рода), тем больше регламентируемый планом обследования объем выборки. Это хорошо демонстрирует план контроля с уменьшенными значениями ошибок  $\alpha_1 = 0,1$ ;  $\beta_2 = 0,1$ , что обеспечивает достаточно высокую надежность (0,9) определения устойчивого и неработоспособного состояния выработки:

#### План контроля состояния рамной крепи повышенной надежности

Суммарный объем выборки $n$	19	23	26	30	33	37	40	43	47	51
Приемочное число $A_n$	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4
Браковочное число $R_n$	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11

Сравнение данных двух приведенных планов показывает обманчивость их подобия, поскольку интервал неопределенности по отказавшим рамам крепи возрос примерно в 1,5 раза (с 4-5 до 6-7 рам). Это приводит к существенному увеличению числа последовательных этапов по набору требуемого объема выборки.

План последовательного контроля (рис. 1.8, а) пригоден для любой длины обследуемого участка, которую следует определять из условия, что на всем ее протяжении наблюдаются сравнительно однородные горно-геологические и горнотехнические условия. Однако при малых длинах участков этот план контроля может привести к неоправданному увеличению трудоемкости работ по обследованию. Здесь более эффективен план одиночного контроля состояния выработки. Сравнение обоих планов контроля при  $\alpha_1 = 0,3$ ;  $\beta_2 = 0,1$  приведено на рис. 1.8, б в виде графика зависимости требуемого объема выборки  $n$  от числа рам  $N$  на участке.

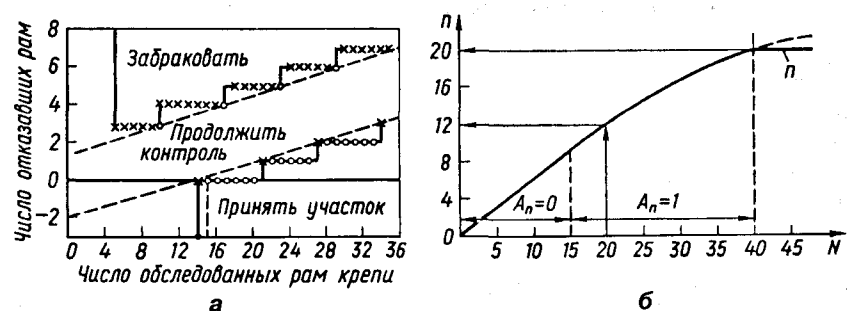


Рис. 1.8. Определение объема выборки для последовательного (а) и одиночного (б) планов контроля

При числе рам на участке менее 40 необходимо пользоваться одиночным контролем, причем его объем выборки  $n$  определяют из графика (например при числе рам  $N = 20$  следует обследовать 12 рам). При числе рам более 40 рекомендуется переход на план последовательного контроля.

### 1.3.3. Результаты обследования крепи и прогноз ее работоспособности

По разработанной методике обследовано 44 протяженных горных выработок 17 угольных шахт ГХК «Луганскуголь», «Краснодонуголь» (средний метаморфизм пород — СМП) и 66 горных выработок по 7 шахтам ГХК «Ровенькиантрацит» (высокий метаморфизм пород — ВМП). Это позволило охватить широкий диапазон изменения горно-геологических условий: глубина разработки изменялась от 150 до 1050 м, показатель предела прочности на одноосное сжатие — от 26 до 150 МПа, площадь сечения выработок в свету — от 7 до 18,3 м<sup>2</sup>.

На основании результатов проведенного обследования были получены предварительные выводы о состоянии арочной крепи в различных условиях. Для этого рамы на каждом обследованном участке были отнесены к двум группам: с допустимыми и недопустимыми деформациями, причем в первую группу вошли крепи с недогруженным и нормальным состоянием согласно табл. 1.4.

Наибольший интерес представляли арки с недопустимыми деформациями. По всей группе обследованных выработок в целом недопустимые деформации в условиях СМП имели 27 % арок, а в условиях ВМП — всего 15 %. Таким образом, средневзвешенная надежность работы арочной крепи не превышает 70% в обычных условиях и 85 % в регионе с антрацитовыми углями. Как видно из сравнения этих горно-геологических условий, надежность крепи при СМП следует считать явно недостаточной.

Обследование показало следующие характерные особенности взаимодействия крепи с окружающими породами.

1. Как правило, технология возведения крепи, требующая забутовки закрепного пространства и тщательной расклинки арки на участках податливых соединений, не соблюдается. Забутовка выполняется обычно лишь на высоту прямых участков стоек для удержания там затяжки с помощью породы.

2. На достаточно протяженных участках с устойчивым породным контуром и удовлетворительным состоянием арок имеются незаполненные пустоты закрепного пространства в кровле и в боках выработки, что свидетельствует об отсутствии горного давления и завышенной материалоемкости крепи.

3. В выработках, пройденных по простиранию, даже при пологом залегании пород наблюдается неравномерность смещений в податливых узлах. На пластах с углом падения более 10—15° заметно ухудшается работа податливых узлов, причем со стороны падения их податливость снижается вплоть до блокировки (при углах около 30°), а со стороны восстания — резко возрастает.

4. В случаях некачественной забутовки закрепного пространства и установки арки под «плоскую» кровлю верхняя арка начинает прогибаться («выполаживаться») до перехода крепи в податливый режим работы.

5. Характерными особенностями аварийного (недопустимого) деформирования крепи являются: разрыв скоб в податливых соединениях, пространственный изгиб с кручением элементов крепи, образование пластических шарниров на спецпрофиле и потеря его местной устойчивости («раскрытие» профиля), чрезмерное проскальзывание спецпрофилей в узлах податливости, поломка затяжки и высыпание породы внутрь выработки.

6. При слабых и размокающих породах почвы стойки крепи, несмотря на наличие вваренных диафрагм, под действием внешней нагрузки на верхнюю вдавливаются в почву без существенного сопротивления, что

приводит к потере высоты выработки и необходимости ее ремонта («ложное пучение»).

7. Межрамные стяжки при деформациях крепи не оказывают существенного влияния на ее устойчивость и служат в основном для удержания рам при монтаже крепи и ведении взрывных работ в забое. В ряде случаев, несмотря на наличие стяжек, наблюдается «выбивание» рам взрывными работами, стяжки при этом «складываются» по многочисленным шарнирам на соединительных скобах.

Такие условия возведения приводят к различным последствиям в зависимости от горно-геологических условий эксплуатации выработки. В условиях пологого залегания слоистых пород высокой прочности в кровле выработки происходит самое неблагоприятное, с точки зрения работы конструкции, нагружение, когда контакт крепи с породой происходит в точке или на малом участке верхняка. Нагрузка на крепь формируется в виде сосредоточенной силы, направленной по нормали к напластованию пород. В конструкции возникают высокие изгибающие моменты, вызывающие деформацию («выполаживание») верхняка под точкой приложения нагрузки и его изгиб в сторону массива в районе узлов податливости. Несущая способность конструкции оказывается сниженной в несколько раз, образуются пластические деформации спецпрофиля, которые приводят к искажению формы крепи (изгиб верхняка и стоек) еще до исчерпания запаса податливости. По сути, крепь не работает в податливом режиме и разрушается. Как правило, это происходит в условиях интенсивного прогиба пород массива, вызванного влиянием очистных работ, особенно при охране выработки целиками малых размеров или при проведении ее «в присечку» к выработанному пространству лавы.<sup>11</sup>

Те же условия возведения крепи при прочных окружающих выработку породах, не склонных к существенным смещениям, приводят к зависанию пород над крепью, которая в результате становится не грузонесущей, а ограждающей конструкцией. Зачастую можно наблюдать отсутствие контакта крепи с породами не только в кровле, но и боках выработки (капитальные выработки, квершлаг, наклонные выработки с охраной целиками достаточных размеров и др.). Разумеется, крепь в данном случае не работает в нормальном режиме и, хотя производители работ допускают серьезные нарушения технических требований по возведению крепи, ее состояние остается удовлетворительным.

Если горное давление развивается не в форме плавного изгиба пластов пород, а в виде обрушений из кровли трещиноватых блоков, то возникает вероятность динамического воздействия пород на конструкцию. Нагрузка на крепь при этом возрастает пропорционально коэффициенту динамичности в несколько раз. Конструкция в прямом смысле слова теряет устойчивость и разрушается на довольно протяженных участках выработки, достигающих десятков метров. Такие аварии, а по терминологии горняков — «завалы» выработки, опасны своей внезапностью и быстротечностью, что приводит к несчастным случаям для оказавшихся вблизи

рабочих. Завалы выработки могут происходить в прочных породах при больших переборах проектного сечения и приурочены либо к участкам массива, где развита интенсивная трещиноватость, либо к резкому изменению горнотехнических условий, в которых находится выработка (например, при воздействии вредного влияния очистных работ в период приближения или прохода лавы, взаимного влияния выработок, попадания забоя в другие породы или геологические нарушения и т. п.). Следовательно, условия работы крепи весьма разнообразны и для правильного ее проектирования и эксплуатации необходим достаточно достоверный прогноз ее работоспособности.

С целью статистической обработки шахтных исследований состояния арочной податливой крепи и разработки доступного и простого метода прогноза ее состояния была использована методика, изложенная в работах [1.23, 1.33]. Идея методики основана на сравнении вероятности распределения влияющих на состояние крепи факторов с помощью неоднородного статистического анализа, предложенного А. А. Генкиным [1.33]. Ее достоинствами являются: возможность использования различных по точности методов измерений показателей, характеризующих основные факторы, пониженные требования к полноте и однородности исходных данных, отсутствие ограничений на использование большого числа различных влияющих факторов, простота и доступность для применения в практических целях.

К факторам, влияющим на состояние стальной крепи в выработке, отнесены: глубина заложения выработки  $H$ , показатель предела прочности пород на одноосное сжатие  $\sigma_c$  в ее кровле, фактор вредного влияния очистных работ  $L$ , проектируемое расстояние  $l$  между рамами крепи и площадь  $S$  сечения выработки. Прогнозировались допустимое (гипотеза Г1) и аварийное (Г2) состояния арочной крепи. Для каждого из факторов были выбраны такие диапазоны его изменения, при которых различия между исследуемыми состояниями крепи достигали максимума. В среднем в каждом выделенном диапазоне оказывалось от 5 до 12 наблюдений. Сущность прогностической таблицы заключалась в использовании принципа выбора одной из двух гипотез о состоянии крепи на основе вероятностной оценки факторов с помощью отношения правдоподобия. По каждому фактору  $i$  из любого его диапазона  $j$  подсчитывались числа наблюдений  $X1_{(i,j)}$  и  $X2_{(i,j)}$  для состояний крепи Г1 и Г2 и вычислялись вероятности по формулам:

$$P1_{(i,j)} = X1_{(i,j)} / A1; \quad (1.8)$$

$$P2_{(i,j)} = X2_{(i,j)} / A2, \quad (1.9)$$

где  $A1$  и  $A2$  — общее число наблюдений соответственно с допустимыми и аварийными состояниями крепи.

На следующем этапе определялось отношение правдоподобия

$$P_{(i,j)} = P1_{(i,j)} / P2_{(i,j)}, \quad (1.10)$$

которое показывает, во сколько раз вероятность реализации гипотезы Г1 правдоподобнее вероятности гипотезы Г2 для фактора  $i$  в диапазоне  $j$ .

С целью удобства дальнейшего использования полученных результатов были вычислены прогностические коэффициенты  $Пк_{(i,j)}$  в виде численного преобразования отношений правдоподобия  $P_{(i,j)}$ :

$$Пк_{(i,j)} = 100 \lg [P_{(i,j)}]. \quad (1.11)$$

Знак прогностического коэффициента свидетельствует о предпочтительности одной из гипотез. Чем больше положительное значение  $Пк_{(i,j)}$ , тем правдоподобнее гипотеза Г1, и наоборот, чем больше (по модулю) отрицательное значение прогностического коэффициента, тем предпочтительнее гипотеза Г2.

По данной методике разработана прогностическая таблица (табл. 1.5), позволяющая на основе значений известных входных горнотехнических факторов судить об ожидаемой работоспособности крепи.

Для принятия решения по ремонту и перекреплению выработок следует знать пороговое значение  $Пг$ , которое при заданном уровне вероятности ошибок распознавания гипотез позволит считать прогноз достаточно надежным:

$$Пг1 = 100 \lg [(1 - \alpha) / \beta]; \quad (1.12)$$

$$Пг2 = 100 \lg [\alpha / (1 - \beta)], \quad (1.13)$$

где  $\alpha$  — ошибка первого рода;  $\beta$  — ошибка второго рода.

Для принятия одной из гипотез (Г1 или Г2) необходимо, чтобы общая сумма прогностических коэффициентов  $Пк_{(i,j)}$  в табл. 1.5 была не менее величины распознающего порога  $Пг1$  для гипотезы Г1 и не более распознающего порога  $Пг2$  для гипотезы Г2, что обеспечит надежность принятого решения  $(1 - \alpha)$  для Г1 и  $(1 - \beta)$  — для Г2.

Надежность распознавания гипотезы является функцией ошибки распознавания. В этой связи важное значение приобретает величина ошибок первого ( $\alpha$ ) и второго ( $\beta$ ) рода. Ошибка первого рода возникает, когда вместо гипотезы Г1 (допустимое состояние крепи) принимается гипотезу Г2 (аварийное состояние). Ошибка второго рода противоположна первой: вместо гипотезы Г2 принимают гипотезу Г1.

Экономические последствия реализации этих ошибок неравнозначны. С экономической точки зрения ошибка первого рода — это риск производителя, так как при ее реализации достаточная для обеспечения устойчивости несущая способность крепи ошибочно представляется заниженной и производитель допускает необоснованный перерасход материала крепи. Ошибка второго рода — риск потребителя, так как при ее реализации заниженная несущая способность крепи ошибочно представляется

достаточной для обеспечения устойчивости, что приводит к отказам крепи, необходимости ее ремонта в период эксплуатации выработки, повышению расходов потребителя. Поэтому в качестве критерия оптимальности при определении  $\alpha$  и  $\beta$  следует принять равенство стоимостей ошибок распознавания первого и второго рода. По методике, изложенной в [1.34], были определены значения  $\alpha$  и  $\beta$ , соответствующие критерию оптимальности (табл. 1.6), и введена классификация горных выработок по их функциональной ответственности.

Таблица 1.5. Прогностическая таблица состояния стальной арочной крепи

Фактор (i)	Диапазон (j)	X1 <sub>ij</sub>	X2 <sub>ij</sub>	P1 <sub>ij</sub> × 10 <sup>2</sup>	P2 <sub>ij</sub> × 10 <sup>2</sup>	P <sub>ij</sub>	Пк <sub>ij</sub>	I <sub>j</sub>
Глубина заложения выработки H, м	<400	12	3	38	25	1,5	+18	5,7
	400—600	14	5	44	42	1,05	+2	
	>600	6	4	19	33	0,58	-24	
Предел прочности пород на одноосное сжатие σ <sub>c</sub> , МПа	<50	9	5	28	42	0,67	-17	4,7
	50—70	11	4	34	33	1,03	+1	
	>70	12	3	38	25	1,5	+18	
Влияние лавы L	Нет	29	7	91	58	1,57	+20	29
	Есть	3	5	9	42	0,21	-68	
Расстояние между рамами крепи l, м	1,0	11	6	34	50	0,68	-17	7,1
	0,7	11	4	34	33	1,03	+1	
	0,5	10	2	31	16	1,94	+29	
Площадь сечения выработки в свету S, м <sup>2</sup>	<11,2	9	3	28	25	1,12	+5	0,4
	11,2—13,8	11	4	34	33	1,03	+1	
	>13,8	12	5	38	42	0,89	-5	

Таблица 1.6. Значения ошибок прогнозирования

Ошибки прогнозирования	Класс функциональной ответственности выработки								
	I			II			III		
Первого рода α	0,30	0,25	0,20	0,30	0,25	0,20	0,30	0,25	0,20
Второго рода β	0,14	0,11	0,09	0,12	0,10	0,08	0,10	0,08	0,06

Класс функциональной ответственности выработки позволяет учесть рост стоимости ошибки распознавания при нарушении ее функционирования за счет отказов крепи (издержки от возможного простоя



выработки при ее ремонтах). К первому классу функциональной ответственности следует отнести выработки, нарушения и ремонт крепи в которых не прекращают их функционирования (выработки, обеспечивающие вентиляцию, водоотлив, энергоснабжение и другие вспомогательные функции). Ко второму классу следует отнести выработки, нарушения и ремонт крепи в которых прекращают их функционирование, однако прерванные функции могут взять на себя другие выработки без значительной утраты собственных функций (выработки, обеспечивающие перемещение рабочих, доставку материалов, размещение оборудования и др.). К третьему классу относятся выработки, в которых ремонт крепи останавливает их функционирование, причем другие выработки не могут взять на себя прерванные функции (выработки, вскрывающие шахтное поле, формирующие очистные забои, обеспечивающие транспортирование угля и породы). Наиболее жесткие условия по принятию проектных и инженерных решений предъявляются к самым ответственным выработкам (по предложенной классификации — выработки III класса), наименьший уровень требований предъявляется к выработкам I класса. Целесообразно в дальнейшем эту или подобную классификацию использовать не только для прогноза работоспособности крепи, но и для разработки норм проектирования выработок различного назначения.

Как правило, вероятность прогнозируемого события менее 0,7 не может удовлетворить проектировщика, поэтому принимаем  $\alpha_{\max} \leq 0,3$ . Следует отметить, что осуществить прогноз работоспособности крепи с достоверностью более 0,9 в шахтных условиях весьма затруднительно, поэтому  $\beta_{\min} \geq 0,1$ .

Полученные результаты (табл.1.6) свидетельствуют, что для обеспечения равного риска производителя и потребителя при проведении и эксплуатации горной выработки необходимо, чтобы ошибка второго рода была примерно в 2—3 раза меньше ошибки первого рода. Это повышает величину распознающего порога гипотезы безотказной работы крепи и требует повышения достоверности прогноза путем рассмотрения большего числа влияющих факторов и расширения объема выборки. Предложенные прогнозная модель и план контроля (рис. 1.8) как раз и учитывают эти требования.

Во многих случаях важно знать сравнительную информативность влияющих факторов, которые были приняты к рассмотрению:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \text{Пк}_{(i,j)} [P1_{(i,j)} - P2_{(i,j)}], \quad (1.14)$$

где  $n$  — число влияющих факторов.

Наиболее информативным фактором оказалось влияние лавы, что свидетельствует о значительном снижении устойчивости выработки в зоне влияния очистных работ. Наименее информативный фактор —

площадь сечения, что объясняется небольшим диапазоном ее изменения и компенсацией увеличения площади сечения применением более тяжелых типов спецпрофилей. Остальные факторы примерно равны по своей значимости.

Расстояние между рамами крепи существенно сказывается на ее работоспособности и по информативности занимает второе место. Это обусловлено, в основном, тем, что при более тесном расположении арок в степенной зависимости (примерно в квадрате) увеличивается устойчивость и сохранность межрамных ограждений, что позволяет в соответствии с табл. 1.4 отнести такую крепь к категории нормально работающих. Большие отклонения от технологии возведения крепи в выработке и наличие пустот в закрепном пространстве дают возможность развиваться сводообразованию значительных размеров, поэтому повышение отпора крепи, прежде всего, за счет плотности ее установки, на первом этапе взаимодействия с массивом способствует восприятию нагрузок от отделившихся пород, что пропорционально снижает их смещения в режиме сводообразования.

Весьма показательно, что факторы глубины заложения выработки и прочности пород примерно равнозначны по своей информативности и разнонаправлены по влиянию на устойчивость выработки. Это прямым образом подтверждает правомочность введения критерия устойчивости проф. Заславского Ю. З., предложившего в начале 60-х годов оценивать устойчивость выработок с помощью отношения [1.25]

$$K_3 = \gamma H / \sigma_c, \quad (1.15)$$

где  $\gamma H$  — вес вышележащей толщи пород, МПа.

В качестве примера применения прогностической таблицы рассмотрим вентиляционный штрек с глубиной заложения 360 м, прочностью пород на одноосное сжатие 75 МПа, выработкой в зоне влияния очистных работ, расстоянием между рамами крепи 1 м, площадью сечения выработки 11,2 м<sup>2</sup>. По табл.1.6 принимаем  $\alpha = 0,3$ ;  $\beta = 0,14$ ; Находим распознающие пороги:  $\text{Пг}1 = 67$ ;  $\text{Пг}2 = -45$ . По табл. 1.5 находим сумму прогностических коэффициентов, соответствующих заданным горнотехническим условиям:

$$\text{Пк} = 18 + 18 - 68 - 17 + 1 = -48.$$

Поскольку  $\text{Пк} < \text{Пг}2$ , прогнозируем реализацию гипотезы Г2 (недопустимые деформации крепи) с надежностью прогноза 0,7. Можно оценить, насколько повысится устойчивость крепи при переходе на межрамное расстояние 0,5 м и  $S = 9,8$  м<sup>2</sup>. В этом случае  $\text{Пк} = 2$ , т. е. крепь будет скорее в устойчивом, чем в неустойчивом состоянии (положительный знак  $\text{Пк}$ ), однако  $\text{Пк}$  далек от порогового значения гипотезы Г1 ( $\text{Пг}1 = 67$ ), что не обеспечивает заданную надежность (0,86) прогноза.

Чтобы повысить надежность прогноза работоспособности крепи, следует увеличить объем выборки и число исследуемых факторов. Если же удовлетвориться пониженной достоверностью прогноза, то в процессе эксплуатации горной выработки целесообразно проводить шахтные наблюдения (геомеханический мониторинг). С их помощью можно своевременно исправить ошибочные технические решения, принятые в условиях неопределенности прогноза.

С целью оценки эксплуатационной устойчивости крепи разработанная методика прогноза была использована для шахт ГХК «Ровеньки-антрацит». Как известно, данный регион Донбасса характеризуется высоким метаморфизмом пород (ВМП), и здесь следовало ожидать иных показателей прогноза по сравнению с условиями среднего метаморфизма пород (СМП). Для получения исходных данных была разработана анкета по обследованию состояния арочной крепи:

### АНКЕТА ПО ОБСЛЕДОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Просим заполнить анкету, помечая знаками (+, -) данные, если ответ вполне достоверен, или знаком (?) в ином случае

1. ПО, шахта, горизонт: «Ровенькиантрацит», «Вахрушева», гор. 830 м

2. Название выработки: дренажный штрек № 35

#### 3. ДАННЫЕ О ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Сечение в свету, м <sup>2</sup>	Глубина, м	Длина, м	Угол падения пород, град	Угол наклона, град	Тип ГВ		Прослужила лет		
					пластовая	полевая	<1	1-5	>5
3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
11,2	830	1747	до 10	0	+				+

#### 4. СВОЙСТВА ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Участок сечения	Тип породы	Мощность, м	Крепость f пород по шкале М. М. Протодяконова				Смещение пород, мм	Обводненность (есть +, нет -)
			≤ 4	5-6	7-8	≥ 9		
4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9
1. Кровля	4.2.1 алевролит	8,1			+		200	-
2. Бока	4.2.2 аргиллит	4,4		+			50	-
3. Почва	4.3.3.1 алевролит	0,5		+			100	+
	4.2.3.2 песчаник	2,5				+		+

#### 5. ДАННЫЕ ПО КРЕПИ: 5.1. Тип крепи и профиля: 5.1.1-КМП-А3, СВП-22;

5.2. Плотность установки рам/м - 1.

Смещения в замках, мм			Выполаживание верхняка, мм			Изгиб стоек (есть +, нет -)	Разрывы скоб (есть +, нет -)	Число (раз)		
< 50	50-300	> 300	< 50	50-200	> 200			перетяжек	креплений	подрывок почвы
5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	5.10	5.11	5.12	5.13
	+			+		-	-	0	0	0

#### 6. ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПИ: 6.1. Тип затяжки: 6.1.1. - деревянная 80 %;

6.1.2. - железобетонная 20 %

Участок сечения	Закрепление пустоты, мм			Наличие забурки (есть +, нет -)	Число поломанных затяжек, шт/раму			Расклинка узлов податливости (есть +, нет -)	Изгиб межрамных стоек (есть +, нет -)
	нет	< 100	> 100		< 5	5-10	> 10		
6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	6.10	6.11
Кровля	+			-		+		-	+
Бока			+	+				-	-

#### 7. ВЛИЯНИЕ ЛАВЫ: 7.1. - нет (табл. 7 не заполнять); 7.2. - есть (заполнять табл. 7) +

Угольный пласт	Основная кровля					Подавание лавы, м/мес	Расстояние ГВ до лавы, м			Способ охраны	
	Мощность, м	Тип пород	Мощность, м	Шаг осадки, м	Способ управления		по нормалю	по падению	по простиранию	до лавы	после лавы
7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10	7.11	7.12	7.13	7.14
И1	1,3-1,6	алевр	8,1-10	30	полн. обр.	20-30	0	0	0	массив	целик 8 м

#### 8. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВЫРАБОТКИ (указать длину участков в %):

8.1 - устойчива 90 %; 8.2 нужен частичный ремонт 10 %; 8.3 - нужна перетяжка 15 %; 8.4 - нужна подрывка почвы 0 %; 8.5 - перекрепить 0 %.

АНКЕТУ СОСТАВИЛ (Ф. И. О, должность, подпись, дата): Белогуров М. Н., гл. технолог, 24.06.97

Анкета включала минимально необходимые сведения о горной выработке, горно-геологических условиях ее сооружения и эксплуатации, свойствах вмещающих пород, а также данные о состоянии крепи и затяжки\*. В результате обработки первичных данных с использованием критериев работоспособности (табл. 1.4) были составлены прогностические таблицы, основанные на распознавании нескольких состояний крепи. Альтернатива 1 предусматривала принятие одной из двух гипотез: первой, когда крепь находится в недогруженном (А1) или нормальном (А2) эксплуатационном состоянии (гипотеза А1 + А2), и второй, которая предполагала неустойчивое (А3) состояние крепи. Альтернатива 2 сводилась к разделению первой гипотезы альтернативы 1 на две составляющие — А1 (недогруженные крепи) и А2 (крепи в нормальном режиме работы). Таким образом, в таблице прогноза (табл. 1.7) можно выделить последовательно три состояния крепи: А1, А2, А3. Это вполне удовлетворяет производственным требованиям к результатам прогноза.

В отличие от прогнозной табл. 1.5, здесь произведена свертка факторов глубины заложения ( $H$ ) и прочности пород ( $\sigma_c$ ) в виде критерия проф. Заславского Ю. З. Кроме того, введен фактор срока службы горной выработки.

Таблица 1.7. Прогностическая таблица состояния стальной арочной крепи в условиях высокого метаморфизма пород (ВМП)

Фактор	Диапазон фактора (j)	$X_{1j}$	$X_{2j}$	$P_{1j}^*$ ·10 <sup>2</sup>	$P_{2j}^*$ ·10 <sup>2</sup>	$P_j$	$PK_j$	$I_j$
<i>Альтернатива 1: А1 + А2 или А3</i>								
$\gamma H / \sigma_c$	< 0,15	23	2	41	20	2,05	+31	16,2
	0,15 ... 0,3	24	4	43	40	1,08	+3	
	> 0,3	9	4	16	40	0,4	-40	
Влияние лавы	Нет	42	3	75	30	2,5	+40	37,8
	Есть	14	7	25	70	0,36	-44	
Межрамное расстояние, м	0,5	8	2	14	20	0,7	-15	1,8
	1,0	26	22	87	85	1,08	+3	
Площадь сечения, м <sup>2</sup>	< 12	38	6	68	60	1,13	+5	1,2
	> 12	18	4	32	40	0,8	-10	
Срок службы ГВ, лет	< 5	13	2	23	20	1,15	+6	0,2
	> 5	43	8	77	80	0,96	-2	

\* Авторы признательны за помощь в сборе информации ИТР ГХК «Ровенькиантрацит», особенно канд. техн. наук Есенкову В. М., гл. геологу Попову В. В., гл. маркшейдеру Феклисенко К. Л.

Альтернатива 2: А1 или А3

$\gamma H / \sigma_c$	< 0,15	16	7	53	27	1,96	+29	13
	0,15 ... 0,3	10	14	33	54	0,61	-21	
	> 0,3	4	5	13	19	0,68	-17	
Влияние лавы	Нет	24	18	80	69	1,16	+6	2
	Есть	6	8	20	31	0,65	-18	
Межрамное расстояние, м	0,5	4	4	13	15	0,87	-6	0,01
	1,0	26	22	87	85	1,02	+1	
Площадь сечения, м <sup>2</sup>	< 12	20	18	67	69	0,97	-1	0,1
	> 12	10	8	33	31	1,06	+3	
Срок службы ГВ, лет	< 5	9	4	30	15	2	+30	6
	> 5	21	22	70	85	0,8	-10	

Результаты прогноза состояния крепи: А1 (недогруженное состояние) — 46%, А2 (нормальный режим работы) — 39%, А3 (отказы крепи) — 15%.

Правильность выбора диапазонов изменения каждого фактора подтверждается симметричными предельными значениями прогностических коэффициентов  $PK$  для наиболее информативных факторов. Из всех принятых к учету факторов самыми важными в альтернативе 1 оказались влияние лавы ( $I_2 = 37,8$ ) и критерий проф. Заславского Ю. З. ( $I_1 = 16,2$ ). Это свидетельствует, что и при высоком метаморфизме пород влияние очистных работ оказывается определяющим для состояния крепи. В то же время из 21 выработки, находившейся под влиянием лавы, только 7 оказалось в неудовлетворительном состоянии ( $A_3 = 7$ ), а остальные были в нормальном ( $A_2 = 8$ ) или в недогруженном состоянии ( $A_1 = 6$ ). Наименьшей информативностью обладает срок службы выработки ( $I_5 = 0,2$ ), что можно объяснить устойчивым и стабильным во времени состоянием вмещающих пород массива.

По сравнению с выработками в условиях СМП надежность работы крепи в антрацитовом районе значительно выше. Если в районе СМП число выработок с отказами крепи составляет вне зоны вредного влияния очистных работ около 20%, то при ВМП — только 7%, т. е. почти в 3 раза меньше. В области влияния лавы неустойчивых выработок оказывается соответственно 63 и 33%, т. е. при ВМП их в 1,9 раза меньше. Следовательно, горно-геологические условия добычи угля в антрацитовых районах Донбасса по данным прогностической таблицы существенно благоприятнее. Рассматриваемый метод прогноза может служить достоверной базой для сравнительной оценки условий отработки угольных пластов в различных районах и эффективности подземной добычи на горных предприятиях, что важно при переходе к рыночным отношениям в горнодобывающей промышленности.

Анализируя прогнозную таблицу для альтернативы 2 (недогруженное А1 или нормальное А2 состояния крепи), следует отметить, что основным фактором является критерий проф. Заславского Ю. З. ( $I_1 = 13$ ). Это подтверждает важность использования для прогноза состояния крепи не только статистических методов, но и методов горной геомеханики, основанных на рассмотрении сущности геомеханических процессов вокруг выработки. В альтернативе 2 существенно возросла информативность фактора срока службы выработки (с  $I_5 = 0,2$  до  $I_5 = 6$ ), поскольку в этой группе часть крепи с течением времени переходит из недогруженного в нормальное эксплуатационное состояние. Примечательно, что влияние лавы в отличие от альтернативы 1 резко снизилось с  $I_2 = 37,8$  до  $I_2 = 2$ , что объясняется незначительными смещениями породного контура и повышенной материалоемкостью применяемой крепи при ВМП, а также малым числом выработок с недогруженной крепью в зоне влияния очистных работ. Роль факторов межрамного расстояния и площади сечения выработки оказалась пренебрежимо мала. Это объясняется тем, что здесь крепи работают в условиях низких нагрузок, а выбор их параметров по типовым методикам малопригоден, поскольку крепь взаимодействует с породами не в режиме взаимовлияющей деформации. Кроме того, низкая информативность фактора площади сечения выработки свидетельствует о том, что общепринятая практика перехода к более тяжелым спецпрофилям крепи при увеличении площади сечения в условиях ВМП себя не оправдывает. Этот важный вывод подводит к мысли о необходимости изменения существующих подходов к проектированию крепи в условиях антрацитовых шахт.

В целом выполненный анализ состояния стальной крепи в условиях ВМП позволил с достаточной надежностью выявить распределение крепи по критериям ее работоспособности. Установлено, что в недогруженном состоянии находится 46% крепи выработок, тогда как в нормальном режиме работы — 39%, и всего в 15% выработок наблюдаются отказы крепи. Иными словами, более 60% выработок запроектированы с ошибками: устойчивое состояние выработки принято за неустойчивое (ошибка первого рода  $\alpha$  в 46 % случаев) и наоборот (ошибка второго рода  $\beta$  в 15 % случаев). Такое положение свидетельствует о больших резервах снижения стоимости и материалоемкости стальной крепи.

Таким образом, проведенные исследования состояния и прогноза работоспособности крепи по предложенной методике указывает на необходимость пересмотра и корректировки существующих нормативных документов и их привязки к особенностям горно-геологических условий подземной разработки в различных регионах.

*Характер проявлений горного давления в выработке предопределяется напряженным состоянием пород на контуре и в горном массиве.*

*Проф. Заславский Ю.З.*

## 2. Развитие горного давления и параметры крепи

### 2.1. К определению прочностных свойств вмещающих пород

Для выбора типа и параметров крепи необходимо определить прочность пород, их напряженное состояние, устойчивость породного контура как результат развития горного давления и действующую нагрузку на крепь. Согласно [2.1], инженерно-геологические материалы для проектирования крепи должны включать следующие данные: геоморфологию месторождения выработки, включая стратиграфию и тектонику массива; литологическую и гидрогеологическую характеристики горных пород; результаты испытаний их механических свойств. Как правило, эти свойства определяются на стадии разведки месторождения по результатам испытаний кернов, извлекаемых из разведочных скважин. Последние бурятся на достаточно больших расстояниях друг от друга и не всегда могут учесть изменчивость свойств массива между скважинами. Сама по себе технология отбора кернов, их хранения, транспортирования не обеспечивает в полной мере сохранение исходного состояния пород в массиве («in situ»), что также снижает достоверность полученной информации. Несмотря на обилие затребованных в СНиП геологических сведений, в нем нашли практическое использование лишь два усредненных показателя прочностных свойств вмещающих пород: значение расчетного сопротивления пород сжатию и коэффициент нарушенности массива, что говорит о недостаточном использовании современных достижений горной геомеханики в практике проектирования.

Использование прочности пород лишь на одноосное сжатие не может характеризовать поведение породного массива вокруг выработки, поскольку на ее контуре могут действовать наряду со сжимающими и растягивающими напряжениями. К числу первоочередных показателей прочностных свойств пород следует отнести пределы прочности пород на одноосное сжатие и растяжение ( $\sigma_c$ ,  $\sigma_p$ ) для однородных пород, а для слоистых и трещиноватых — полярные диаграммы их прочности.

Полярные диаграммы деформируемости и прочности пород представляют собой комплексные механические характеристики неоднородной горной породы в зависимости от ориентации нагружения (сжатия или растяжения) относительно структурных неоднородностей (слоистости и трещиноватости). Полярную диаграмму можно получить экспериментально при одноосном нагружении образцов под разными углами к слоистости, что позволяет охарактеризовать деформационную и прочностную анизотропию горных пород.

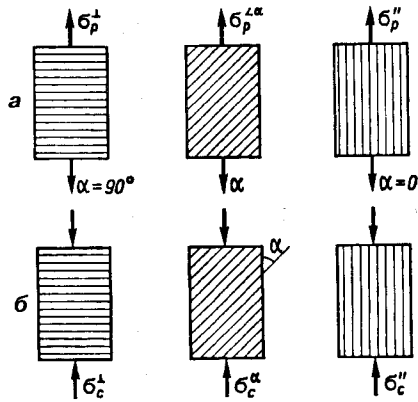


Рис. 2.1. Схемы испытания образцов слоистой породы:  
а — на растяжение; б — на сжатие

Таблица 2.1. Классификация методов испытаний пород по надежности

Методы испытаний	Надежность	Число образцов
Грубые	0,60—0,75	2—3
Упрощенные	0,75—0,85	2—4
Нормальные	0,85—0,95	4—8

На рис. 2.1 представлены схемы испытания образцов слоистой породы при определении полярной диаграммы прочности путем изменения угла  $\alpha$  (приложения нагрузки от  $0^\circ$  (параллельно слоистости) до  $90^\circ$  (перпендикулярно слоистости).

В полярной диаграмме, как правило, соблюдаются следующие соотношения (см. рис. 2.1):

$$\sigma_p^\perp < \sigma_p^\alpha < \sigma_p^\parallel; \quad (2.1)$$

$$\sigma_c^\alpha < \sigma_c^\parallel < \sigma_c^\perp. \quad (2.2)$$

Общий вид полярной диаграммы прочности представлен на рис. 2.2, а. Для структурных неоднородностей, параллельных одной плоскости, диаграмма имеет две оси симметрии, что позволяет показывать лишь по одному ее квадранту для сжатия и растяжения. Диаграмма прочности может быть представлена и в виде развертки по углу  $\alpha$  (рис. 2.2, б). Для типичных слоистых углевмещающих пород прочность может изменяться более чем в три раза в зависимости от направления нагружения образца. Вот почему так важно использование полярной диаграммы для прогноза поведения массива вокруг выработки.

Определение механических свойств пород производится с помощью различных методов, которые характеризуются критериями надежности, представительности и доступности (рис. 2.3).

Все методы механических испытаний по своей надежности можно условно разделить на несколько групп (табл. 2.1).

Чем выше требуемая надежность результатов, тем более сложен и трудоемок метод испытаний, тем большее количество образцов необходимо испытывать.

Стандартные испытания пород на одноосное сжатие (рис. 2.4, а) проводят путем разрушения цилиндрических кернов или призматических образцов 1 нагружением их плоских торцов стальными плитами 2 пресса 3 [2.2].

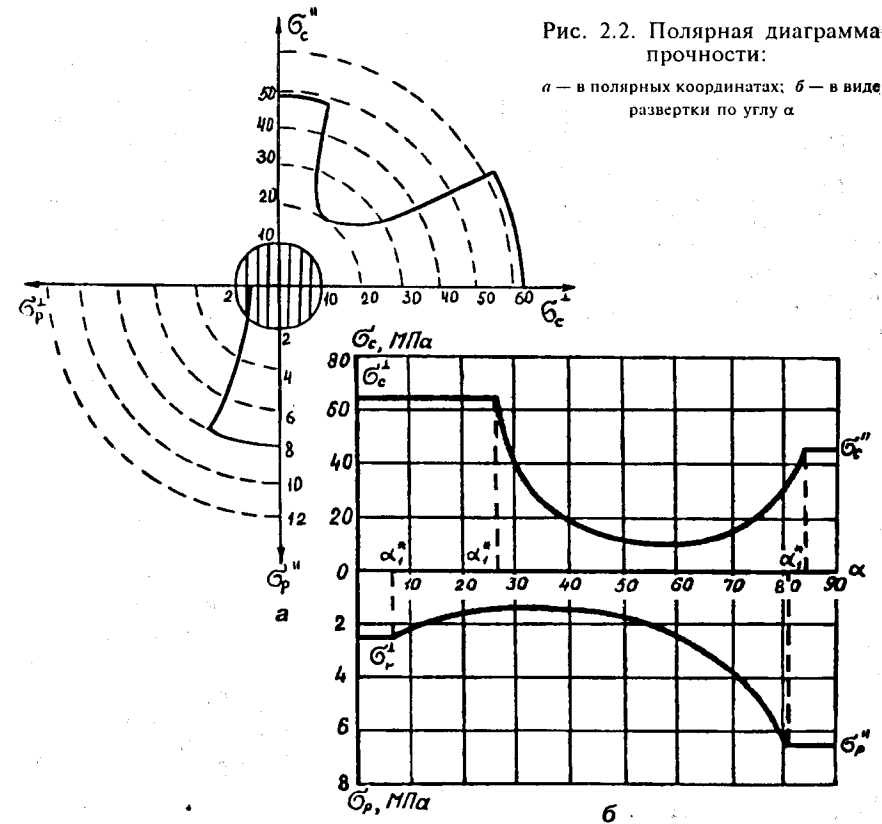


Рис. 2.2. Полярная диаграмма прочности:

а — в полярных координатах; б — в виде развертки по углу  $\alpha$

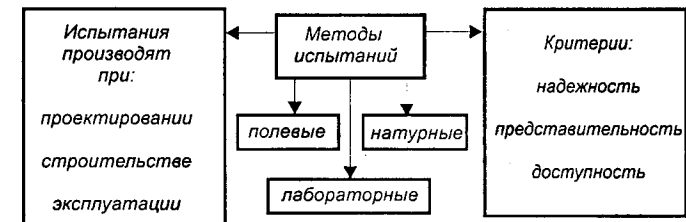


Рис. 2.3. Определение механических свойств пород

При наличии трения торцов образца о давящие плиты он, деформируясь, принимает бочкообразную форму (рис. 2.4, б); напряженное состояние его становится неоднородным, а прочность оказывается зависимой от формы образца, задаваемой отношением его высоты к диаметру  $h/d$  (рис. 2.4, в).

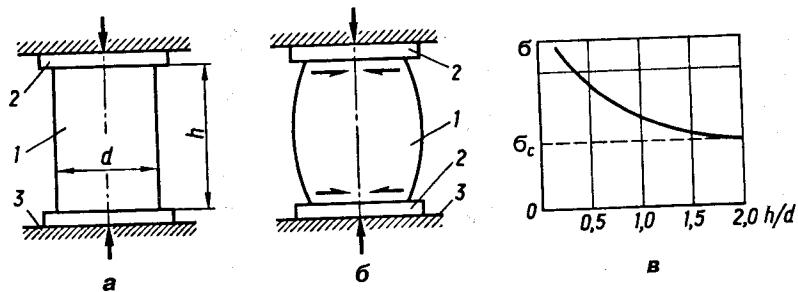


Рис. 2.4. Стандартные испытания пород на одноосное сжатие: а — сжатие образца; б — его деформация; в — влияние формы образца на деформацию (по Г. Н. Кузнецову)

Для определения прочности пород на одноосное сжатие можно рекомендовать следующие методы испытаний:

1. Метод по ГОСТ 21153.2—75 (рис. 2.4) с соблюдением в образце для испытаний соотношения размеров  $h/d = 1, 4 \dots 2$  и применением шлифованных давящих плит. Обеспечивает нормальную точность и надежность 0,85—0,9.

2. Метод ВНИМИ (рис. 2.5, а). Использует наборно-шариковые давящие плиты 2, что позволяет снизить требования к точности обработки торцов образца при том же количестве и надежности испытаний [2.2].

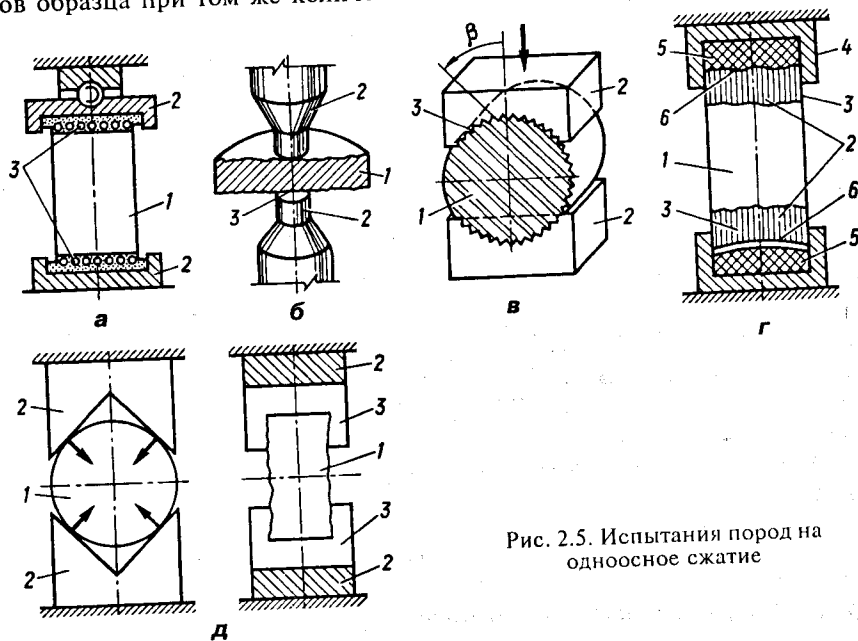


Рис. 2.5. Испытания пород на одноосное сжатие

3. Метод соосных пуансонов ВНИМИ. Является косвенным и основан (рис. 2.5, б) на сжатии соосными цилиндрическими пуансонами 2 породных дисков 1 с плоскими шлифованными поверхностями. Показатель надежности — 0,75...0,85.

4. Метод раздавливания необработанных отрезков керна 1 плитами 2 с цилиндрической выточкой 3 (рис. 2.5, в). Характеризуется повышенной доступностью и надежностью 0,8—0,9.

5. Метод сжатия цилиндрических кернов 1 с нешлифованными торцами 2 пакетом игольчатых стержней 3, установленных в обойме 4 на вакуумную резину 5 через гибкую мембрану 6. Несмотря на сложность испытательного устройства, обладает надежностью 0,95—0,97 и невысокими требованиями к точности обработки и высоты керна (рис. 2.5, г).

6. Метод сжатия кернов 1 в плитах 2 с прямоугольным вырезом 3 вдоль образующей керна. Характеризуется высокой доступностью, удобством испытаний и обеспечивает надежность 0,85—0,95 (рис. 2.5, д).

Четвертый, пятый и шестой методы разработаны в ДГМИ для обеспечения массовых и доступных испытаний горных пород в натуральных и лабораторных условиях [2.3].

Предел прочности породы определяется по формуле

$$\sigma_c = k_y P / A, \quad (2.3)$$

где  $k_y$  — коэффициент, учитывающий условия и метод испытания;  $P$  — разрушающее усилие, Н;  $A$  — площадь образца, перпендикулярная движению нагружающих плит, м<sup>2</sup>.

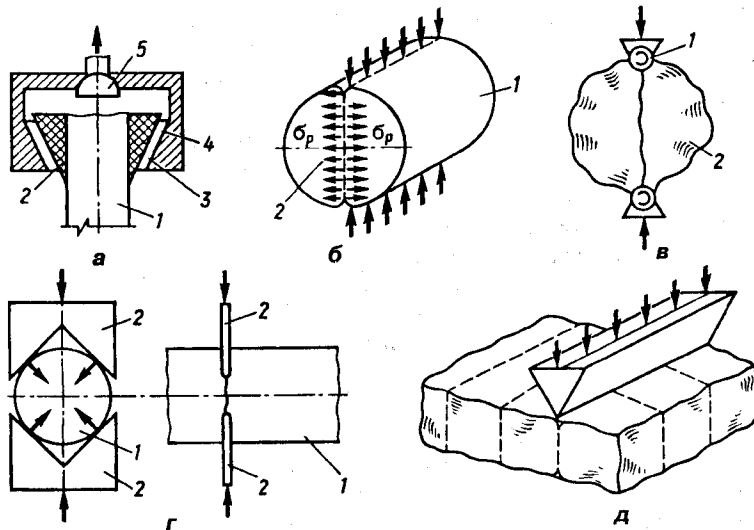
Прямые испытания пород на растяжение затруднены из-за концентрации напряжений в образце под захватами разрывной машины и наличия эксцентриситета приложения нагрузки. Поэтому получили распространение косвенные методы, основанные на принципе раскола образцов сосредоточенной нагрузкой.

Для определения прочности пород на одноосное растяжение авторы использовали следующие методы (рис. 2.6):

1. Прецизионный метод прямого растяжения породного керна 1, на концах которого сделаны конические заплечики 2 из быстротвердеющей пластмассы, взаимодействующей через упругие кольца 3 с захватами 4, прикрепленными посредством шаровых опор 5 к захватам разрывной машины (рис. 2.6, а). Благодаря одновременному устранению эксцентриситета и концентрации напряжений надежность метода составляет 0,9—0,95.

2. Метод раскалывания кернов 1 по образующей встречно направленными усилиями, формируемыми плоскими плитами («бразильский метод»). По плоскости раскола возникают равномерные растягивающие напряжения 2, вызывающие разрыв образца (рис. 2.6, б).

3. Метод раскалывания сферическими инденторами 1 образцов 2 произвольной формы. Отличается большой доступностью, но невысокой на-



Рису. 2.6. Испытание пород на растяжение

дежностью — 0,6...0,8 (рис.2.6, в). Он получил большое распространение и удобен для построения полярной диаграммы прочности при расколе породы.

4. Метод поперечного раскалывания кернов / плоскими клиньями 2 со встречными прямоугольными вырезами. Ему присущи нормальная точность и высокая доступность, а для образцов произвольной формы метод может использоваться как грубый (рис.2.6, г).

5. Метод раскалывания породных плит клиньями. Он основан на «бразильском методе», требует учета масштабного эффекта и тщательной подготовки поверхностей породных плит (их гладкости и параллельности). Обеспечиваемая надежность 0,8—0,9 (рис.2.6, д).

Первый и четвертый из этих методов предложены в ДГМИ [2.3], третий — ВНИМИ [2.2], пятый — ИГД им. А. А. Скочинского [2.4]. Особенностью некоторых методов является их комплексность, когда полученные при испытаниях на растяжение породные отдельныености могут быть испытаны на сжатие. Так, согласно комплексному методу ИГД им. А. А. Скочинского породные призмы, образованные после раскола плит клиньями, могут быть испытаны на сжатие под плитами пресса, обеспечивая грубую оценку. Такую же взаимно дополняющую пару составляют методы ДГМИ (рис.2.6, г — 2.5, д). Преимуществом таких методов является максимальная экономия кернового материала при большом числе однотипных испытаний каждой из породных проб.

Прочность на растяжение рассчитывается по формуле, аналогичной (2.3), а разнообразие методов испытаний учитывается соответствующим изменением численного коэффициента  $k_y$ .

Прочность породы в образце не может в полной мере характеризовать свойства массива из-за масштабного фактора, так как при значительном увеличении размеров породных отдельностей их прочность заметно снижается, что объясняется повышением вероятности попадания трещин и структурных неоднородностей различного масштаба в больший объем. Это учитывается коэффициентом структурного ослабления, который можно оценить по формуле ВНИМИ:

$$k_c = 1 / [1 + a \ln(H / h)], \quad (2.4)$$

где  $a$  — эмпирический коэффициент, возрастающий от 1 до 7 с увеличением  $\sigma_c$  от 1 до 100 МПа;  $H$  — характерный размер исследуемого массива, м;  $h$  — средний размер структурных блоков массива.

Практический опыт проведения сравнительных испытаний показывает, что прочность пород в массиве в среднем меньше прочности в образце примерно в 2—4 раза.

Таким образом, в настоящее время имеются доступные, весьма точные способы и средства для определения механических свойств пород в зависимости от их структурного строения и направления приложения нагрузки. Следует отметить, что разработанные методы отслеживания изменений свойств пород при сооружении горных выработок используются недостаточно, что обусловлено невысоким уровнем требований к исходным данным при проектировании и слабой лабораторной базой заинтересованных организаций.

## 2.2. Напряженное состояние пород вокруг выработки

Для суждения о развитии горного давления в выработке, в дополнение к данным о прочностных свойствах пород, необходимо обладать информацией о напряженном состоянии массива и концентрации напряжений вокруг выработки [2.5, 2.6].

До начала ведения горных работ массив находится в исходном напряженном состоянии, которое зависит от многих факторов (свойств пород, глубины структурного строения, тектоники и др.).

Наиболее упрощенная идеализация реального массива — это упругий массив под действием сил гравитации. Граничными условиями для элементарного кубика породы на глубине  $H$  будут (рис. 2.7): отсутствие горизонтальных деформаций  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$  и, из условий симметрии для боковых напряжений, равенство  $\sigma_x = \sigma_y$ . Вес пород создает вертикальное напряжение, равное  $\sigma_z = \gamma H$ .

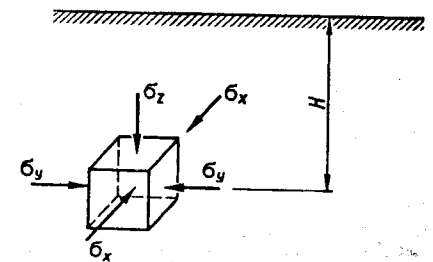


Рис. 2.7. Расчетная схема напряженного состояния упругого массива

Из обобщенного закона Гука, после подстановки граничных условий, следует известная формула акад. Динника А. Н.:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H. \quad (2.5)$$

В более общем случае исходное напряженное состояние массива можно выразить формулой

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z, \quad (2.6)$$

где  $\lambda$  — коэффициент бокового распора.

Коэффициент бокового распора для однородного массива полностью характеризует его исходное напряженное состояние при действии сил гравитации, т.е. показывает, какая часть от давления вышележащих пород  $\sigma_z = \gamma H$  переходит в боковое давление  $\sigma_x = \sigma_y$ . На «больших глубинах» из-за ползучести пород  $\lambda \rightarrow 1$ , т.е. напряженное состояние релаксирует и стремится к гидростатическому (гипотеза Гейма).

Еще одна из простейших идеализаций массива — идеальное сыпучее тело, в котором при достижении предельного состояния соблюдается равенство  $\sigma_z = A \sigma_x$ , где  $A$  — параметр угла  $\rho$  внутреннего трения пород. Из этого равенства следует, что  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z / A$ , т.е. коэффициент бокового распора для сыпучего массива

$$\lambda_c = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{1}{A} = \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} \quad (\text{при } \lambda_c > \lambda_y). \quad (2.7)$$

Для идеально связного массива, который описывается прямолинейной огибающей наибольших кругов напряжений диаграммы О. Мора (рис. 2.8), когда он переходит из упругого в предельное состояние  $\sigma_z = A \sigma_x + \sigma_c$  (см. соответствующий круг О. Мора), горизонтальное напряжение в массиве

$$\sigma_x = (\sigma_z - \sigma_c) / A = \lambda_c (\sigma_z - \sigma_c); \quad (2.8)$$

учитывая, что  $\sigma_z = \gamma H$ , можно найти глубину, на которой массив переходит из упругого в предельное состояние, приравняв (2.5) и (2.8):

$$H_{\text{п}} = \frac{1}{\gamma} \sigma_c \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_y}; \quad (\lambda_c > \lambda_y). \quad (2.9)$$

Из (2.9) следует, что при  $\lambda_c \leq \lambda_y$  массив всегда находится в упругом состоянии (2.5) и не существует предельной глубины, где он переходит в предельное состояние. По данным ВНИИ [2.9], предельной глубиной считается та, где массив в результате релаксации напряжений

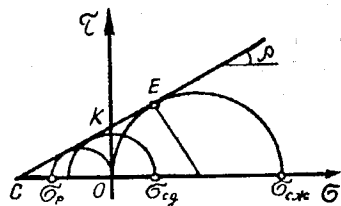


Рис. 2.8. Паспорт прочности на диаграмме О. Мора

и вязкопластического течения переходит в гидростатическое состояние, т.е. все его напряжения равны давлению вышележащих пород:  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H$ . Однако реальный массив на достигнутых глубинах разработки не проявляет вязкопластического течения и его гидростатическое состояние маловероятно, что подтверждается прямыми экспериментальными измерениями напряжений в массиве [2.7].

Реальные массивы, как правило, обладают кусочно-неоднородным (слоистым) строением. Влияние слоистости массива приводит к сложным эффектам, усиливающимся при углах падения, близких к 45...60°: главные площадки (где отсутствуют касательные напряжения) повернуты в пространстве, а главные напряжения на них меняются от пласта к пласту; чем больше жесткость (прочность, модуль упругости) пласта, тем выше в нем уровень исходных напряжений.

Под коэффициентом бокового распора в этом случае следует понимать отношение минимального напряжения к максимальному, причем следует указывать углы наклона главных площадок:

$$\lambda_\alpha = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}, \quad (2.10)$$

где  $\alpha$  — угол наклона главной площадки;  $\sigma_{\text{min}}$  и  $\sigma_{\text{max}}$  — минимальное и максимальное напряжения на главной площадке.

Массиву горных пород присущи различные геологические структуры и нарушения, которые являются источником значительных аномалий в распределении напряжений. В синклиналих складках горизонтальные напряжения по сравнению с ненарушенным массивом оказываются повышенными, а в антиклинальных — наоборот. В разрывных нарушениях, как правило, на разных крыльях сместителя напряжения резко различаются: в зоне надвинутого крыла наблюдается повышенная концентрация напряжений вдоль линии сместителя, а на другом его крыле — разгрузка.

Влияние рельефа местности особенно заметно в горных районах, причем установлено, что:

- направление максимального главного нормального напряжения в зоне, близкой к поверхности, параллельно склону, и лишь на значительном удалении от склона становится вертикальным;
- под возвышениями вертикальные напряжения меньше, а под углублениями (выемками) — больше давления столба пород;
- влияние рельефа местности ослабевает с глубиной.

Из приведенного анализа следует, что исходное напряженное состояние массива может быть весьма изменчивым, что значительно влияет на устойчивость породного контура горных выработок. Поэтому из-за невозможности достоверно рассчитать исходное поле напряжений в массиве необходимо регулярно измерять действующие в массиве напряжения. В то же время полученные аналитические оценки позволяют раскрыть



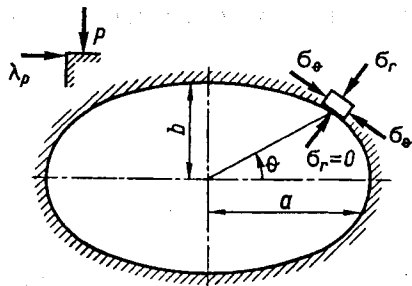


Рис. 2.9. Напряжения на контуре эллипса

(деконцентрацией) и определяют по формуле  $k_\theta = \sigma_\theta / p$ .

Рассмотрим распределение напряжений вокруг незакрепленного отверстия эллиптической формы, как наиболее близкого к сечению большей части контура реальной выработки (рис. 2.9).

Тангенциальные напряжения на контуре эллипса в полярной системе координат  $r - \theta$

$$\sigma_\theta = p \left\{ 1 + \lambda - \frac{2(a - \lambda b)(a \sin^2 \theta - b \cos^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} \right\}, \quad (2.11)$$

где  $p$  — исходное (до проведения выработки) вертикальное напряжение в массиве, МПа;  $\lambda$  — коэффициент бокового распора пород;  $\theta$  — угловая координата точки на контуре эллипса;  $a$  и  $b$  — горизонтальная и вертикальная полуоси эллипса.

Из (2.11) следуют важные положения:

напряжения вокруг выработки не зависят от упругих постоянных пород (модуля упругости, коэффициента Пуассона) и площади сечения;

в кровле горной выработки напряжения  $\sigma_\theta$  всегда минимальны, по знаку они могут быть как сжимающими, так и растягивающими, а последнее возможно, если соотношение полуосей горной выработки отвечает неравенству  $b/a < (1 - \lambda)/(2\lambda)$ , т. е. зависит от коэффициента бокового распора массива  $\lambda$ ;

в боках горной выработки напряжения  $\sigma_\theta$  при условии  $0 < \lambda < 1$  всегда сжимающие, а их концентрация — максимальна;

концентрация упругих напряжений по мере удаления от выработки в глубь массива быстро (по квадратичному закону) убывает и уже на расстоянии 3—4 радиусов выработки (6—8 м для сечений площадью 8—12 м<sup>2</sup>) не превышает нескольких процентов;

напряжения вокруг выработки зависят не только от  $p$ ,  $\lambda$  и  $\theta$ , но и от соотношения ее полуосей  $a/b$  (см. рис. 2.8), что дает возможность управ-

основные механизмы и закономерности распределения напряжений, выявить перенапряженные и разгруженные зоны и, тем самым, принять обоснованные решения по сооружению и креплению выработок.

При проведении горной выработки происходит перераспределение напряжений в окружающих породах: одни из компонентов тензора напряжений возрастают, другие уменьшаются. Степень изменения напряжений по сравнению с исходным их уровнем называют концентрацией

лать напряженным состоянием пород вокруг выработки путем изменения ее формы.

В массиве горных пород часто встречаются трещины, которые создают местную концентрацию напряжений. Их можно приближенно считать вырожденным эллипсом, у которого одна из осей равна нулю. При  $a \rightarrow 0$  получим вертикальную, а при  $b \rightarrow 0$  — горизонтальную трещины; напряжения на их контуре после предельного перехода в (2.11) будут соответственно равны:

$$\sigma_\theta = \pm p(1 - \lambda), \quad (2.12)$$

где знак плюс необходимо брать для вертикальных, а знак минус — для горизонтальных трещин в массиве. Из (2.12) следует, в частности, вывод о том, что горизонтальные несомкнутые трещины в массиве существовать не могут и обязательно сопровождаются вертикальными трещинами.

Тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta$  в выработке эллиптической формы принимают экстремальные значения на вертикальных и горизонтальных осях ее контура и могут быть определены по формулам, следующим из (2.11):

в кровле и почве ( $\theta = \pm \pi / 2$ )

$$\sigma_\theta^k = p(-1 + \lambda + 2\lambda b/a); \quad (2.13)$$

в боках ( $\theta = 0, \pi$ )

$$\sigma_\theta^6 = p(1 - \lambda + 2a/b). \quad (2.14)$$

Оптимальная форма выработки в однородных породах должна обеспечить равновероятность разрушения пород на контуре. Изменением соотношения полуосей выработки можно обеспечить требуемое условие  $\sigma_\theta = \text{const}$  на контуре, т. е. чтобы  $d\sigma_\theta / d\theta = 0$ . Продифференцировав (2.11) по  $\theta$  и приравняв полученное выражение нулю, получим один из центральных в горной геомеханике теоретических результатов, имеющих важное практическое значение для выбора оптимальной формы выработки:

$$a/b = \lambda. \quad (2.15)$$

На всем контуре выработки такой формы действует постоянное напряжение

$$\sigma_\theta^k = p(1 + \lambda). \quad (2.16)$$

Следовательно, выработка обладает максимальной устойчивостью, если ей придать форму эллипса, отношение полуосей которого равно коэффициенту бокового распора. Важно отметить, что большая ось выработки оптимальной формы должна быть ориентирована вдоль главного напряжения в массиве, т. е. при  $\lambda < 1$  выработки должны быть узкими и высокими. Такой вывод противоречит функциональным требованиям

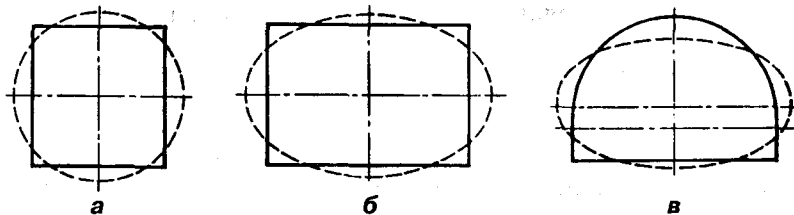


Рис. 2.10. Эллипсы сравнения для выработок разной формы:

*a* — квадратной; *b* — прямоугольной; *в* — сводчатой

размещения оборудования и транспорта, согласно которым выработки должны быть низкими и широкими.

В этом суть главного технического противоречия между требованиями технологии и горной геомеханики, что перерастает в сложную проблему обеспечения эксплуатационной устойчивости выработок. На «малых глубинах» разработки, когда проявления горного давления незначительны, во внимание принимались лишь требования технологии, к тому же выводы горной геомеханики были неизвестны большинству горняков. С увеличением глубины разработки устойчивость выработок резко снизилась и игнорирование выше сформулированной закономерности привело к высоким издержкам производства из-за ремонтов и перекреплений выработок. Решение данной проблемы требует принципиально новых подходов и творческих поисков в процессе проектной и производственной деятельности горного инженера.

По технологическим соображениям поперечному сечению выработок придадут не только эллиптические, но и иные формы (арочные, трапециевидные и др.). Для определения напряжений на их контуре в ДГМИ разработан инженерный метод расчета [2.8], пригодный для протяженных выработок с соотношением наибольшего и наименьшего размеров в пределах

$$0,2 < a/b < 5. \quad (2.17)$$

Сущность метода состоит в определении напряжений вокруг эллипса сравнения (эллиптического отверстия той же площади и с тем же соотношением размеров), а затем введении поправок на участках, где реальный контур выработки отклоняется от эллиптического. Эти отклонения трактуются как выступы или впадины на контуре эллипса, причем концентрация напряжений прямо пропорциональна приведенной кривизне контура в рассматриваемой точке. Таким образом, разработанный метод относится к методам вариации формы границы (рис.2.10).

Метод расчета доступен, прост и обеспечивает вполне удовлетворительную точность (ошибка не более  $\pm 10\%$ ). Расчетная схема метода определения напряжений представлена на рис. 2.11, где указаны необходимые

исходные данные. Геометрические параметры выработки (ширина  $2a$ , высота  $2b$ , площадь  $S$ , радиус кривизны  $R^k$  в любой из точек  $i$  контура) следует взять из проектных документов. Данные об исходном напряженном состоянии массива горных пород до проведения выработки получают экспериментальными измерениями или расчетным путем.

Для построения эпюры тангенциальных напряжений на контуре выработки следует воспользоваться алгоритмом и расчетными формулами, приведенными на рис. 2.12.

Расчет следует вести в следующей последовательности:

1. Вычислить площадь сечения  $S$  выработки вчерне.
2. Найти координаты  $x_{ц}$  и  $y_{ц}$  центра тяжести сечения выработки общеизвестными методами теоретической механики, применив формулы:

$$x_{ц} = \frac{\sum x_i S_i}{S}; \quad y_{ц} = \frac{\sum y_i S_i}{S}, \quad (2.18)$$

где  $x_{ц}$ ,  $y_{ц}$  — координаты центра тяжести сечения  $S$  по оси  $X$  и  $Y$  в выбранных осях координат;  $x_i$ ,  $y_i$  — координаты центров тяжести вспомогательных площадей  $S_i$ , на которые разбивается сечение выработки  $S$ .

Поместить в центр тяжести начало прямоугольной системы координат  $XOY$ , ориентируя ее по осям симметрии выработки.

3. Обозначить номерами точки контура, в которых будут вычисляться напряжения; четыре нечетные точки поместить в местах пересечения координатных осей с контуром, а четыре четные точки расположить под углом к оси  $OX$

$$\theta_i = \pm \arctg(b/a). \quad (2.19)$$

4. Вычислить полуоси эллипса сравнения по формулам

$$a_3 = \sqrt{\frac{Sa}{\pi b}}; \quad b_3 = \sqrt{\frac{Sb}{\pi a}}. \quad (2.20)$$

5. Определить радиусы кривизны эллипса сравнения в каждой его характерной точке:

$$R_1^3 = R_3^3 = \frac{b^2}{a_3} R_3^3 = R_1^3 = \frac{a^2}{b_3}; \quad (2.21)$$

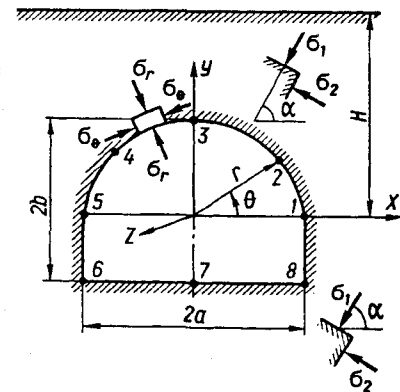


Рис. 2.11. Расчетная схема к методу ДГМИ

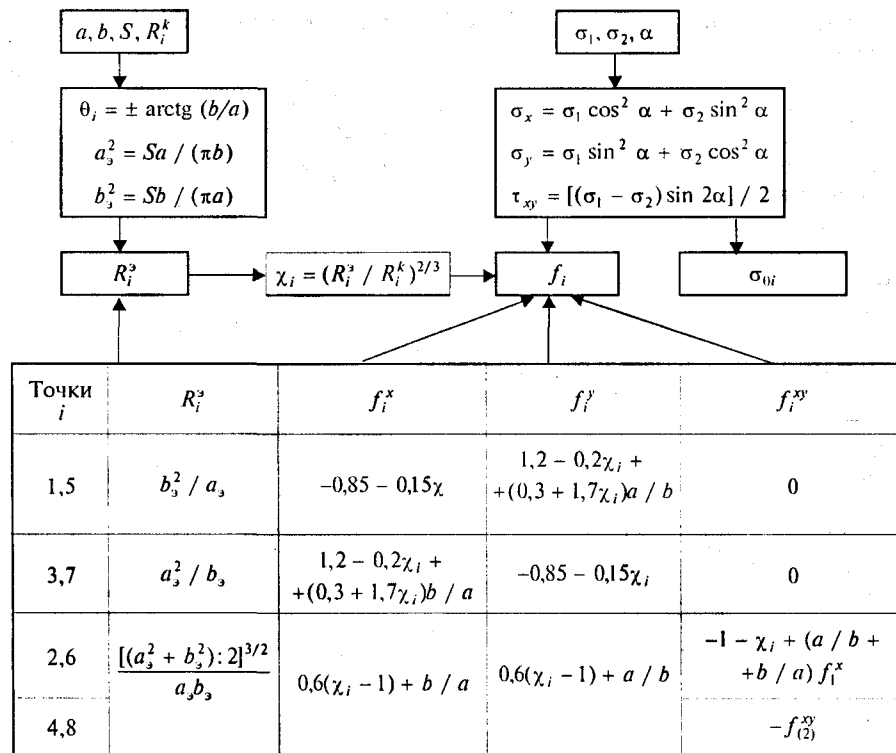


Рис. 2.12. Алгоритм и формулы для расчета напряжений

$$R_2^3 = R_3^3 = R_6^3 = R_8^3 = a_3^{-1} b_3^{-1} [0,5(a_3^2 + b_3^2)]^{3/2}. \quad (2.22)$$

Из заданных геометрических размеров проектного сечения выработки найти все радиусы кривизны реального контура  $R_i^k$  (на прямолинейных участках положить  $R_i^k = \infty$ ).

6. Найти приведенную кривизну каждой  $i$ -й точки контура выработки по формуле

$$\chi_i = (R_i^3 / R_i^k)^{2/3}. \quad (2.23)$$

Для угловых точек контура принять  $\chi = 6$ , для прямолинейных участков контура  $\chi = 0$ .

7. Для определения вспомогательных функций воспользоваться формулами, взятыми из рис. 2.12.

8. Максимальное напряжение  $\sigma_1$ , если нет экспериментальных данных, принять равным давлению вышележащей толщи массива  $\gamma H$ , а напря-

жение  $\sigma_2$  принять в соответствии с предельно возможными моделями поведения пород массива:

$$\sigma_1 = p = \gamma H; \quad \sigma_2^y = \lambda \sigma_1, \quad (2.24)$$

где  $\lambda$  — коэффициент бокового распора в массиве:

$$\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad \text{или} \quad \lambda = 1; \quad (2.25)$$

$\nu$  — коэффициент Пуассона вмещающих выработку пород массива, определяемый как средневзвешенный по толще пересекаемых выработкой пород:

$$\nu = \frac{\sum \nu_i m_i}{\sum m_i}; \quad (2.26)$$

$m_i$  — мощность  $i$ -го пласта пород, по которому пройдена выработка;  $\nu_i$  — коэффициент Пуассона соответствующего пласта породы. Направление максимального напряжения  $\sigma_1$ , при отсутствии экспериментальных данных, следует принять перпендикулярным напластованию пород.

Для определения действующих по осям симметрии выработки напряжений в массиве  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  следует воспользоваться формулами рис. 2.12, где  $\alpha$  — угол между осью  $X$  и направлением действия напряжения  $\sigma_1$ .

9. Рассчитать напряженное состояние пород в каждой характерной точке контура выработки по формуле

$$\sigma_i = \sigma_x f_i^{(x)} + \sigma_y f_i^{(y)} + \tau_{xy} f_i^{(xy)}. \quad (2.27)$$

10. Вычисления рекомендуется вести в табличной форме (табл. 2.2) для обоих случаев распределения напряжений в массиве  $\sigma_2^y$  и  $\sigma_2^x$ , приняв в каждой точке контура наиболее неблагоприятный случай.

Таблица 2.2. Форма таблицы для расчета напряжений на контуре выработки

№ точек	$R_i^k, \text{ м}$	$R_i^3, \text{ м}$	$\chi_i$	$f_i^x$	$f_i^y$	$f_i^{xy}$	$\sigma_i, \text{ МПа}$		$\sigma_c, \text{ МПа}$	$\sigma_n, \text{ МПа}$	$\sigma_i^{\text{max}} /  \sigma $
							$\lambda = 1$	$\lambda = \lambda_{\text{ин}}$			

11. Построить эпюру напряжений на контуре выработки, руководствуясь следующими особенностями их распределения на различных участках:

- на гладких участках контура напряжения меняются плавно;
- в угловой точке контура напряжения претерпевают резкие местные возмущения (всплески в виде пиков);
- размер участка влияния угловой точки на контуре пропорционален отклонению реального контура от эллипса сравнения;

• скорость изменения напряжений по углу  $\theta$  пропорциональна изменению приведенной кривизны контура  $\chi$ .

Эпюры напряжений следует построить на развертке проектного контура горной выработки для разных случаев распределения напряжений в массиве, затем выбрать наиболее неблагоприятные значения напряжений и построить по ним огибающую.

Необходимо учесть влияние неоднородности и анизотропии горных пород на концентрацию напряжений вокруг выработок, которое может быть весьма значительным. Если массив слоистый, то напряжения на контуре существенно изменяются от пласта к пласту и тем больше, чем сильнее разнятся их упругие характеристики. Поэтому при пересечении выработкой слоев пород с различным исходным напряженным состоянием распределение напряжений вокруг породного контура существенно усложнится. Аналитического решения подобной задачи не существует. Результаты, полученные методом конечных элементов (МКЭ) и другими численными методами, позволяют сформулировать ряд закономерностей:

при однородном исходном напряженном состоянии слоистого массива концентрация напряжений на контуре выработки резко возрастает в пластах с более жесткими упругими характеристиками и снижается в более податливых слоях пород;

степень изменения напряженного состояния в слое на контуре по сравнению с напряжениями в однородном массиве зависит от относительной мощности этого слоя в массиве и степени отличия его упругих характеристик от «средних» по массиву, рассматриваемому как квазиоднородный;

если рассматривать массив при исходном напряженном состоянии с средними упругими характеристиками (как квазиоднородный), то присущие слоистому массиву различия напряжений в слоях на контуре выработки будут несколько сглаживаться;

при решении задач об упругом распределении напряжений вокруг выработок, расположенных в слоистом массиве, целесообразно использовать расчетную схему И. В. Родина [2.9], позволяющую избежать существенных ошибок при определении напряжений и смещений в окрестности выработки.

### 2.3. Оценка устойчивости породных обнажений

С целью оценки устойчивости горной выработки необходимо сопоставить прочность окружающих ее пород с действующими в них напряжениями, что удобно выполнить в рамках построения паспорта устойчивости.

Паспорт устойчивости породных обнажений горных выработок является расчетным обоснованием для прогнозирования форм проявлений горного давления и, в дальнейшем, составления паспорта крепления. Паспорт устойчивости представляет собой совокупность графических

и расчетных материалов по сопоставлению эпюр напряженного состояния и прочности на контуре горной выработки. Он позволяет судить о степени устойчивости и характере разрушения различных участков контура и выработки в целом.

Эпюру прочности горных пород для паспорта устойчивости следует строить по данным лабораторных испытаний образцов в соответствии с утвержденными методиками (см. раздел 2.1). При этом для инженерных расчетов необходимо учитывать коэффициенты, обеспечивающие переход от прочности породы в образце к прочности породы в массиве, по формуле

$$\sigma^M = K_w K_f K_c \sigma^{обр}, \quad (2.28)$$

где  $\sigma^M$ ,  $\sigma^{обр}$  — показатель прочности породы на одноосные сжатие или растяжение соответственно в массиве и образце;  $K_w$  — коэффициент размокания пород;  $K_f$  — коэффициент снижения прочности при длительном нагружении породы;  $K_c$  — коэффициент структурного ослабления пород.

При определении устойчивости породных обнажений подземных сооружений прочность пород необходимо представлять в виде полярной диаграммы (см. рис. 2.2).

Для построения полярной диаграммы прочности следует с помощью испытаний определить прочность породы перпендикулярно и параллельно напластованию на одноосные сжатие  $\sigma_c^\perp$ ,  $\sigma_c^\parallel$  и растяжение  $\sigma_p^\perp$ ,  $\sigma_p^\parallel$ . Пределы изменения показателей прочности наиболее распространенных пород приведены в табл. 2.3.

В качестве примера оформления дан паспорт устойчивости породного контура горной выработки (рис. 2.13), пройденной по алевролиту. Исходные данные приведены на расчетной схеме. Основные результаты отражены в таблице расчетов, а конечным итогом расчетов является график локального критерия разрушения  $\omega$  выработки.

Локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР)  $\omega$  показывает, во сколько раз действующие напряжения превышают прочность породы в данной точке выработки:

$$\omega_i = f_i(\sigma_{ki}) / F_i(C_m), \quad (2.29)$$

где  $f_i(\sigma_{ki})$  — функция, характеризующая напряженное состояние  $\sigma_k$  в  $i$ -й точке;  $F_i(C_m)$  — функция, зависящая от параметров прочностных свойств  $C_m$  породы в той же точке.

Для пород контура незакрепленной горной выработки

$$\omega_i = \sigma_i / [\sigma]_i, \quad (2.30)$$

где  $\sigma_i$  — тангенциальное напряжение в  $i$ -й точке контура;  $[\sigma]_i$  — показатель прочности горной породы с учетом плоскостей ослабления в  $i$ -й точке контура.

Таблица 2.3. Показатели механических свойств горных пород\*

Показатель	Тип породы		
	аргиллит	алевролит	песчаник
Прочность на одноосное сжатие $\sigma_c^1$ , МПа	20/50	30/80	40/140
Соотношение прочностей:			
на сжатие $\sigma_c^1/\sigma_c^1$	0,3/0,6	0,4/0,8	0,5/0,9
на растяжение $\sigma_c^1/\sigma_c^1$	0,06/0,1	0,1/0,15	0,1/0,2
под $45^\circ$ на сжатие $\sigma_c^{45}/\sigma_c^1$	0,2/0,4	0,3/0,5	0,4/0,8
Коэффициенты:			
размокания $K_w$	0,1/0,7	0,2/0,8	0,3/1,0
структурного ослабления $K_c$	0,3/0,8	0,4/0,8	0,4/1,0
длительной прочности $K_t$	0,6/0,8	0,7/0,9	0,8/0,9
Угол внутреннего трения $\rho$ , град	18/22	22/27	27/33
Модуль деформации $E$ , МПа/ $10^4$	1/2	2/4	3/5
Коэффициент Пуансона $\nu$	0,2/0,4	0,2/0,3	0,1/0,3

\* В числителе указано нижнее, а в знаменателе — верхнее значение показателя.

Из (2.30) следует, что для сжимающих напряжений  $\omega_c^+ > 0$ , а для растягивающих  $\omega_c^- < 0$ . Преимуществом графика локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР)  $\omega_c$  на паспорте прочности является его наглядность (см. рис. 2.12). Те участки контура, где  $|\omega_c| < 1$ , устойчивы, разрушение пород на них не происходит. Там, где  $\omega_c^+ > 1$ , происходит разрушение от сжимающих напряжений, а при  $\omega_c^- < -1$  — от растягивающих напряжений. Величина критерия  $|\omega_c|$  по модулю характеризует степень опасности процесса разрушения пород на контуре: чем больше  $|\omega_c|$ , тем интенсивнее разрушение.

Следует обратить внимание на то, что паспорт устойчивости справедлив лишь для начального (исходного) положения контура, когда разрушения еще не начались. При развитии разрушения пород форма контура выработки изменится и расчеты следует производить заново. Таким образом, в процессе разрушения пород устойчивости выработки непрерывно изменяется. Для ведения подобного рода расчетов удобно использовать метод конечных элементов на ЭВМ шагами по времени.

Из графика ЛНКР на рис. 2.12 видно, что устойчивые участки находятся в границах  $30^\circ - 120^\circ$ , на остальном контуре следует ожидать разрушений от сжимающих ( $120^\circ < \theta < 225^\circ$  и  $-45^\circ < \theta < 30^\circ$ ) и растягивающих ( $235^\circ < \theta < 300^\circ$ ) напряжений. Наиболее интенсивно разрушение будет происходить в угловых точках породного контура вблизи почвы

$N_i$	$R_i^1$	$R_i^2$	$\chi_i$	$\sigma_x = 6,8$	$\sigma_y = 18,2$	$\tau_{xy} = -6,8$	$\sigma_i$	$ \sigma_i $	$\omega_c$
				$f_x$	$f_y$	$f_{xy}$			
1	2,0	1,2	0,71	-0,95	3,04	0	48,9	45	1,1
2	2,0	1,9	0,97	0,75	1,29	4,04	1,1	8	0,1
3	2,0	2,8	1,25	2,81	-1,04	0	-0,2	1,1	-0,2
4	2,0	1,9	0,97	0,75	1,29	-4,04	56,1	45	1,2
5	2,0	1,2	0,71	-0,95	3,04	0	48,9	45	1,1
6	0	1,9	6	3,81	4,31	4,04	76,9	4,0	19,3
7	$\infty$	2,8	0	1,43	-0,83	0	-5,4	1,1	-4,9
8	0	1,9	6	3,81	4,31	-4,04	132	4,0	33

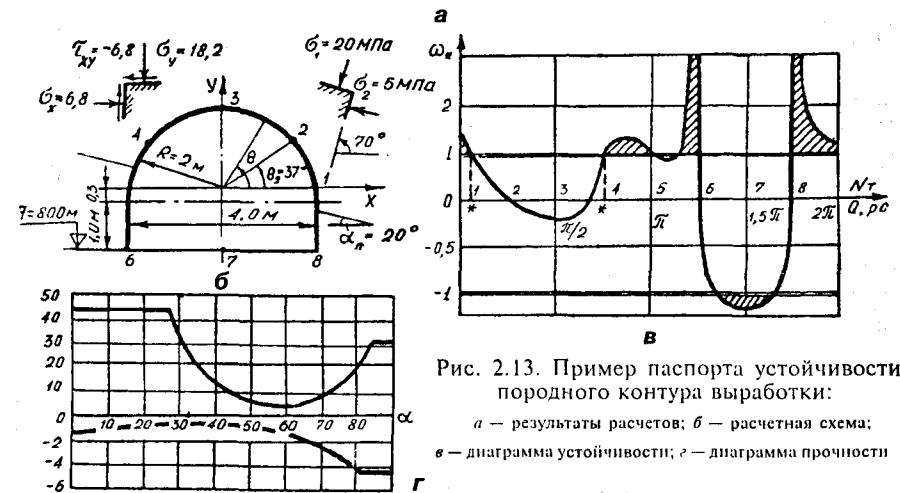


Рис. 2.13. Пример паспорта устойчивости породного контура выработки:

a — результаты расчетов; б — расчетная схема; в — диаграмма устойчивости; г — диаграмма прочности

выработки от сжимающих напряжений, а в почве начнут развиваться «бегущие» трещины разрыва от растягивающих напряжений. В рассмотренном примере в кровле выработки действуют незначительные растягивающие напряжения, меньшие прочности породы, что обуславливает ее устойчивость. При разрушении породы форма выработки начнет изменяться: ее почва окажется разбитой трещинами отрыва и выдавленной в выработку сжимающими напряжениями, действующими в угловых точках контура. Это, в свою очередь, вызовет изменение напряженного состояния пород на всем контуре, что потребует внесения корректив в паспорт устойчивости выработки. Таким образом, данная методика не является отражением статической картины состояния выработки, а позволяет учесть развитие во времени и пространстве разрушение и деформирование горных пород.

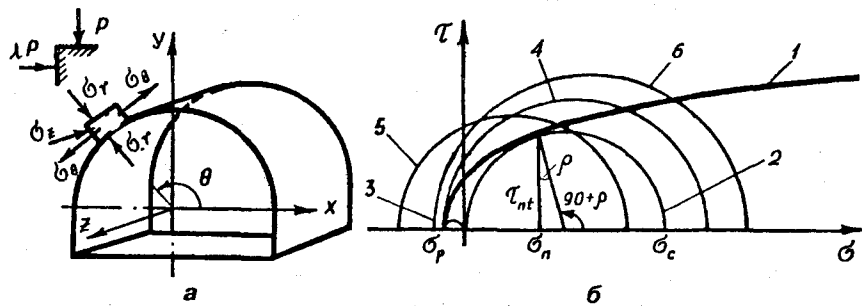


Рис. 2.14. Определение механизма разрушения пород вокруг выработки:

*a* — главные напряжения на контуре; *b* — диаграмма О. Мора

Рассмотрим проблему выбора оптимальной формы выработки с более общих позиций с помощью паспорта устойчивости. Если оставить критерий оптимальности  $\omega_c = \text{const}$  по всему контуру выработки, то можно учесть изменение прочности на разных участках контура выработки. Принимая равенство критериев ЛНКР  $\omega_c$  в кровле, почве и боках выработки, получим обобщенную формулу для определения оптимального соотношения полуосей:

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{(S+1)^2(1-\lambda)^2}{16\lambda^2} + \frac{S}{\lambda}} + \frac{(S+1)(1-\lambda)}{4\lambda}, \quad (2.31)$$

где  $S$  — соотношение прочности пород в кровле и боках выработки:  $S = \sigma_c^k / \sigma_c^b$ ;  $\lambda$  — коэффициент бокового распора массива.

Разрушение пород вокруг выработки происходит постепенно, развиваясь от контура в глубь массива. Особенности процесса разрушения предопределяют проявления горного давления во времени, и их можно прогнозировать на основе анализа паспорта прочности породного контура по мере разрушения пород.

На контуре горной выработки (рис. 2.14, *a*) действуют в общем случае три главных напряжения: радиальное  $\sigma_r$ , тангенциальное  $\sigma_\theta$  и вдоль оси выработки  $\sigma_z$ . В зависимости от сочетания действующих главных напряжений на контуре выработки разрушение будет происходить по двум различным механизмам: отрывом (при растяжении) и сдвигом (при сжатии). Если главные напряжения окажутся различных знаков, необходимо определить, по какому механизму будет происходить разрушение. Для этого наряду с паспортом прочности породы на диаграмме О. Мора следует построить круг напряжений в рассматриваемой точке контура (рис. 2.14, *b*).

На рис. 2.14, *b* представлен паспорт прочности  $l$  с кругами прочности на одноосное сжатие ( $\sigma_c$ ) 2 и растяжение ( $\sigma_p$ ) 3. Если на контуре действу-

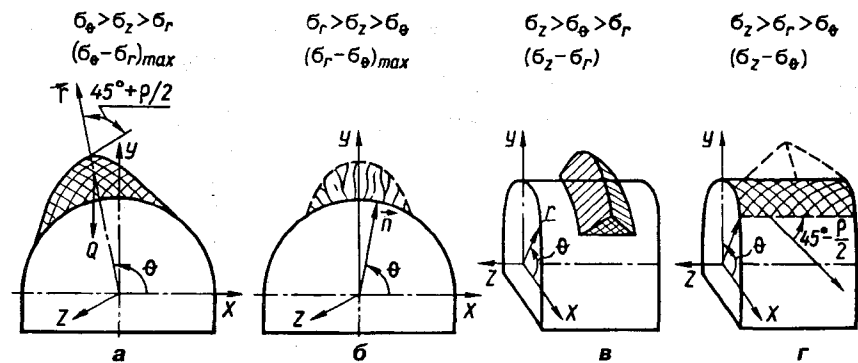


Рис. 2.15. Характерные формы разрушения пород в выработке:

*a* — вывал; *b* — свод естественного равновесия; *в* — коническая и *г* — винтовая поверхности разрушения

ют напряжения различных знаков,  $\sigma_z > \sigma_r = 0 > \sigma_\theta$ , то для сочетания напряжений в виде круга 4 разрушение породы будет происходить сдвигом, круга 5 — отрывом, а для круга 6 необходимо определить локальный критерий разрушения  $\omega_c$  для растяжения и сжатия. В точке породного контура разрушение будет происходить по тому механизму, которому соответствует наибольший по модулю критерий  $|\omega_c|$ .

При разрушении отрывом трещины растут в плоскости, перпендикулярной к растягивающему напряжению; при разрушении сдвигом плоскости скольжения проходят под углом  $\alpha = 45^\circ - \rho/2$  к линии действия максимального главного напряжения и перпендикулярно к площадке среднего по величине напряжения.

Разрушение сдвигом происходит под действием касательного напряжения  $\tau_{nt}$ , которое зависит от максимальной разности главных напряжений:

$$\tau_{nt} = 0,5\Delta\sigma \cos \rho. \quad (2.32)$$

Характер разрушения пород вокруг выработки зависит от того, какие напряжения дают максимальную разность  $\Delta\sigma$ . На рис. 2.15 приведены основные случаи разрушения породных обнажений горных выработок в зависимости от различных сочетаний главных напряжений на контуре выработки. А поскольку эти напряжения довольно сложным образом изменяются от координат рассматриваемой точки (полярного угла и расстояния от контура), то и механизмы разрушения могут изменяться от точки к точке массива, в которых нарушается одно из условий прочности. Этим обусловлена чрезвычайная сложность процессов проявлений горного давления в подземных выработках.

Возможные механизмы разрушения пород в выработке обычно рассматриваются в статической постановке, т. е. без учета их развития. Статическое рассмотрение позволило нам выявить и объяснить мно-

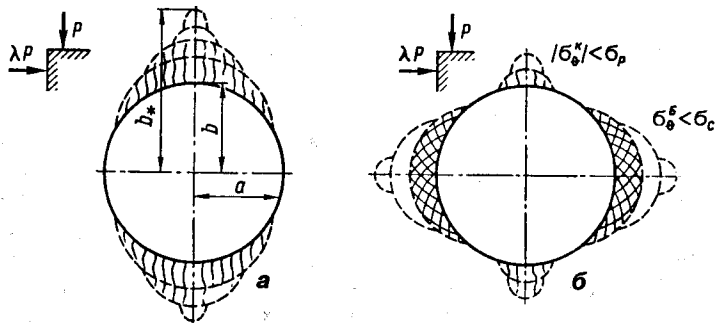


Рис. 2.16. Формоизменение породного контура в процессе разрушения от растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений

гообразии форм разрушения породного контура выработки. Однако без ответа оставались важные вопросы: как развивается процесс разрушения; какие формы приобретает новый породный контур, если крепь отсутствует; как изменяется его устойчивость по мере развития разрушения? Ответ на эти вопросы можно получить при рассмотрении процесса разрушения по мере его развития под действием напряжений различных знаков, что вызывает перераспределение напряжений не только на участке разрушения, но и на всем контуре выработки. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим изменение напряжений на контуре круглой выработки — в кровле (почве) и боках (рис. 2.16).

Если происходит разрушение контура под действием растягивающих напряжений, то в кровле (и почве) выработки должно действовать растягивающее напряжение  $\sigma_0^k < 0$ , превышающее по модулю прочность на одноосное растяжение  $\sigma_p$ , т. е. соблюдается условие  $|\sigma_0^k| > \sigma_p$ . Разрушение приведет (см. рис. 2.15, а) к увеличению высоты  $b$ , что сразу изменит все напряжения вокруг выработки. В кровле и почве напряжение  $\sigma_0^k$ , которое было отрицательным, по мере роста высоты  $b$  увеличивается и стремится к нулю:  $\sigma_0^k \rightarrow 0$ . В боках выработки рост высоты  $b$  также приводит к уменьшению напряжений  $\sigma_0^k$ . Таким образом, разрушение пород на контуре от растяжения способствует повсеместному снижению напряжений вокруг выработки. Как только напряжения в кровле в процессе разрушения уменьшатся до уровня прочности  $|\sigma_0^k| \leq \sigma_p$ , разрушение прекратится и выработка приобретет устойчивую форму.

При хрупком разрушении породного контура от сжимающих напряжений он также будет менять свою форму, вызывая тем самым изменения концентрации напряжений. В обычном случае разрушение начинается в боках (там сжимающие напряжения максимальны при  $\lambda \leq 1$  и  $a/b > 1$ ), что приводит к увеличению ширины выработки и, как следствие, к возрастанию сжимающих напряжений в боках и растягивающих — в кровле и почве выработки. Таким образом, фронт хрупкого разрушения (ФХП)

самоускоряется, что приводит к завалу незакрепленной выработки. Если породы обладают способностью к пластическим деформациям, устойчивость выработки снижается менее заметно. В этом случае возможно последующее разрушение пород от возникающих растягивающих напряжений в кровле и почве выработки.

Подводя итог проведенному анализу направленности процессов разрушения, следует отметить существенное различие механизмов разрушения пород вокруг выработки. Но все их разнообразие основывается на двух фундаментальных закономерностях изменения устойчивости выработки и развития горного давления в сжатом массиве [2.10].

Первая фундаментальная закономерность: если разрушение пород (как правило, от растяжения) и рост зоны неупругих деформаций (ЗНД) начинаются на участке контура выработки в направлении действия максимальной компоненты исходного поля напряжений, то это приводит по мере развития разрушения к снижению концентрации напряжений по всему контуру; разрушение самопроизвольно прекращается, выработка приобретает устойчивую форму и в ней можно устанавливать легкие поддерживающие крепи. Эта закономерность наблюдается при соблюдении следующих соотношений (в терминах ЛНКР):

$$|\omega_-| > 1 > \omega_+^* \quad \text{или} \quad |\omega_-| > \omega_+^* > 1. \quad (2.33)$$

Вторая фундаментальная закономерность: если разрушение пород и рост ЗНД начинаются на участке контура выработки в направлении минимальной компоненты исходного поля напряжений (как правило, от сжатия), то увеличивается условный размер (ширина) выработки в этом направлении, концентрация напряжений возрастает, процессы роста ЗНД интенсифицируются, уменьшая устойчивость выработки, что требует возведения опорной крепи, особых мер поддержания и охраны. Условия реализации этой закономерности следующие:

$$\omega_+^* > 1 > |\omega_-| \quad \text{или} \quad \omega_+^* > |\omega_-| > 1. \quad (2.34)$$

Эти две закономерности дают четкое различие между понятиями «малых» и «больших» глубин разработки, между «обычными» и «сложными» горно-геологическими условиями, что ранее являлось предметом научных дискуссий.

Следовательно, закономерности разрушения породного контура могут быть положены в основу классификации устойчивости подземных выработок. В термин «устойчивость» выработки вкладывается следующее содержание. Если в процессе разрушения пород происходит повсеместное уменьшение ЛНКР  $|\omega_+|$ , то разрушение самопроизвольно остановится и вновь образованный контур будет стабильным. Возрастание ЛНКР  $|\omega_+|$  хотя бы на части контура выработки приводит к дальнейшему ускоренному развитию разрушения и снижению ее устойчивости.

Классификация устойчивости выработок и развития горного давления базируется на анализе изменения локального нормированного критерия разрушения  $\omega$  по знаку и величине при формоизменении контура в процессе разрушения. В этом главное отличие новой классификации от всех существующих, основанных на учете не причин, а следствий (смещений, давления), рассматривающих разрушение в статике, а не в развитии.

Вторичными классификационными признаками, позволяющими выделить многочисленные подклассы и охватить все многообразие и сложность форм проявлений горного давления, являются:

модель поведения пород (хрупкая, пластичная, вязкоупругая и др.);  
участок разрушения на контуре (кровля, почва, бока);

структурное строение пород и массива (угол падения, трещиноватость, слоистость, неоднородность, анизотропия);

ориентация выработки (горизонтальная, вертикальная, вкрест, диагонально и вдоль напластования);

движение и давление флюидов (газ, подземные воды) в трещинах, порах и пустотах массива и др.

Разработанная классификация форм проявлений горного давления в одиночной выработке без учета вторичных факторов приведена на рис. 2.17. В качестве основного (базового) критерия принят тип неравенств между локальными критериями разрушения пород  $\omega$  на различных участках контура. Этот критерий предопределяет механизм развития разрушения, тогда как модуль локального критерия разрушения  $|\omega_c|$  показывает его интенсивность на данном участке контура.

Вспомогательную роль выполняет оценочный критерий проф. Заславского Ю.З. [2.11]

$$k_3 = p/\sigma_c^0, \quad (2.35)$$

где  $p$  — максимальная компонента исходного поля напряжений горного массива (в частном случае это может быть вес вышележащей толщи пород), МПа;  $\sigma_c^0$  — прочность пород на одноосное сжатие (в образце), МПа.

Вторым вспомогательным критерием, оценивающим последствия проявления горного давления, принята относительная деформация контура  $\epsilon_k$ , выраженная для удобства записи в процентах:

$$\epsilon_k = (U_k/a_b) \cdot 100\%, \quad (2.36)$$

где  $U_k$  — смещения породного контура выработки, м;  $a_b$  — характерный линейный размер выработки, м.

Для обычных выработок можно принять

$$a_b = \sqrt{S/\pi}, \quad (2.37)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения выработки в черне, м<sup>2</sup>.

Согласно предложенной классификации, к вполне устойчивым (I класс) относятся выработки, у которых почти на всем контуре  $|\omega_c| < 1$  и лишь на его отдельных изолированных участках возможны отслоения по-

$\omega_c < 1$ $k_3 < 0,15 \quad \epsilon_k < 1\%$	$\omega_c^+ < 1 <  \omega_c^- $ $k_3 = 0,1 - 0,25 \quad \epsilon_k = 1 - 5\%$	$1 < \omega_c^+ <  \omega_c^- $ $k_3 = 0,2 - 0,4 \quad \epsilon_k = 5 - 10\%$
$1 <  \omega_c^-  < \omega_c^+$ $k_3 = 0,3 - 0,6 \quad \epsilon_k = 10 - 20\%$	$\omega_c^- > 1$ $k_3 = 0,5 - 1,0 \quad \epsilon_k = 20 - 50$	$\omega_c^+ \gg 1$ $k_3 > 1 \quad \epsilon_k > 50\%$

Рис. 2.17. Классификация устойчивости породного контура и форм проявления горного давления в выработке

род и небольшие вывалы, вызванные местными ослаблениями прочности или концентрациями напряжений (например, на неровностях контура).

II класс охватывает процессы образования сводов естественного равновесия (СЕР) от растягивающих  $|\omega_c^-| > 1 > \omega_c^b$  или сжимающих  $\omega_c^+ > 1 > \omega_c^b$  (где  $\omega_c^b$  — ЛНКР в боках выработки) напряжений с последующей стабилизацией нового контура. Разумеется, второй случай образования СЕР от сжимающих напряжений возможен только при наличии прочностной анизотропии пород (слоистость, трещиноватость), что приводит к отслоению и потере устойчивости слоев.

В III классе устойчивости наблюдается одновременное разрушение пород от растяжения и сжатия, причем  $|\omega_c^-| > \omega_c^+ > 1$ , т. е. разрушение от растяжения является доминирующим, что приводит к образованию СЕР с частичным разрушением пород в боках.



IV класс (контур частично неустойчив), в отличие от третьего, основывается на ином неравенстве:  $\omega_+^+ > |\omega_-^-| > 1$ , т. е. разрушение от сжатия является первичным (например, в боках) и вызывает или усиливает разрушение от растяжения (в кровле или почве). Такая расчетная схема выпала из поля зрения ученых несмотря на свою широкую распространенность.

V класс (неустойчивые породы) охватывает случай, когда на большей части контура  $\omega_+^+ > 1$  и вокруг выработки возникает зона неупругих деформаций (ЗНД), наблюдаются большие смещения пород и требуется мощная отпорная крепь.

K VI классу отнесены крайне неустойчивые формы проявлений горного давления, которые наблюдаются при  $\omega_+^+ \gg 1$ . При этом в хрупких (часто в газонасыщенных под большим давлением) породах происходят горные удары и выбросы угля и пород, т. е. динамические процессы, протекающие за малое время (порядка секунд). В пластичных, слабых (особенно размокающих) породах наблюдается вязкопластическое течение почти с постоянной скоростью. Чтобы сохранить выработку, требуются мощные крепи и большие затраты на их ремонт и восстановление.

Из предложенной классификации следует, что методы расчета проявлений горного давления в выработке должны базироваться на принципиально различных расчетных схемах. Поэтому попытки охватить все многообразие форм проявлений горного давления в одном универсальном расчетном методе (как, например, в нормативном документе [2.1]) заведомо обречены на неудачу.

Для прогнозирования ожидаемой формы горного давления следует построить паспорт устойчивости выработки и вычислить ЛНКР  $\omega_+$ , а если исходные данные не вполне достоверны или отсутствуют, проверить по вспомогательным критериям  $\epsilon_k$  и  $k_3$ .

Преимуществом предлагаемого подхода является четкая идентификация возможных расчетных схем проявлений горного давления (ПГД) в выработке, из которых вытекают важные рекомендации по выбору параметров крепи и способов управления горным давлением. Казалось бы, велика ли разница в поведении массива, если разные формы потери устойчивости все равно приводят к разрушению пород вокруг выработки, а иногда и к одинаковым смещениям? Аналитическими и экспериментальными исследованиями удалось доказать, что эта разница весьма существенна, причем закономерности развития ПГД в выработке оказываются прямо противоположными. Это видно из табл. 2.4, где даны частные производные (коэффициенты эластичности), характеризующие изменение отпора крепи  $P$  при варьировании различных влияющих факторов. Здесь  $H$  — глубина разработки;  $a$  — характерный размер выработки (ширина);  $\sigma_c$ ,  $\sigma_p$  — прочность пород соответственно на одноосное сжатие и растяжение;  $r$  — размер зоны разрушения пород вокруг выработки;  $\rho$  — угол внутреннего трения пород.

Таблица 2.4. Частные производные основных влияющих на устойчивость факторов

Категория устойчивости	Основные закономерности для отпора крепи $P$						
	$\partial P/\partial H$	$\partial P/\partial a$	$\partial P/\partial \sigma_c$	$\partial P/\partial \sigma_p$	$\partial P/\partial r$	$\partial P/\partial C_k$	$\partial P/\partial \rho$
II, III	= 0	> 0	= 0	<< 0	>> 0	= 0	= 0
IV, V	>> 0	= 0	<< 0	= 0	<< 0	>> 0	<< 0

Равенство производной нулю показывает, что данный фактор на отпор крепи не влияет, знаки неравенств отмечают заметное или значительное снижение (увеличение) отпора  $P$  при изменении рассматриваемого фактора. Из табл. 2.4 следует, что:

на «малых» глубинах нагрузка на крепь  $P$  не зависит от глубины  $H$ , прочности пород на сжатие  $\sigma_c$ , жесткости крепи  $C_k$ , режима работы и времени установки крепи, угла внутреннего трения пород; с другой стороны, зависит от размеров выработки, прочности пород на растяжение  $\sigma_p$  и резко увеличивается при росте высоты свода естественного равновесия;

на «больших» глубинах нагрузка на крепь  $P$  не зависит от размеров выработки и от прочности пород на растяжение  $\sigma_p$ , зато зависит от прочности пород на сжатие  $\sigma_c$ , угла внутреннего трения пород и резко повышается при увеличении глубины  $H$ , жесткости крепи  $C_k$  и, что для многих является неожиданностью, снижается при росте  $r$ .

Эти принципиальные различия полностью изменяют стратегию управления горным давлением в выработке при переходе на «большие» глубины, а точнее, в зону действия второй фундаментальной закономерности ПГД.

#### 2.4. Основные режимы работы и геомеханические параметры крепи

Геомеханическими параметрами крепи считают ее грузонесущую способность (отпор, реакцию) и податливость (жесткость). Отпор (реакция) крепи  $q$  характеризует ее силовое, а податливость  $U$  — деформационное взаимодействие с массивом.

Графическое или аналитическое представление связи между грузонесущей способностью  $q$  и податливостью  $U$  крепи называют ее деформационно-силовой характеристикой (ДСХ). Впервые графическое представление механизма работы крепи в горной выработке дал Б. В. Матвеев [2.12], который подробно рассмотрел податливые и жесткие режимы взаимодействия крепи с массивом и предложил близкую к современной трактовке их графическую интерпретацию в виде «характеристики деформирования» крепи.

С позиций механики горных пород ДСХ полностью характеризует крепь и избавляет от необходимости рассмотрения ее конструктивных особенностей, что очень удобно для постановки и решения задач о взаимодействии крепи с массивом.

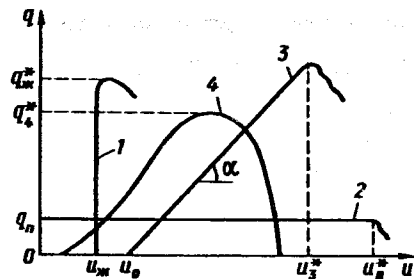


Рис. 2.18. Деформационно-силовые характеристики крепи с режимом работы:

1 — жестким; 2 — податливым; 3 — линейным; 4 — нелинейным

В аналитической форме уравнение ДСХ крепи имеет вид

$$U = U(q) \text{ или } q = q(U), \quad (2.38)$$

а эти зависимости определяют экспериментально на стендах по испытанию крепи в специализированных лабораториях.

В зависимости от ДСХ различают два предельных (идеализированных) режима ее «работы» (взаимодействия с массивом) — жесткий и податливый (рис. 2.18).

Жесткий режим работы определяется в виде заданных

(фиксированных) крепью допустимых смещениях породного контура. На рис. 2.18 режим заданных смещений  $U_{ж}$  представлен линией 1, которая показывает, что вначале породный контур сместился на величину  $U_{ж}$ , затем, после контакта с крепью, смещения пород остановились и начала возрастать нагрузка  $q$ . При достижении нагрузки уровня предельной  $q_{ж}^*$  происходит деформация крепи.

Податливый режим представлен линией 2 (рис. 2.18) и характеризуется заданным  $q_n$  отпором крепи, т. е. это режим заданных нагрузок, при которых растут смещения породного контура, контактирующего с крепью. Когда смещения достигнут предела конструктивной податливости крепи  $U_{ж}^*$ , крепь разрушается.

Сравнивая оба режима работы, можно видеть, что они описываются двумя геомеханическими параметрами: заданными ( $U_{ж}$ ,  $q_n$ ), которые «отслеживаются» крепью в процессе ее взаимодействия с массивом, и предельными ( $q_{ж}^*$ ,  $U_n$ ), при достижении которых нормальная эксплуатация крепи невозможна.

Режим линейно-возрастающего сопротивления крепи представлен графиком 3, когда до момента контакта крепи с породами контур сместился на величину  $U_0$ , а затем смещения крепи  $U$  растут пропорционально росту нагрузки  $q$  вплоть до деформации крепи ( $U = U^*$ ). Степень «жесткости» крепи предопределяется углом наклона графика к оси  $U$ ; численно коэффициент жесткости крепи

$$C_k = \operatorname{tg} \alpha \quad (0 \leq C_k < \infty). \quad (2.39)$$

Значит, крепь с ДСХ типа 3 полностью описывается тремя параметрами:  $U_0$ ,  $U^*$ ,  $C_k$  (рис. 2.18). Чем больше  $C_k$ , тем ближе ДСХ крепи к жесткому режиму работы. Для идеально податливой крепи  $C_k = 0$ , для идеально жесткой  $C_k \rightarrow \infty$ .

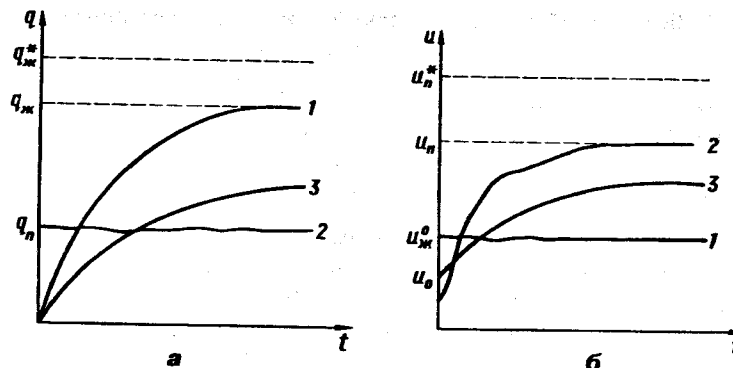


Рис. 2.19. Изменение геомеханических параметров для жесткой и податливой крепи во времени:

а — при изменении отпора; б — смещении

Наиболее общий случай ДСХ крепи представлен графиком 4 с переменным  $C_k$ ; в каждой точке графика он равен производной:

$$C_k = dq/dU. \quad (2.40)$$

При достижении предельного значения  $q^*$  (для жесткой крепи),  $U^*$  (для податливой) или одного из этих параметров для других типов крепи конструкция претерпевает изменения и получает остаточные деформации (пластические шарниры, потеря устойчивости, заклинивание податливых соединений, разрушения) и меняет свой режим работы. Иногда расчетная схема крепи в процессе взаимодействия с массивом меняется несколько раз. Однако всегда на конечной стадии ДСХ содержит «падающую» ветвь, у которой  $C_k < 0$ . Это значит, что при увеличении деформаций  $U$  грузонесущая способность крепи  $q$  уменьшается. Иногда отрицательный коэффициент жесткости  $C_k$  называют модулем спада. При  $C_k \rightarrow -\infty$  крепь хрупко разрушается, что наиболее опасно.

На рис. 2.19 достаточно наглядно видны различия между жестким (1) и податливым (2) режимами работы крепи, если проследить за изменением отпора  $q$  и смещений  $U$  во времени при развитии смещений породного контура.

В реальных конструкциях ДСХ крепи различны в зависимости от условий взаимодействия с массивом, особенностей контакта с породой (сцепление, проскальзывание, толщина забутовки, ее качество и т. д.), закономерностей распределения внешних нагрузок на крепь и их изменения во времени. Поэтому у одной и той же крепи могут быть разные ДСХ по разным направлениям нагружения и при разных условиях контакта с массивом. Это чрезвычайно затрудняет оценку режимов работы крепи, которая по одному направлению может быть податливой (например, по вертикали), а по другому (с боков) — жесткой.

Важной обобщенной геомеханической характеристикой крепи является ее работоспособность, которая количественно оценивает работу, совершаемую конструкцией в процессе ее противодействия проявлениям горного давления.

Работоспособность крепи удобно определить непосредственно из графика ДСХ — это будет не что иное, как площадь под графиком (см. рис. 2.18). Аналитически работоспособность крепи определяется по формуле

$$A_k(U) = \int_0^U q dx, \quad (2.41)$$

где  $x$  — текущее значение смещений,  $0 \leq x \leq U$ .

Как следует из определения работоспособности крепи, она зависит от ее грузонесущей способности (отпора) и податливости. Абсолютно жесткая крепь обладает нулевой работоспособностью. Чем больше податливость крепи, тем большую она совершает работу в процессе противодействия смещениям пород в выработку. Поэтому так важно обеспечить податливость крепи, конструкции, что позволяет избежать чрезмерного повышения ее отпора (чаще всего за счет увеличения материалоемкости).

При выборе и обосновании геомеханических параметров крепи необходимо опираться на основные закономерности формирования нагрузки на крепь при сводообразовании (СЕР) от растягивающих напряжений и развитии зоны неупругих деформаций (ЗНД) от напряжений сжатия.

Особенности взаимодействия крепи с массивом в условиях образования СЕР (на «малых» глубинах): нагрузка на крепь прямо пропорциональна ширине и не зависит от глубины расположения выработки и прочности пород на сжатие. Крепь взаимодействует с породами в режиме заданной нагрузки, на которую не оказывает влияние режим работы крепи. Форма выработки (соотношение между высотой и шириной) существенно влияет на развитие свода СЕР. В зависимости от соотношения прочности на растяжение в кровле и почве выработки, а также величин растягивающих напряжений СЕР может образовываться в почве (чаще всего), в кровле или по обоим направлениям. Нагрузка на крепь возникает только со стороны кровли выработки, что значительно облегчает задачу проектирования крепи.

В ДГМИ [2.13] предложена зависимость определения высоты СЕР, учитывающая оба главных размера выработки, напряженное состояние массива пород и прочность их на растяжение:

$$h_c = \alpha_c \left[ \frac{a}{2\lambda} \left( 1 - \lambda - \frac{\sigma_p}{\gamma H} \right) - b \right], \quad (2.42)$$

где  $\alpha_c$  — коэффициент, учитывающий направление образования СЕР:  $\alpha_c = 2$  при сводообразовании только в кровле;  $\alpha_c = 1$  — в кровле и почве,  $\alpha_c = 0$  — только в почве;  $a, b$  — соответственно, половина ширины и высоты выработки в черне.

Из анализа поведения массива при образовании ЗНД (на «больших» глубинах) вытекают следующие закономерности:

нагрузка на крепь  $q$  возрастает при увеличении исходного напряженного состояния массива (глубины) и, что важно, не зависит от размеров выработки (при неизменной форме);

чем больше радиус ЗНД  $r$ , тем больше смещения  $U$  пород в выработку, тем меньше нагрузка на крепь  $q$ ;

при образовании зоны руинного разрушения выработка без крепи существовать не может — происходит ее завал;

в породах с остаточной прочностью или пластичных (идеально связанная или пластичная среды) роль отпора обычной крепи пренебрежимо мала и смещения пород происходят почти независимо от отпора крепи;

отпор крепи  $q$  существенно влияет на радиус ЗНД при хрупком разрушении пород, а напряжения внутри ЗНД не зависят от исходного напряженно-деформированного состояния массива.

Эти закономерности для «больших» глубин разработки существенно отличаются от таковых для сводов естественного равновесия, что требует пересмотра стратегии крепления и поддержания горных выработок.

Несмотря на то, что металлокрепь из СВП применяется давно и в больших объемах, ее конструкция до сих пор не отработана.

Проф. Картозия Б. А.

### 3. Конструктивные решения рамных крепей

#### 3.1. Общие конструктивные признаки

Рамная крепь предназначена для восприятия проявлений горного давления со стороны окружающего массива и представляет собой грузонесущую конструкцию, выполненную в виде отдельных рам, установленных в горной выработке через заданное расстояние и собранных из несущих элементов посредством соединений различных типов. Рамы крепи взаимодействуют с массивом горных пород через межрамные ограждения и забутовку (см. рис. 1.3, 1.4)

Несущие элементы выполнены в виде прямо- или криволинейных стержней, работающих на сжатие и (или) изгиб. Они выполняют функцию восприятия и перераспределения давления со стороны массива на окружающие выработку породы, создают подпор на контуре и препятствуют развитию смещений пород внутрь выработки. Несущий элемент, воспринимающий нагрузку со стороны кровли, обычно называют *верхней комой*. Он передает нагрузку на сочлененные с ним посредством различного типа соединений несущие элементы, называемые *стойками* (горняцкий сленг — «ножки»). Последние, при незамкнутой конструкции крепи, опираются своими концами на почву горной выработки, а в замкнутой — на нижний несущий элемент (*лежень*).

Работоспособность крепи во многом зависит от принятой конструкции соединений (узлов) несущих элементов. Среди них следует различать жесткие, шарнирные, податливые и комбинированные. Соединения грузонесущих элементов друг с другом не только должны воспринимать все усилия, возникающие в крепи, но и обеспечивать необходимую деформационную характеристику крепи. Жесткое соединение элементов является наиболее простым по конструкции и обеспечивает неподвижную фиксацию контактирующих элементов. Шарнирное соединение элементов дает возможность их взаимного поворота в плоскости рамы с заданным изгибающим моментом, равным в обычных соединениях моменту сил трения в шарнире. Если соседние элементы крепи соединены податливо, то в зависимости от конструкции такого соединения («узла» или «замка» податливости) один из них или оба могут перемещаться в продольном направлении, если продольная сила превышает сопротивление податливости. От характеристики («настройки») замка податливости во многом зависит работоспособность крепи в целом. Количество и место расположения того

или иного соединения должно определяться особенностями взаимодействия крепи с массивом. Наибольшее распространение получили податливые и шарнирные соединения. Жесткие соединения преобладали главным образом в устаревших конструкциях и почти вышли из употребления.

Межрамные ограждения (затяжки) устанавливаются по внешнему контуру крепи и служат для: а) устранения вывалов породы внутрь выработки; б) перераспределения нагрузки со стороны массива на рамы крепи; в) выполнения вспомогательных функций (как опалубка при тампонаже закрепного пространства, для снижения аэродинамического сопротивления выработки и др.). Грузонесущая и деформационная способность ограждения должна соответствовать несущей способности рамы.

Стяжки и распорки, устанавливаемые между соседними рамами, выполняют вспомогательные функции восприятия и перераспределения нагрузок, направленных из плоскости рамы, создавая из отдельных рам пространственную конструкцию и препятствуя потере устойчивости элементов в виде изгибно-крутильных пространственных деформаций. Особенно велика роль межрамных соединений в забое горной выработки для удержания рам в проектном положении при буровзрывном способе проведения. Они также выполняют монтажные функции при возведении некоторых конструкций.

Частью конструкции крепи следует считать предусмотренные техническими условиями монтажа расклинки, которые обеспечивают фиксацию рамы относительно породного контура и, в некоторых случаях, формируют начальное распределение нагрузки на крепь.

Забутка закрепного пространства представляет собой породную мелочь, заполняющую пустоты за крепью, и является ее неотъемлемым элементом. Забутка обеспечивает требуемые контактные условия взаимодействия крепи с породным контуром, снижает неравномерность нагружения крепи со стороны массива, устраняет возможность динамического воздействия от обрушений пород, формирует пассивный отпор пород при деформации крепи, что значительно увеличивает ее несущую способность. В качестве забутовки в последнее время стали широко использовать тампонаж закрепного пространства различными твердеющими растворами.

Рамной крепи можно придавать разнообразную форму в зависимости от назначения выработки и ожидаемых проявлений горного давления (см. раздел 2). Наиболее распространенными являются сводчатая и трапециевидная формы, значительно реже встречаются кольцевая, подковообразная, эллиптическая и др. (рис. 3.1).

Как видно из краткого описания конструкции, несмотря на кажущуюся простоту рамной крепи, она состоит из большого числа элементов различного функционального назначения, которые должны, взаимодействуя друг с другом и массивом горных пород, обеспечить эксплуатационную устойчивость выработки в различных горно-геологических условиях.

### 3.2. Развитие конструкций профиля

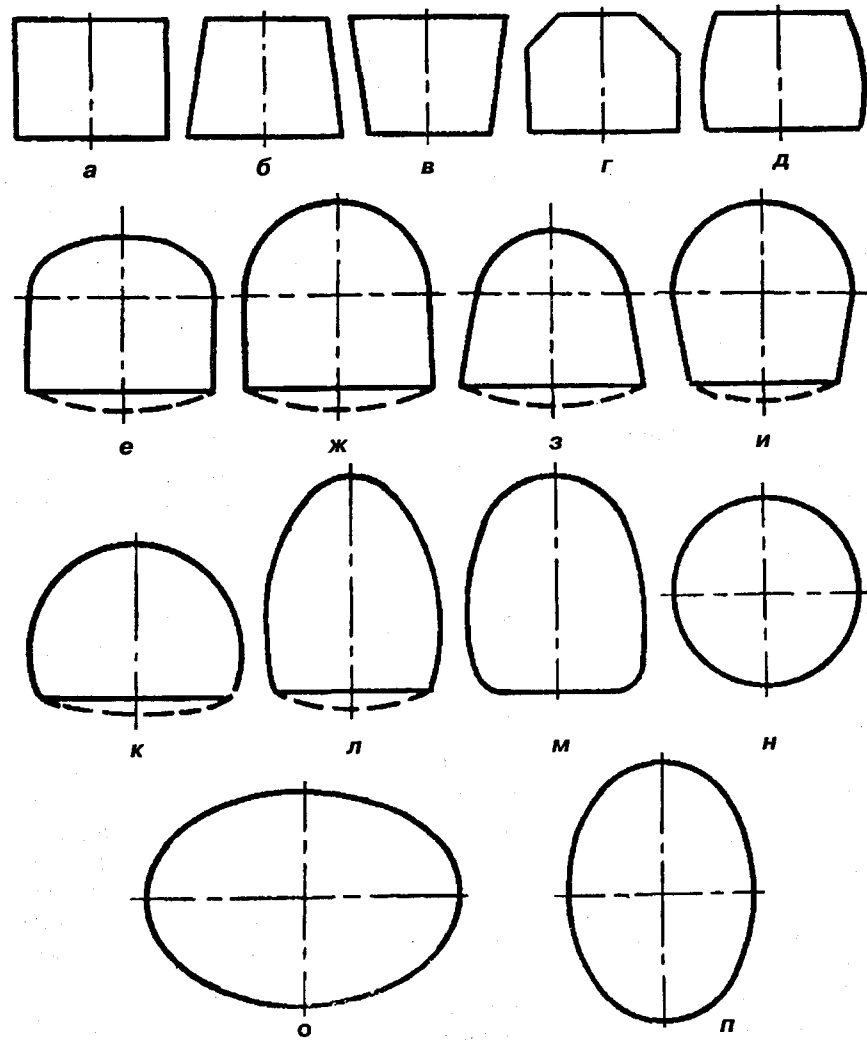


Рис. 3.1. Формы внутреннего очертания рамных крепей:

а — прямоугольная; б, в — трапециевидные; г — полигональная; д — бочкообразная; е, ж, з, и — сводчатые с вертикальными и наклонными стенами; к, л, м — подковообразные циркульного, трёхцентрового и пятицентрового очертания; н — кольцевая; о, п — эллиптические

Целесообразно рассмотреть каждый из элементов конструкции в отдельности и проанализировать их совместную работу в системе «рама — затяжка — забутовка — массив».

Стальные рамные крепи изготавливаются из стального проката. Наиболее экономичным профилем при работе несущего элемента на изгиб является двутавр, который широко использовался в первый период применения стальных рамных крепей, работавших в основном в жестком режиме. Однако, как показал опыт его использования, этот профиль часто получал крутильные деформации при действии косонаправленных нагрузок, преобладающих при взаимодействии крепи с массивом. Сложность обеспечения податливости крепи из двутавра также относится к его существенным недостаткам, поскольку жесткие крепи неприемлемы в условиях больших смещений породного контура. Это побудило горных инженеров изыскивать альтернативные двутавру профили, которые получили название «специальных». Трудями ученых-горняков была доказана необходимость применения специального проката, удовлетворяющего техническим и эксплуатационным требованиям работы крепи в горной выработке. Технические требования к профилю с позиций его изготовления включают: простоту изготовления и долговечность работы прокатных валков, способность равномерного остывания сечения профиля без его коробления, исключение разрушений профиля при рубке и гибке элементов крепи [3.1]. К эксплуатационным требованиям следует отнести необходимые деформационно-прочностные показатели, сопротивление местной и общей потере устойчивости при изгибе и крутильных деформациях, конструктивную возможность создания требуемого отпора крепи за счет трения в нахлестках податливых соединений, необходимость восстановления деформированных элементов крепи для их повторного использования.

Прочностные показатели спецпрофиля можно повышать путем применения более качественного металла, термической обработки профилей, рационального размещения металла в сечении профиля с целью достижения максимальных моментов сопротивления. Механические свойства сталей, применяемых для изготовления рамных крепей, приведены в табл. 3.1.

Наиболее часто для изготовления профиля применяют горячекатаную сталь марки Ст.5. Уровень ее пластических свойств достаточен для изгиба спецпрофиля в арочную крепь в холодном состоянии и восстановления звеньев крепи на штампах для многократного использования. Сталь хорошо сваривается и поэтому успешно применяется в сварных верхних трапециевидных крепей. Ее недостаток — сравнительно низкое значение предела текучести, что обуславливает значительную материалоемкость звеньев крепи.

Актуальной задачей является применение высокопрочной легированной стали, что обеспечивает существенное снижение массы крепи. Эффективное использование такой стали осуществимо при выполнении следующих требований:

Таблица 3.1. Механические свойства сталей

Марка стали	Временное сопротивление $\sigma_{0.2}$ , МПа	Минимальный предел текучести $\sigma_s$ , МПа, для толщин, мм				Минимальное относительное удлинение $\epsilon$ , %, для толщин, мм		
		до 20	20—40	40—100	свыше 100	до 20	20—40	от 40
Ст3кп	370—470	240	230	220	200	27	26	24
Ст3пс	380—490	250	240	230	210	26	25	23
Ст3сп								
Ст4кп	410—520	260	250	240	230	25	24	22
Ст4пс	420—540	270	260	250	240	24	23	21
Ст4сп								
Ст5пс	500—640	290	270	270	260	20	19	17
Ст5сп								

новая сталь не должна уступать по нормам пластичности и свариваемости стали Ст.5;

прочность низколегированной стали должна быть достаточной для замены спецпрофилей крепи более легкими типоразмерами того же сортамента;

превышение цены низколегированной стали по отношению к стали Ст.5 должно компенсироваться снижением стоимости крепи в связи с уменьшением ее материалоемкости.

В соответствии с вышеизложенными требованиями была разработана микролегированная ванадием и азотом сталь 20 Г2 АФпс [3.2]. В результате испытаний установлено, что профили СВП-22 и СВП-27 из стали 20Г2 АФпс равнопрочны соответственно профилям СВП-27 и СВП-33 из стали Ст.5. Широкая промышленная проверка подтвердила эффективность стали 20 Г2 АФпс. Она рекомендована для использования в облепченной шахтной крепи. С 1979 г. спецпрофили из стали 20 Г2 АФпс изготавливали на Алчевском металлургическом комбинате, а с 1983 г. и на комбинате «Азовсталь».

Одним из путей повышения прочности стали является ее термообработка [3.2—3.4]. Однако выполненные в этом направлении исследования выявили трудности, связанные с короблением желобчатого профиля при термообработке [3.2]. В то же время успешное применение термического улучшения (закалка и отпуск) спецпрофилей шахтной крепи в ФРГ, обеспечивающего с повышением прочности и улучшение вязкости, свидетельствует о перспективности направления термообработки элементов крепи [3.3].

Первые желобчатые профили для крепи горных выработок в бывшем СССР были разработаны Гипроуглемашем: в 1953 г. освоен промышлен-

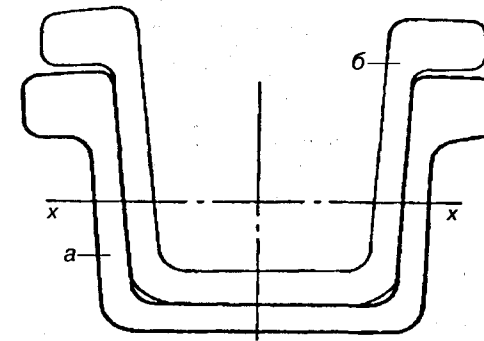


Рис. 3.2. Парные профили СП

ный выпуск профиля СП-18, а в 1956 г. — СП-28. Это были парные профили (рис. 3.2) массой 18 и 28 кг/м. Они имели примерно одинаковые моменты сопротивления изгибу в обеих главных плоскостях, что обеспечивало повышенную сопротивляемость изгибу из плоскости рамы. Проведенные испытания податливой арочной крепи из профиля СП по сравнению с другими типами показали, что она является наиболее долговечной, удобной в монта-

же и изготовлении, обладает необходимой податливостью, а величину сопротивления можно регулировать степенью зажатия профиля б, как клина, в корыте профиля а [1.24].

В 1962 г. было налажено производство специальных взаимозаменяемых профилей СВП-17; 22; 27 кг/м, разработанных в ДонУГИ под руководством канд. техн. наук Комиссарова М. А. Позже были освоены спецпрофили СВП-14; 19; 33 кг/м (рис. 3.3). Характеристики профиля СВП приведены в табл. 3.2, 3.3.

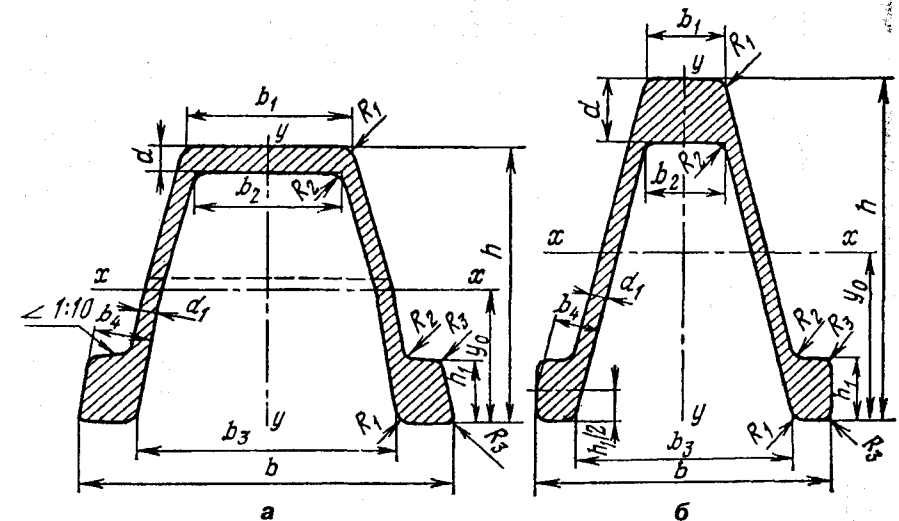


Рис. 3.3. Специальные взаимозаменяемые профили: а — желобчатый; б — унифицированный

Таблица 3.2. Размеры поперечных сечений шахтных профилей

Тип профиля	Номер профиля	Размеры, мм												
		h	h <sub>1</sub>	b	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	d	d <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	γ <sub>0</sub>
СВПУ	7	70,40	14,4	62,80	17,40	17,40	45,40	10,19	14,4	3,5	5	4	3	35,20
	10	90,64	17,3	74,67	19,00	19,00	55,67	11,32	17,3	4,2	5	4	3	45,32
	13	104,90	18,9	91,00	24,00	24,00	67,00	13,94	18,9	4,6	5	4	3	52,45
	14а	102,90	16,9	97,00	27,93	26,70	69,07	15,60	16,9	5,0	6	9	3	51,45
	15	109,20	20,6	94,30	25,00	25,00	69,30	14,62	20,6	5,0	6	5	3	54,60
	17	116,40	22,3	101,06	27,00	27,00	74,06	15,80	22,3	5,4	6	5	3	58,20
	18а	114,10	20,0	109,06	31,8	30,23	77,29	17,84	20,0	5,6	6	9	3	57,05
	19	124,75	23,1	104,83	27,00	27,00	77,83	15,90	23,1	5,6	6	5	3	62,375
	22	136,55	24,8	113,88	29,00	29,00	84,88	17,06	24,8	6,0	7	6	3	68,275
	22а	128,70	21,8	123,45	35,73	34,27	87,72	19,98	21,8	6,0	7	10	3	64,35
СВП	27	153,00	28,7	120,20	29,00	29,00	91,20	17,57	28,7	7,0	7	6	3	76,50
	27а	144,40	24,2	132,10	37,16	34,83	94,94	20,96	24,2	7,0	7	11	3	72,20
	33	170,35	31,6	135,40	33,00	33,00	102,40	19,84	31,6	7,7	9	8	3	85,174
	35	170,35	31,6	143,40	37,00	37,00	106,40	21,80	31,6	7,7	9	8	3	85,175
	14	88,00	21,0	121,0	55,0	46,5	84,4	18,0	7,8	5,6	6	7	5	42,7
	17	94,00	23,0	131,5	60,0	51,0	91,5	19,7	8,5	6,0	6	7	5	45,6
	19	102,00	24,0	136,0	60,0	51,0	94,0	20,6	9,5	6,2	6	8	5	49,3
22	110,00	25,5	145,4	60,0	51,5	99,5	22,5	11,0	6,4	6	8	5	52,7	
27	123,00	29,0	149,5	59,5	50,6	99,5	25,0	13,0	7,4	6	10	5	58,5	
33	137,00	32,0	166,3	66,0	56,0	110,0	27,5	14,5	8,2	6	11	6	64,8	

Таблица 3.3. Геометрические характеристики поперечных сечений шахтных профилей

Тип профиля	Номер профиля	F, см <sup>2</sup>	G, кг/м	I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>y</sub> , см <sup>3</sup>	I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>y</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>	W <sub>x</sub> / W <sub>y</sub>
СВПУ	7	9,05	7,11	3,59	51,41	14,61	19,81	29,7	9,47	1,54	6,25	0,33	2,06	2,79	1,33				
	10	12,92	10,15	4,84	120,1	26,5	35,97	60,0	16,1	1,64	6,86	0,38	2,61	3,54	1,59				
	13	17,23	13,53	9,53	223,14	42,5	56,8	118,8	26,1	1,64	6,91	0,46	3,16	4,20	1,93				
	14а	18,00	14,14	9,44	229,7	44,6	58,7	44,1	29,7	1,49	6,91	0,46	3,17	4,17	2,11				
	15	19,43	15,26	12,08	268,7	49,2	66,2	146,7	31,1	1,58	6,47	0,50	3,22	4,34	2,04				
	17	22,52	17,68	16,48	353,0	60,7	81,8	195,9	38,8	1,56	6,32	0,54	3,42	4,61	2,54				
	18а	23,26	18,25	17,22	363,4	63,7	84,4	227,7	41,8	1,52	6,36	0,55	3,48	4,61	2,29				
	19	24,21	19,00	18,76	434,0	69,6	93,7	221,6	42,3	1,64	6,47	0,57	3,66	3,93	2,22				
	22	28,21	22,15	24,95	601,2	88,1	119,0	305,1	53,6	1,64	6,61	0,60	3,98	5,38	2,42				
	22а	28,48	22,36	23,66	574,4	89,3	117,5	357,7	59,7	1,53	7,12	0,56	3,98	5,26	2,59				
СВП	27	34,58	27,15	35,84	897,7	117,3	160,2	416,3	69,3	1,69	6,40	0,67	4,32	5,89	2,55				
	27а	34,77	27,30	38,56	857,9	118,8	157,8	497,5	75,3	1,58	6,29	0,69	4,35	5,77	2,76				
	33	42,80	33,60	58,26	1391,4	163,4	222,1	653,7	96,6	1,69	6,74	0,72	4,86	6,61	2,87				
	35	45,33	35,59	64,60	1517,2	178,1	239,6	775,5	108,2	1,65	6,50	0,77	5,01	6,73	3,04				
	14	18,70	14,70	5,73	184,0	40,7	50,6	282,3	46,1	0,88	8,95	0,31	2,77	3,44	3,14				
	17	21,73	17,10	8,10	243,4	50,3	63,4	382,3	57,9	0,87	8,55	0,34	2,94	3,71	3,38				
	19	24,44	19,20	11,2	322,8	61,3	76,7	464,0	67,0	0,91	7,91	0,40	3,20	4,00	3,48				
22	27,91	21,90	15,54	428,6	74,8	94,4	566,3	77,8	0,96	7,56	0,45	3,42	4,31	3,54					
27	34,37	27,00	29,43	646,1	100,2	127,2	731,5	97,8	1,02	6,27	0,59	3,71	4,71	3,62					
33	42,53	33,39	46,05	999,5	133,5	178,6	1218	148,0	0,94	5,84	0,71	4,15	5,35	4,43					

Тип профиля	Номер профиля	$F, \text{см}^2$	$G, \text{кг/м}$	$I_x, \text{см}^4$	$I_y, \text{см}^4$	$W_x, \text{см}^3$	$W_y, \text{см}^3$	$I_p, \text{см}^4$	$W_p, \text{см}^3$	$W_x / W_y$	$W_d / G$	$W_p / G$	$W_f / G$
Лотковый (ФРГ)	13	16	13	—	137	31	40,9	150	31	1	2,28	3,15	2,38
	16	20	16	—	176	40	54,4	196	40	1	2,5	3,4	2,5
	21	27	21	15	341	61	86	398	64	0,95	2,9	4,1	3,04
	25	32	25	19	484	80	111,2	560	83	0,96	3,2	4,45	3,32
	29	37	29	22,5	319	94	129,7	775	103	0,91	3,24	4,47	3,55
	34	43	34	—	892	128	179,2	1203	141	0,91	3,76	5,27	4,15
	36	46	36	28,5	969	136	191,7	1265	148	0,92	3,78	5,33	4,11
	40	51	40	—	1125	155	218,6	1446	168	0,92	3,88	5,46	4,2
	42	53	42	—	1197	164	229,6	1505	175	0,94	3,9	5,47	3,9
	44	56	44	—	1265	171	239,4	1564	183	0,94	3,89	5,44	4,14
Колоколообразный (ФРГ)	26	32,9	26	19	510,4	83	—	530,1	75,2	1,1	3,17	—	2,89
	28	35,5	28	—	555,7	89,1	—	572,2	81,2	1,1	3,16	—	2,9
	30	38	30	26	601,3	96	—	614,2	87,1	1,1	3,2	—	2,9
	32	40,6	32	—	767,8	112,3	—	712,9	98,2	1,14	3,51	—	3,06
	34	43,1	34	—	823,8	119	—	768,2	104,5	1,14	3,5	—	3,07
	36	45,7	36	33	880,7	125,5	—	814,6	110,8	1,13	3,49	—	3,08
	42	53,4	42	—	1331,9	170,3	—	1390,6	155,4	1,2	4,05	—	3,7
	28	35,6	28	—	626	97	—	587	85	1,14	3,46	—	3,14
Унифицированный (ФРГ)	34	43,3	34	—	880	126	—	870,5	114	1,11	3,71	—	3,35
	40	51	40	—	1248	161	—	1205	145	1,11	4,03	—	3,62

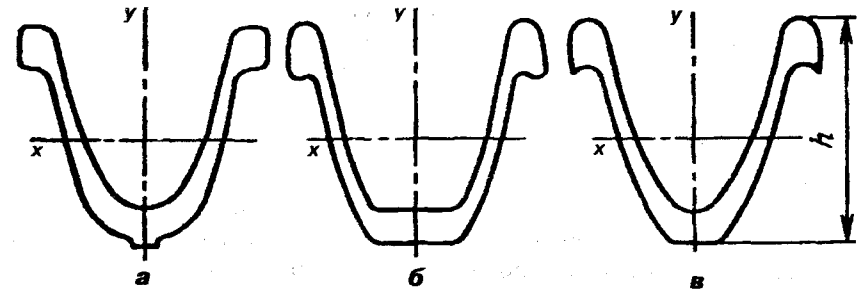


Рис. 3.4. Профили для шахтной крепи, применяемые в ФРГ:  
а — колоколообразный; б — лотковый; в — унифицированный лотковый

Взаимозаменяемый спецпрофиль по прочности не уступал парному профилю такой же массы, но его производство, изготовление и, особенно, восстановление деформированных элементов крепи было значительно проще и экономичнее. Благодаря рациональному раскрою заготовок была достигнута экономия стали, упростилось комплектование арок элементами. В 1980-х годах в бывшем СССР ежегодно производили 1 — 1,3 млн т профиля СВП [3.5], из них СВП-19 — 26%, СВП-22 — 45%, СВП-27 — 25%, СВП-33 — 3,5%, СВП-14 и СВП-17 — 0,5%. Каждый из профилей соответствовал по прочности определенной типовой площади сечения крепи от 7,9 до 15,5 м<sup>2</sup> [3.6].

Продолжительный период эксплуатации крепей из спецпрофилей СВП выявил следующие их недостатки [3.7 и др.]:

при изгибе крепи часто расширяются верхние концы спецпрофиля стоек, затем верхняк проваливается в профиль стойки и деформирует его; сравнительно малые радиусы закруглений на сопряжениях днища и стенок профиля вызывают концентрацию касательных напряжений в этих местах, что в сочетании с указанным выше явлением способствует отрыву днища;

в зависимости от колебаний размеров профиля в пределах допусков концы верхняка и стоек при наложении касаются своими боковыми поверхностями на участке, примыкающем к фланцам, либо днища верхняка, что существенно изменяет условия взаимного скольжения профилей в податливых соединениях крепи.

Из-за аналогичных недостатков за рубежом были созданы колоколообразные профили (рис. 3.4, а), имеющие усиленное днище с большими радиусами закруглений и выступом, обеспечивающим контакт по днищу. Недостаток этих профилей — относительно низкое значение коэффициента конструктивного качества, представляющего собой отношение моментов сопротивления профиля к площади поперечного сечения. В дальнейшем в ФРГ стали применять более экономичные лотковые профили (рис. 3.4, б), фланцы которых имеют с наружной стороны выступы, а с внутренней — выемки под эти выступы, что обеспечивает взаимосвязь



фланцев в горизонтальном направлении, в связи с чем лотковый профиль предотвращает расширение конца стойки и проваливание в него верхняка. В настоящее время в Германии внедряют унифицированные лотковые профили (рис. 3.4, в), отличающиеся от обычных утолщенным, более узким днищем и большей высотой сечения [3.36]. Характеристики профилей, используемых в ФРГ, приведены в табл. 3.3.

Немецкими учеными с целью обеспечения повторного использования крепи в горных выработках исследовались различные типы профилей [1.4]. При этом вполне обоснованно считалось, что во время и после остаточной деформации профиль должен по возможности сохранять достаточно высокую несущую способность, особенно если деформация продолжается. Недопустимо, чтобы профиль допускал резкие изломы под нагрузкой или распрямлялся почти в ровную полосу металла, поскольку в этом случае несущая способность элемента крепи резко снижается. Следовательно, несущая способность профиля после достижения максимальной нагрузки должна снижаться не резко, а постепенно при продолжающейся деформации. Кроме того, стенки и полки профилей должны иметь такую толщину, чтобы избежать остаточных деформаций поперечного сечения профиля. Скручивание стенок профиля, изгибы полок в результате потери местной устойчивости должны быть незначительными, так как выправление элементов с такими деформациями весьма затруднительно.

Характеристики испытанных типов профилей приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Результаты испытаний профилей (по Ф. Шпруту)

Типы профилей	Масса 1 м, кг	Предельный прогиб, мм	Максимальная нагрузка на изгиб, кН
Р6 (рельс)	31,0	68/40	47/68
Бокалообразный	28,3	77/67	50/53
G1120 (усиленный двутавр)	29,5	66	54
V12 двутавр	30,1	66	49
NP14 (спаренный двутавр)	28,8	89	59
ТН29 лотковый	29,0	166/88	40/19
Колоколообразный	25,5	119/58	45/33

Примечание. В числителе значения для профиля, повернутого днищем к нагрузке, в знаменателе — повернутого к нагрузке фланцами.

Предел прочности стали на растяжение испытанных профилей примерно одинаков и приблизительно равен  $62 \text{ кгс/мм}^2$ , исключение составляет профиль Р6, у которого он равен  $74,8 \text{ кгс/мм}^2$ . Данные получены при ис-

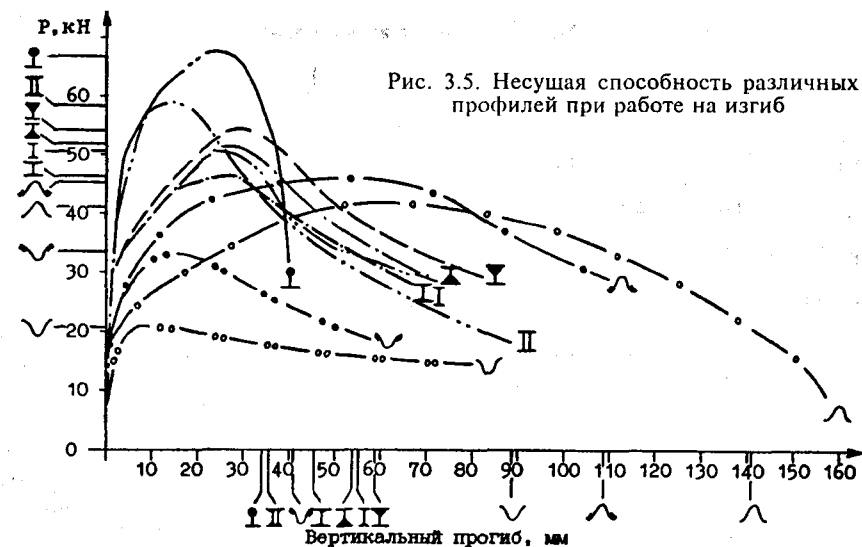


Рис. 3.5. Несущая способность различных профилей при работе на изгиб

пытании на изгиб прямолинейных отрезков спецпрофилей длиной 0,7 м. Если ввести еще одну характеристику профиля — работоспособность, которая равна площади под графиком его деформационно-силовой характеристики, то различие между профилями будет еще значительнее. Так, у лучшего по несущей способности профиля Р6 работоспособность равна  $24 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , а у лоткового профиля она превышает  $50 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , что в два раза выше. Эта характеристика профиля чрезвычайно важна в условиях работы крепи при больших смещения пород, особенно в стадии запредельных деформаций конструкции. К сожалению, на эту характеристику профиля исследователи не всегда обращали внимание.

Результаты испытаний профилей на изгиб приведены на рис. 3.5.

Сравнивая работоспособность специальных профилей с различной ориентацией по отношению к нагрузке, можно заключить, что она увеличивается более чем в 2 раза при приложении нагрузки со стороны днища. Столь значительные различия не были подтверждены другими исследователями, что, видимо, объясняется разными методиками испытаний.

Изучение целесообразной ориентации профиля относительно приложенной нагрузки проводилось неоднократно и отечественными учеными. Так, проф. Смирняков В. В. [3.8] на основании лабораторных испытаний пришел к выводу, что профиль, повернутый днищем к породе, воспринимает нагрузки лишь на 12% больше, чем при обратной ориентации. Шахтные эксперименты, проведенные проф. Пиньковским Г. С. на шахте «Благodatная», также показали, что крепь, спецпрофиль которой располагали донной частью к породному контуру, воспринимает нагрузки на 10 — 15% больше, чем арки с обычно ориентированным профилем [3.9].

Таблица 3.5. Характеристики шахтного профиля КГВ

Профиль	Основные размеры сечения профиля, мм								
	<i>h</i>	<i>h</i> <sub>1</sub>	<i>h</i> <sub>2</sub>	<i>b</i>	<i>b</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>2</sub>	<i>d</i>	<i>d</i> <sub>1</sub>	<i>d</i> <sub>2</sub>
КГВ18	112	3,5	19,5	137	48	6,6	11,5	5,6	10,5
КГВ21	119	4	21,5	145	52	7,0	12,6	6,2	10,5
КГВ26	130	5	24,5	160	59	7,8	13,5	6,7	11,9
КГВ32	145	5	26,0	174,5	64	8,5	15,3	7,4	14,5

Таким образом, все специалисты отмечают, что работоспособность повернутого днищем к породе профиля выше. Это объясняется тем, что при обычной установке профиля фланцами к породе полки профиля раскрываются значительно больше, уменьшаются высота профиля и его момент сопротивления. В то же время, при косо направленной нагрузке крутильная жесткость традиционно установленного профиля значительно выше, чем при его обратной ориентации. Поскольку обычная установка профиля более технологична с позиций монтажа межрамных ограждений, то большинство типов крепи изготавливается из профиля с днищем внутрь выработки. Однако проблему нельзя считать окончательно решенной ввиду ее сложности и неоднозначности.

В 1985 — 1986 гг. в ДонУГИ [3.6] была выполнена работа по изысканию профиля для крепи горных выработок, который по конструктивным особенностям не уступал бы лучшим зарубежным образцам, а по экономичности — профилям СВП. Новый профиль должен был соответствовать требованиям: обеспечения надежного касания по фланцам; повышения момента сопротивления профиля; предотвращения его изгиба при остывании после прокатки; понижения касательных напряжений в месте сопряжения днища и стенок профиля. Были разработаны профили типа КГВ (рис. 3.6), равнопрочные профилям СВП, не уступающие по конструктивным особенностям унифицированным лотковым профилям и имеющие линейную массу на 3 — 4% меньшую, чем профили СВП. Испытания крепи из профиля КГВ в жестком режиме подтвердили равнопрочность пре-

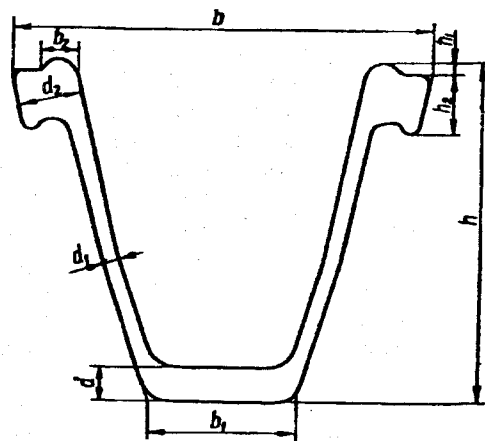


Рис. 3.6. Профиль проката КГВ

Масса 1 м, кг	Основные параметры					
	<i>I</i> <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>	<i>I</i> <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>	<i>W</i> <sub>x</sub> , см <sup>3</sup>	<i>W</i> <sub>y</sub> , см <sup>3</sup>	<i>W</i> <sub>x,н</sub> , см <sup>3</sup>	<i>S</i> сечения крепи, м <sup>2</sup>
18,42	359	396	64	58	85	9,2
21,20	464	511	78	72	102	11,2
25,79	674	775	102	98	138	13,8
31,52	1038	1200	143	145	190	15,5 и 18,3

жного и нового профилей, а по сопротивлению в податливом режиме крепь из профиля КГВ 21 превосходила серийную на 15% (см. характеристики профилей КГВ в табл. 3.5).

Аналитические и экспериментальные исследования стальных рамных крепей [3.10] показали слабое сопротивление крепей из спецпрофиля кручению при сложных пространственных нагрузках, что приводит к большим перемещениям контура крепи. При этом нормальные напряжения увеличиваются на 30% по сравнению с плоской расчетной схемой, а максимальные касательные напряжения свободного кручения часто являются причиной потери несущей способности крепи. Был выявлен один из основных недостатков применяемых профилей крепи — их недостаточная крутильная жесткость. Установлено также, что повышение несущей способности профиля за счет увеличения момента сопротивления изгибу из плоскости крепи не дает в этом случае ощутимого эффекта и приводит к неоправданному увеличению расхода стали.

В результате анализа напряженного состояния крепи из спецпрофиля установлено, что для криволинейных элементов крепи рациональные величины моментов сопротивления в плоскости кривизны  $W_x$ , из плоскости кривизны  $W_y$  и кручения  $W_k$  должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$W_y = 83W_x / R; W_k = 32W_x / R, \quad (3.1)$$

где  $R$  — радиус кривизны элемента крепи, см.

Характеристики профиля СВП не отвечают этим соотношениям: он имеет завышенное в 2 раза сопротивление изгибу из плоскости кривизны, а его сопротивление кручению в 1,8 раза меньше необходимого.

В Тульском государственном техническом университете проф. Каретниковым В. Н. и проф. Клейменовым В. Б. совместно с концерном «Кузнецкуголь» и Западно-Сибирским металлургическим комбинатом разработан шахтный профиль СВПУ (специальный взаимозаменяемый профиль унифицированный), отличающийся повышенным сопротивлением кручению и изгибу в плоскости крепи (см. рис. 3.3, б). Характеристики различных типоразмеров профиля СВПУ приведены в табл. 3.2, 3.3.

Размеры профилей СВПУ соответствуют условиям полного (по фланцам, стенкам и днищу) контактирования при их соединении и допускают сопряжение элементов крепи различных типоразмеров. Наличие такого контакта в соединении элементов обеспечивает более равномерную передачу усилий и перемещений и повышает надежность работы узлов податливости и крепи в целом. Однако следует отметить, что полный контакт сопряженных поверхностей профилей приводит к снижению клинового эффекта и сопротивления податливости крепи.

Из сравнения технических характеристик профилей СВПУ и СВП следует, что коэффициент использования несущей способности материала при изгибе в плоскости крепи  $W_k / G$  профилей СВПУ больше аналогичных коэффициентов профилей СВП на 14 — 17%, а коэффициент использования несущей способности материала при кручении  $W_k / G$  адекватных профилей повышается до 61% [3.11]. Увеличение коэффициента использования несущей способности материала эквивалентно уменьшению расхода спецпрофиля при креплении выработок. Экономия проката при замене профилей СВП на СВПУ может составить более 25%. По мнению авторов, профиль СВПУ по большинству технических данных превосходит отечественные и зарубежные аналоги и является в настоящее время наилучшим шахтным профилем.

### 3.3. Соединения элементов крепи и пути их совершенствования

Работоспособность и деформационно-силовые характеристики стальных рамных крепей во многом предопределяются конструкцией соединительных их элементов. В отечественной и зарубежной практике крепления горных выработок нашли применение жесткие, шарнирные, податливые и комбинированные (шарнирно-податливые) соединения элементов рамных крепей, обеспечивающие их связь и кинематику при взаимодействии с массивом горных пород. Оптимизация и область эффективного применения стальных рамных крепей во многом зависит от числа, месторасположения и эффективности соединений их элементов.

Жесткие соединения выполняются резьбовыми в виде накладок, скрепленных болтами с элементами крепи, из двутаврового профиля (рис. 3.7). Эти соединения позволили изготавливать рамы из отдельных элементов, чем уменьшили размер и массу отдельной монтажной единицы крепи, что важно с точки зрения ее транспортировки и возведения. Элементы жестких соединений просты и доступны в изготовлении. Однако они отличаются большой массой, трудоемкостью при монтаже и в большинстве случаев не способны обеспечить равнопрочность конструкции. Область их применения ограничена крепями жесткого режима работы.

Шарнирные соединения при введении их в конструкцию крепи обеспечивают удобство сборки и монтажа, меняют ее кинематическую схему, снижают степень статической неопределимости, позволяют заметно уменьшить моменты в несущих элементах, работающих на изгиб. Как по-

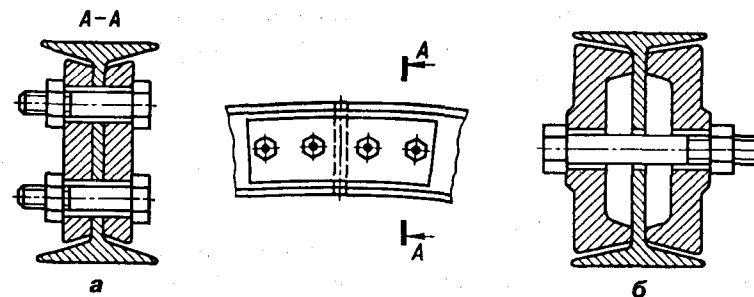


Рис. 3.7. Жесткие соединения:

а — плоские планки; б — фигурные планки

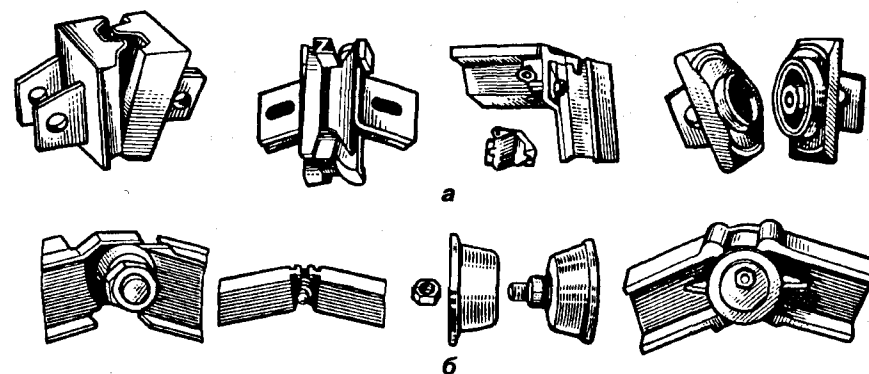


Рис. 3.8. Шарнирные соединения фирм ФРГ:

а — безболтовые (разъемные); б — болтовые (неразъемные)

казали исследования [3.10], при работе крепи в режиме взаимовлияющей деформации максимальные изгибающие моменты в геометрически изменяемой крепи снижаются в 2,5 — 3 раза, однако с увеличением модуля деформации пород эти различия уменьшаются. Преимуществом крепи с избыточными шарнирами является её способность существенно снижать неравномерность внешних нагрузок и перераспределять их на окружающие выработку породы, в результате чего работоспособность крепи увеличивается.

Конструкции шарниров устанавливаются на стыках элементов и отличаются большим разнообразием (рис.3.8). Их можно подразделить:

- по форме — на шарниры с цилиндрическими или плоскими поверхностями;
- по типу связей — с одно- или двусторонними связями;
- по фактору передачи момента — на способные и не способные передавать изгибающий момент.

Шарниры с цилиндрическими поверхностями контакта применялись в стальных рамах для обеспечения их сборности и исключения изгибающего момента в соединениях. Однако последние оказались сложными в изготовлении и требовали особой тщательности при монтаже. Кроме того, исходная предпосылка о снижении до минимума момента в соединении не всегда правильна, так как не гарантирует оптимальной работоспособности крепи. В ряде случаев крепь получает большой запас прочности, если шарнирное соединение способно передать ограниченный момент. Это положение особенно существенно для верхняка обычной трапезиевидной крепи, когда наличие момента на соединении со стойкой приводит к пропорциональному росту его прочности, поскольку снижает момент в центре (под нагрузкой). Однако исторически возникшие первыми шарнирные соединения стойки с верхняком «в лапу» (в рамной деревянной крепи) были ближе по конструкции к шарнирам с плоскими контактами. Они не обладали способностью передавать момент, поэтому моменты в верхняке и стойках не снижались и элементы работали как однопролетные балки на двух опорах. Это же замечание остается в силе и для стальных трапезиевидных крепей. Шарниры с плоскими стыками, как и с цилиндрическими, отличаются громоздкостью, однако способны частично передавать момент из-за внецентренного приложения продольных сил, действующих в шарнире. Такие конструкции шарниров чаще всего встречались в полигональных и арочных крепях и обеспечивали одностороннюю передачу продольных сил, т.е. были конструкциями с односторонними связями [3.12]. Таким образом, существует большой резерв в области разработки шарнирных соединений, в частности для обеспечения регулируемой передачи изгибающих моментов, упрощения и облегчения их конструкции.

Одним из основных преимуществ рамных податливых крепей является их способность работать в податливом режиме, т.е. воспринимать смещения разрушенных горных пород путем увеличения «нахлестки» на узлах сопряжения элементов крепи, «уходить» от проявлений горного давления без деформаций и разрушений, оказывая в то же время необходимое сопротивление смещению породного контура.

Податливые рамные крепи изготавливаются из желобчатых спецпрофилей проката, которые наиболее удачно позволяют реализовать принцип взаимного проскальзывания с трением соединяемых элементов, что обеспечивает заданное сопротивление конструктивной податливости. Для этого следует обеспечить плотное сжатие спецпрофилей друг с другом, что выполняют податливые узлы различных типов. Спецпрофили в своем большинстве сконструированы так, чтобы использовать клиновой эффект при их взаимодействии на участке нахлестки. Чем меньше угол расхождения стенок спецпрофилей, тем большие силы трения возникают при их взаимном скольжении, тем меньшие усилия необходимы для их обжатия в узле податливости.

Податливые соединения (узлы) элементов крепи можно разделить по принципу работы на силовые и деформационные. Узлы, использующие обжатие спецпрофилей крепи на участке нахлестки заданными усилиями (например, с помощью резьбовых соединений), относятся к группе силовых. В деформационную группу податливых соединений входят узлы, в которых обжатие спецпрофилей на участке их нахлестки осуществляют путем создания заданных деформаций в натяжных элементах узла (клиновые, кулачковые и др.).

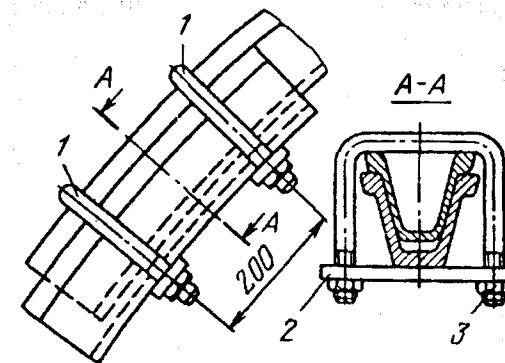


Рис. 3.9. Типовое податливое соединение звеньев крепи:  
1 — скобы; 2 — планка; 3 — гайка

Наибольшее распространение получила группа силовых податливых соединений. Чаще всего используют типовой узел, состоящий из П-образных скоб (хомутов), планок и гаек (рис.3.9). Его достоинства — простота изготовления и монтажа, невысокие требования к квалификации рабочих. Однако длительный опыт эксплуатации таких податливых соединений [3.13 — 3.16] выявил ряд недостатков конструкции, которые ставят под сомнение его надежность и работоспособность.

Рассмотрим подробнее работу П-образных податливых узлов. В процессе монтажа крепи нельзя достаточно равномерно обжать соединяемые спецпрофили из-за большого количества затягиваемых резьбовых соединений на раме. Но даже обеспечив такую равномерность, нельзя гарантировать надежную работу узла. При формировании нагрузки на крепь в узле, как и во всей конструкции, возникают внутренние усилия: изгибающий момент, продольные и поперечные силы. На первом этапе работы податливое соединение работает как жесткое до тех пор, пока продольная сила в узле не преважает предельного усилия сопротивления замка. Последнее зависит, в свою очередь, от начального натяжения скоб податливого узла и внутренних усилий — изгибающего момента и поперечной силы. Следует отметить, что их влияние ранее не учитывалось, хотя оно способно существенно изменить работу узла.

Как известно, техническими условиями установки крепи предусматриваются создание податливой забутовки по всему ее контуру и расклинка рамы в породе в районе узлов податливости. Если эти условия выполнены, то момент в узле податливости минимален и не влияет на сопротивление податливости. Однако, как показывает практика, требования технических условий не соблюдаются из-за несоответствия реального контура выработки проектному (коэффициент «излишка» сечения —

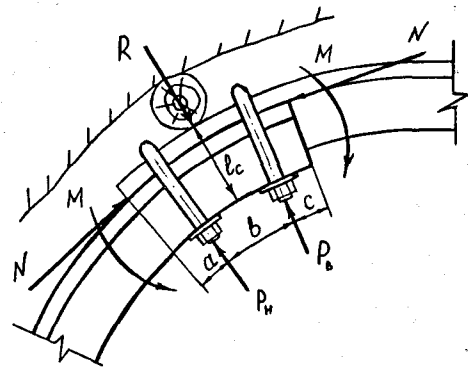


Рис. 3.10. Усилия в типовом податливом узле под нагрузкой

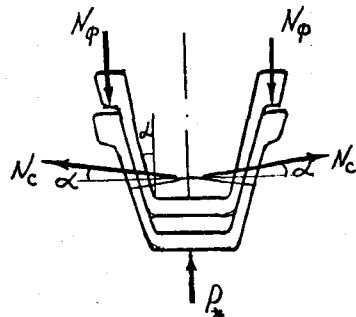


Рис. 3.11. Силовое взаимодействие профилей

К.И.С. — доходит до 1,2...1,3) и высокой трудоемкости забутовочных работ. Поэтому появляются значительные изгибающие моменты в узле, которые изменяют его сопротивление податливости.

Рассмотрим особенности работы наиболее распространенного П-образного узла податливости и его расчетные параметры. На рис. 3.10, 3.11 показаны расчетная схема узла и его поперечное сечение. После возведения крепи в узле появляются монтажные изгибающие моменты  $M$  и продольные усилия  $N$ , которые передаются на стойку и верхняк натяжением скоб. В начальный период работы крепи реакция  $R$  со стороны расклинки незначительна, и ее можно не учитывать. Из рассмотрения сил, действующих в сечении узла, следуют равенства:

при  $P < P_{\Delta}$  (до момента смыкания фланцев спецпрофилей)

$$F_{\text{тр}} = 2fP_c / \sin \alpha, \quad (3.2)$$

при  $P > P_{\Delta}$  (после смыкания фланцев спецпрофилей)

$$F_{\text{тр}} = 2f(P_{\Delta} / \sin \alpha + P - P_{\Delta}), \quad (3.3)$$

где  $F_{\text{тр}}$  — полная сила трения в узле податливости, кН;  $f$  — коэффициент трения между контактирующими поверхностями спецпрофилей;  $P_{\Delta}$  — предельная сила вдавливания спецпрофилей до касания фланцев, кН;  $\alpha$  — угол наклона стенок профиля к вертикали, град;  $P_c$  — усилие обжатия спецпрофилей с помощью скоб, кН:

$$P_c = P_n + P_b; \quad (3.4)$$

$P_n$  и  $P_b$  — усилия натяжения нижней и верхней скобы, кН.

Поскольку, согласно техническим условиям монтажа крепи, натяжение скоб следует производить до начала изгиба планки, оценим начальное усилие обжатия спецпрофилей, которое можно определить по формуле

$$P_n = [\sigma_T] W_n / l_n, \quad (3.5)$$

где  $[\sigma_T]$  — минимальный предел текучести стали, МПа;  $W_n$  — момент сопротивления планки,  $\text{м}^3$ :

$$W_n = b_n h_n^3 / 12; \quad (3.6)$$

$b_n$  — ширина планки, м;  $h_n$  — толщина планки, м;  $l_n$  — длина консоли планки (от края днища спецпрофиля до оси скобы), м.

Определив реальные значения параметров податливого узла, получим, что усилие затягивания скоб гайками при монтаже крепи может создать сжатие профилей  $P_n$  в пределах от 40 до 50 кН. Такое усилие обеспечит начальное сопротивление податливости одного узла при  $f = 0,3...0,4$  и  $\alpha = 30^\circ$ , равное  $F_{\text{тр}} = 50...60$  кН. При необходимой грузонесущей способности крепи 200...300 кН на раму такое начальное сопротивление следует признать недостаточным.

Рассмотрим влияние на работу узла изгибающего момента  $M$ , который возникает на участке нахлестки от внешней нагрузки при некачественных расклинке крепи и забутовке ее закрепного пространства. Из рис. 3.10, 3.11 следует, что момент воспринимается скобами крепи, в которых возникнут, в зависимости от направления момента ( $\pm$ ), дополнительные усилия  $P_m$ :

$$P_m = \pm[M] / (b + c) = [\sigma_T] W_c / (b + c), \quad (3.7)$$

где  $b$  — расстояние между скобами, м;  $c$  — расстояние от верхней скобы до конца стойки, м;  $[\sigma_T]$  — минимальный предел текучести стали спецпрофиля, МПа;  $W_c$  — момент сопротивления сечения спецпрофиля.

При преобладающей вертикальной нагрузке на крепь в нижней скобе усилие натяжения  $P_n$  увеличивается, а в верхней скобе  $P_b$  — уменьшается (при нагрузке с боков — наоборот):

$$P_n = P_c / 2 + P_m; \quad (3.8)$$

$$P_b = P_c / 2 - P_m. \quad (3.9)$$

Из полученных соотношений следует, что одна из скоб (нижняя при пологом залегании пород) может быть перегружена, тогда как вторая — разгружена. Как показывают расчеты прочности узла податливости, еще до достижения в спецпрофиле предельного момента возможны разрыв нижней скобы из-за ее перегрузки и деформация стойки, переходящая в разрыв днища её спецпрофиля на участке контакта его с днищем верхняка.

После начала податливости происходят сложные процессы перераспределения нагрузок и усилий в системе «крепь — массив» и в подсистеме «податливый узел — элементы крепи». Следует отметить, что при монтажном натяжении скоб круглого сечения они вдавливаются на участках местного контакта с фланцами спецпрофиля. Эти усилия достигают предельных значений, обусловленных контактной прочностью металла (эффект «сварного контакта») и вызывают пропорциональное увеличение силы трения в узле податливости примерно в 1,5 — 2 раза, т. е. до 80 — 120 кН.

Под действием продольной силы верхняк начинает скользить в стойке арки, увлекая за собой по участку местного контакта скобы узла податливости и заставляя их поворачиваться относительно планки. Это сопровождается растяжением скоб и их пластическим деформированием («перекос» скоб). Когда угол наклона скоб достигнет предельного значения, при котором возрастающая от нуля сдвигающая скобу сила преодолет местное сцепление скобы на фланце верхняка, происходит ее срыв с динамической разгрузкой (сбросом) натяжения скоб. Важно отметить, что в данной конструкции узла податливости без образования наклона и удлинения скоб их смещение относительно верхняка, а планок — относительно стойки невозможно. Усилия, возникающие от трения скоб и планок относительно перемещающихся спецпрофилей и вызывающие «перекос» скоб, достаточно велики, чтобы растянуть скобы и даже вызвать их разрыв, который происходит на самом нагруженном участке — в резьбовых соединениях в районе планки.

Динамический срыв гаек при проскальзывании верхняка по стойке — обычное явление для арочной крепи. Как правило, после первой «обтяжки» скоб в процессе податливости их длина за счет пластической деформации превышает необходимую. Это приводит к резкому снижению обжатия скобами спецпрофилей на участке узла податливости, а следовательно, к недопустимому падению несущей способности крепи и быстрой ее деформации. В трапециевидной крепи при П-образных узлах податливости, соединяющих прямые элементы стоек из спецпрофиля, наблюдаются полное исчерпание податливости и осадка кровли в выработке, что требует ее перекрепления. Это обстоятельство является одной из главных причин малой распространенности трапециевидной крепи из спецпрофиля в условиях активного горного давления.

В арочной крепи растяжение и даже разрыв скоб не столь аварийны, поскольку происходит опирание верхняка на конец стойки, где он заклинивается на днище ее спецпрофиля. Днище стойки зачастую оказывается разорванным в местах сопряжения со стенками спецпрофиля. Крепь переходит в жесткий режим работы, верхняк прогибается и эксплуатация выработки становится опасной.

Анализ работы узла податливости показывает, что целью его совершенствования должно быть исключение обнаруженных недостатков. В первую очередь, следует устранить перекос скоб при податливости. Этого можно достичь за счет их фиксации друг относительно друга, исключения эффекта «сварного контакта» при вдавливании круглых скоб в фланцы или снижения их длины  $l_c$  для сведения к минимуму момента от силы трения при скольжении скобы по фланцам спецпрофиля. Поэтому в Украине и за рубежом был разработан целый ряд усовершенствованных типовых узлов податливости.

В ДонУГИ разработан узел податливости для арочной крепи типа ЗСД (рис. 3.12). Его отличительной особенностью является широкая фигурная планка, связывающая скобы со стороны днища спецпрофиля, одна из ко-

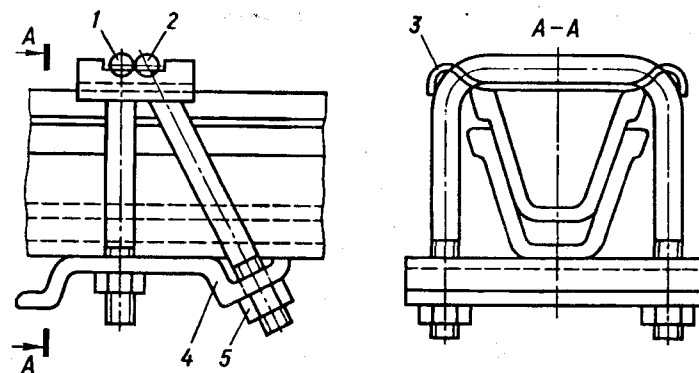


Рис. 3.12. Узел податливости ЗСД конструкции ДонУГИ:  
1, 2 — прямоугольные скобы с резьбой; 3 — фигурный хомут; 4 — планка; 5 — гайка

торых установлена под углом. Со стороны фланцев скобы объединены тонкой фигурной планкой. Таким образом, обе скобы узла жестко соединены друг с другом и работают совместно, что улучшает податливую характеристику крепи и исключает неконтролируемый перекос и перемещение скоб в процессе скольжения элементов крепи. Однако узел сложен в изготовлении и установке на крепь, имеет повышенную стоимость. Кроме того, такой узел податливости плохо воспринимает изгибающие моменты, действующие в крепи, а скоба, установленная перпендикулярно к профилю, подвержена растяжению при проскальзывании верхняка, что ведет к падению сопротивления податливости.

На основании зарубежного опыта в НИИОГР и КузНИУИ созданы конструкции узлов типа ЗПК (рис. 3.13). Они состоят из планки, изогнутой по контуру спецпрофиля со стороны его днища, укороченной скобы из круглой стали и зажимных гаек. Как показали испытания [3.17], узлы ЗПК обладают по сравнению с типовым узлом повышенной надежностью и обеспечивают увеличение сопротивления податливости в 1,5 — 1,8 раза. Зависимость средних значений вертикальных смещений крепи от нагрузки при различных замках приведена на рис. 3.14 по данным [1.26]. Преимуществом данных конструкций является снижение моментов, приложенных к скобам от сил трения их по фланцам крепи, за счет уменьшенной длины скоб и почти полного охвата спецпрофилей изогнутой планкой, что повышает жесткость раздвижки фланцев при натяжении узла.

Однако узлы типа ЗПК не вполне технологичны при монтаже, поскольку завинчивание гаек затруднено и требует фигурных ключей. Кроме того, изготовление замка осложняется наличием фигурной скобы из специального проката, что предусмотрено техническими условиями.

Для предотвращения перекоса и смещения элементов податливых узлов последние снабжаются на шахтах ФРГ упорами, с помощью которых фиксируется положение узлов относительно торцов элементов крепи

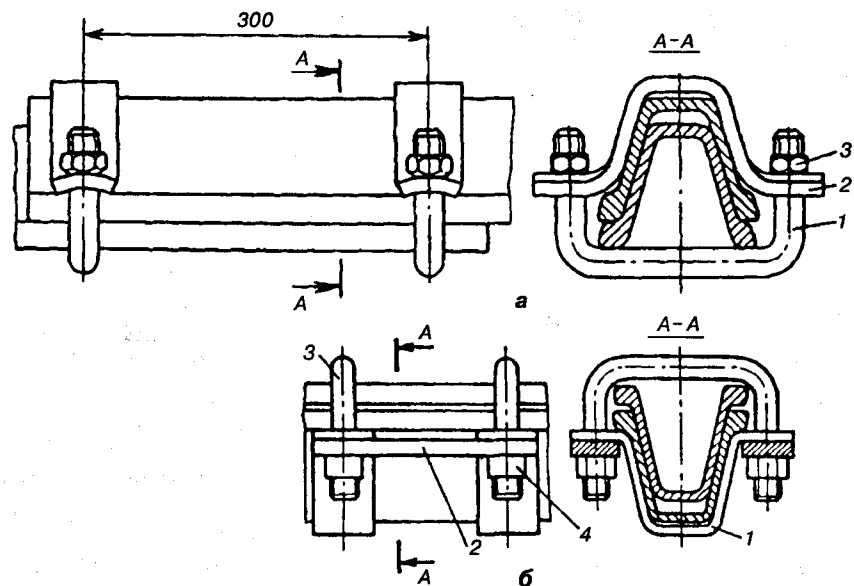


Рис. 3.13. Узел податливости ЗПК:

*a* — конструкции НИИОГР: 1 — скоба; 2 — изогнутая планка; 3 — гайка; *b* — конструкции КузНИУИ: 1 — накладная скоба; 2 — прижимная планка; 3 — резьбовая скоба; 4 — гайка

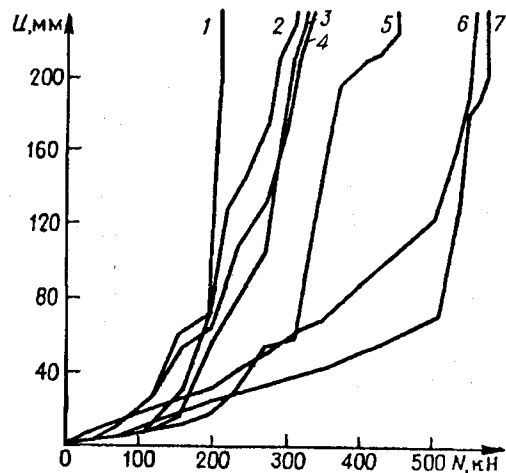


Рис. 3.14. Зависимость вертикальных смещений крепи от нагрузки:

1, 2 — с типовым узлом; 3, 4, 5 — с узлом ЗПК при СВП-22 и СВП-27; 6, 7 — при испытании в жестком режиме для СВП-22 и СВП-27

(рис. 3.15, *a*). Тот же принцип использован в податливом узле (рис. 3.15, *б*), апробированном на шахтах Западного Донбасса [3.14]. При проскальзывании элементов крепи соответствующие скобы оказываются зафиксированными относительно концов верхняка и стойки. Это устраняет возможность заклинивания верхняка в стойке, концы крепи оказываются прижатыми друг к другу, не разгибаются и плавно проскальзывают. Дополнительным преимуществом узла является большая ширина скоб, что снижает местные усилия на участках их контакта со спецпрофилем.

К недостаткам этого узла следует отнести сложность изготовления фигурных скоб и монтажа узла, особенно при завинчивании гаек из-за плохого к ним доступа.

В ДГМИ с целью повышения надежности работы силового соединительного узла разработаны конструкции, позволяющие увеличить сопротивление крепи в податливом режиме и избежать ряда недостатков типовых узлов. Разработанный узел [3.18] (рис. 3.16, *a*) включает скобу 8, соединительные планки 6, гайки 7; он снабжен рифленой прокладкой 3, выполненной по форме профиля 2 и расположенной между соединяемыми профилями 1 и 2, а скоба имеет выступ, взаимодействующий с полками внутреннего профиля.

Наличие прокладки между сопрягаемыми профилями позволяет усилить клиновой эффект между ними при сжатии профилей, что увеличивает сопротивление податливости без значительных усилий натяжения гаек. Кроме того, различие коэффициента трения скольжения по внутренней и внешней поверхности рифленой прокладки обеспечивает надежное движение соединительного узла сов-

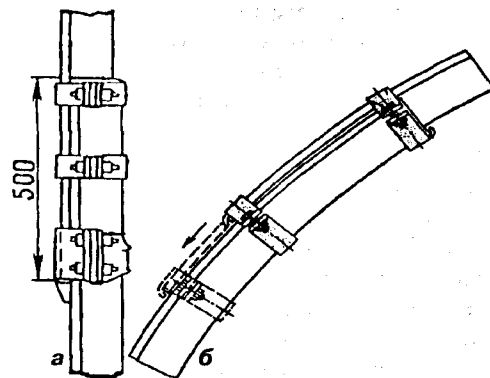


Рис. 3.15. Узлы с зацепами для фиксации на конце податливого звена:

*a* — фирмы "Туссен-Хайнцман"; *б* — конструкции Днепрогипрошахта

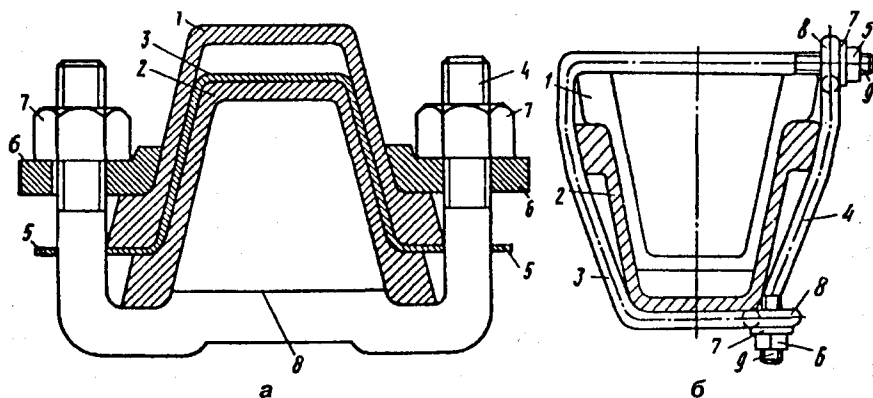


Рис. 3.16. Силовые податливые узлы конструкции ДГМИ:

*a* — с внутренней прокладкой; *б* — с обжатием в перпендикулярных плоскостях

местно с внутренним профилем без перекосов. В то же время нельзя не отметить сложность конструкции и монтажа такого замка, требующую высокой квалификации проходчиков. Кроме того, не исключена возможность срыва планок 6 с фланцев спецпрофиля 1 при чрезмерном натяжении узла.

Представляет интерес узел податливости (рис. 3.16, б), в котором обжатие элементов крепи осуществляется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [3.19]. Элементы крепи скреплены фигурной скобой 3 и планкой 4 с помощью натяжных гаек 5 и 6, под каждой из которых установлена пружинная шайба 7. Такой узел, благодаря высокой степени сжатия и эффекту заклинивания профилей, повышает рабочее сопротивление податливости, возможность его регулировки и контроля. Но в этом узле сохраняется недостаток, связанный с перекосом скоб в процессе податливости, что повторяет недостатки П-образного узла.

Обобщая перечисленные недостатки силовой группы податливых узлов, можно отметить, что в большинстве из них используются натяжные скобы с резьбой, для которых характерны: неравномерность сжатия спецпрофилей; перекосы при взаимном перемещении элементов; обтяжка и удлинение скоб; нестабильный скачкообразный режим податливости; необходимость регулярного подтягивания ослабленных соединений (особенно после взрывных работ); падение сопротивления податливости; выключение из работы одной из скоб; трудоемкость и неудобство монтажа.

На основе анализа недостатков группы силовых узлов, которые исторически были первыми в развитии податливых крепей, возникло направление, основанное на использовании принципа обжатия спецпрофилей методом заданного деформирования (деформационная группа податливых соединений). В эту группу входят кулачковые и клиновые податливые узлы.

В ИГД им. А. А. Скочинского разработан кулачковый узел для трапециевидных крепей из профиля СВП [3.20], состоящий из скобы 5, оси 6 и двух прижимных кулачков 7, взаимодействующих с фланцами элементов крепи, и ограничителей поворота 8 (рис. 3.17). Узел работает по принципу сжатия спецпрофилей на деформацию, заданную конструкцией вращающихся относительно оси кулачков, так как их рабочая поверхность выполнена с переменным и постоянным радиусами. Крепь с кулачковыми замками имеет стабильную характеристику в податливом режиме, а трудоемкость монтажа замка значительно ниже, чем узлов с резьбовыми соединениями. К недостаткам данных соединений следует отнести сложность изготовления, большую массу, высокую стоимость конструкции, постепенное снижение проскальзывания элементов крепи в режиме податливости из-за увеличения затягивания кулачков. Такое нарастание сопротивления замка может привести к деформации верхняка крепи до исчерпания ее податливости. Технические характеристики узлов ЗСД, ЗПК и кулачковых по данным [3.20] приведены в табл. 3.6.

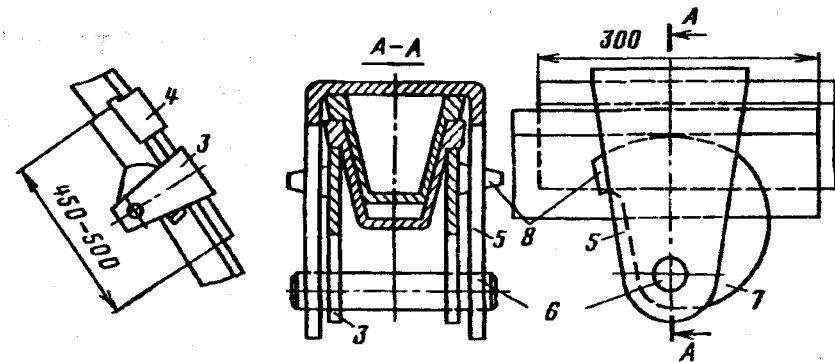


Рис. 3.17. Кулачковый податливый узел конструкции ИГД им. А. А. Скочинского

Таблица 3.6. Технические характеристики узлов податливости

Показатели	Параметры узлов, разработанных			
	ДовУГИ	ПечорНИИпроект	НИИОГР	ИГД им. А.А.Скочинского
Сопротивление податливого узла, кН	120—140	110—120	130	120—130
Масса узла, кг	10	14	14	15
Усилие затягивания, кН·м	Нет данных			0
Трудоемкость, чел.-мин:		25		4—6
монтажа		Нет данных		6—8
Трудоемкость обслуживания при эксплуатации 1 км горной выработки, чел.-см.	Нет данных	5—10	5—10	0
Универсальность	Криволинейные элементы			Криво- и прямолинейные элементы
% повторного использования	Нет данных			90
Способы для создания и восстановления необходимого сопротивления	Нет данных	Динамометрическим ключом с подтягиванием в 10—12 м от забоя, далее 1 раз в 1,5—2 мес.	Динамометрическим ключом с подтягиванием в 10—12 м от забоя, далее 1 раз в 2—4 мес.	Забивка кулачков при установке, далее — самозатягивание



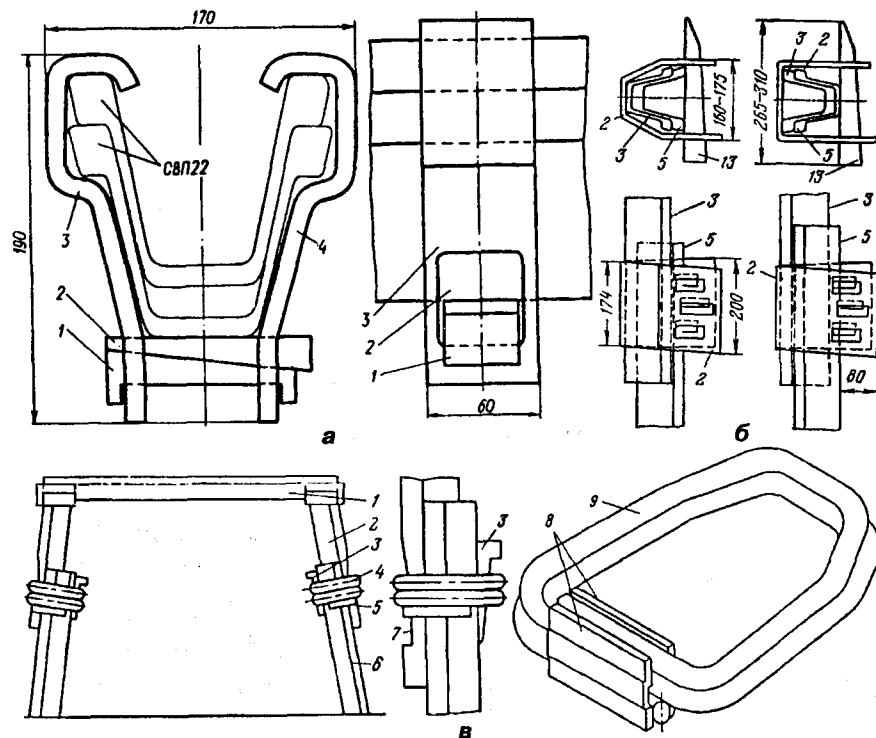


Рис. 3.18. Клиновые узлы податливости:

а — конструкции ДонУГИ; б — конструкции ИГД им. А. А. Скочинского; в — конструкции КНИУИ

В ДонУГИ разработана конструкция безболтового узла податливости [1.24], где в качестве замыкающего элемента используют клинья (рис. 3.18, а). Он состоит из двух скоб 3, 4 с загнутыми внутрь верхняками зацепами, надеваемых на предварительно стянутые профили элементов крепи. Скобы выполнены в виде крючьев из стальной полосы, которые выступают за днище профиля и соединяются в нижней части клиньями 1 и 2. Для монтажа такого узла необходимо зажимное клиновое устройство, которое состоит из двух клиновых элементов. По испытаниям крепи средняя несущая способность в податливом режиме составила 160 кН, величина податливости 200 — 250 мм, после чего наступал жесткий режим работы. Недостатки узла — сложность монтажа крепи, требующая зажимного устройства, а также недостаточная несущая способность крючьев скоб из-за возможности разгиба.

Оригинальный узел податливости клинового типа предложен в КНИУИ для трапецевидной крепи [3.21]. Он состоит (рис. 3.18, в) из замкнутой обоймы 4, клина 3, косога выреза 7, выполняемого фрезерованием на

спецпрофиле верхнего элемента стойки, и ограничителей 5, приваренных к нижнему элементу стойки. Обойма представляет собой пружину фасонной конфигурации с защемленными концами в плоском фиксаторе 8 и подвижным средним витком 9. При взаимном перемещении элементов стойки из-за взаимодействия выреза 7 с обоймой 4 сопротивление податливости нарастает достаточно плавно. Несмотря на сложность изготовления и высокую стоимость, такой узел доказал в шахтных условиях свою работоспособность и может быть рекомендован для соединения прямолинейных участков элементов крепи.

В ИГД им. А. А. Скочинского разработана эффективная конструкция клинового узла (рис. 3.18, б) для крепей типа МИК, в котором клинья 13 забивают перпендикулярно к оси стойки в приваренные к ней направляющие пластины 2. Центральным клином профили 3 и 5 прижимают друг к другу, а затем боковыми клиньями производят натяжение узла. Следует отметить, что поочередное забивание любого из клиньев ослабляет остальные, а нерегулируемость их забивки ведет к значительному разбросу значений сопротивления податливости. Тем не менее, лабораторные и шахтные испытания крепей МИК с такими клиновыми узлами показали их высокую работоспособность, что с учетом небольшой массы и простоты конструкции делает ее достаточно перспективной.

В ДГМИ с целью регулирования сопротивления податливости разработано клино-распорное соединение элементов стальной крепи [3.22], сочетающее стяжное устройство, перпендикулярное к оси спецпрофиля, и клиновое устройство, распирающее спецпрофили по их оси симметрии (рис. 3.19). Две натяжные симметрично расположенные скобы 3 опираются на фланец 4 внешнего профиля 1 и снабжены выступом 5, охватывающим изнутри фланец 6 внутреннего профиля 2. Болт 7 распорного устройства скреплен резьбой с внешним клином 8 и упирается торцом во внутренний клин 9. Клин 8 контактирует с выступом 5 натяжных скоб по поверхностям скосов 10. Такая конструкция комбинирует принципы силового и деформационного взаимодействия спецпрофилей и позволяет равномерно сжать спецпрофили, исключить перекося деталей замка при податливости и, при необходимости, регулировать его в зависимости от проявлений горного давления. К недостаткам этого узла следует отнести его многоэлементность, сложность установки на крепь, особенно при размещении спецпрофилей фланцами к породе, необходимость предварительного обжатия спецпрофилей.

К деформационной группе узлов можно отнести податливые соединения, работающие за счет постепенного смятия, среза или разрушения отдельных элементов или упоров. Так, в С.-Пб.ГГУ предложен узел податливости (рис. 3.20), работающий по принципу среза шпилек, установленных с шагом 50 мм в стойках или верхняке крепи [3.23]. Число шпилек принимают пропорционально заданной податливости, а диаметр рассчитывают так, чтобы шпильки срезались при нагрузке 80 — 85% расчетной на крепь. Недостатком таких узлов является скачкообразная работа кре-

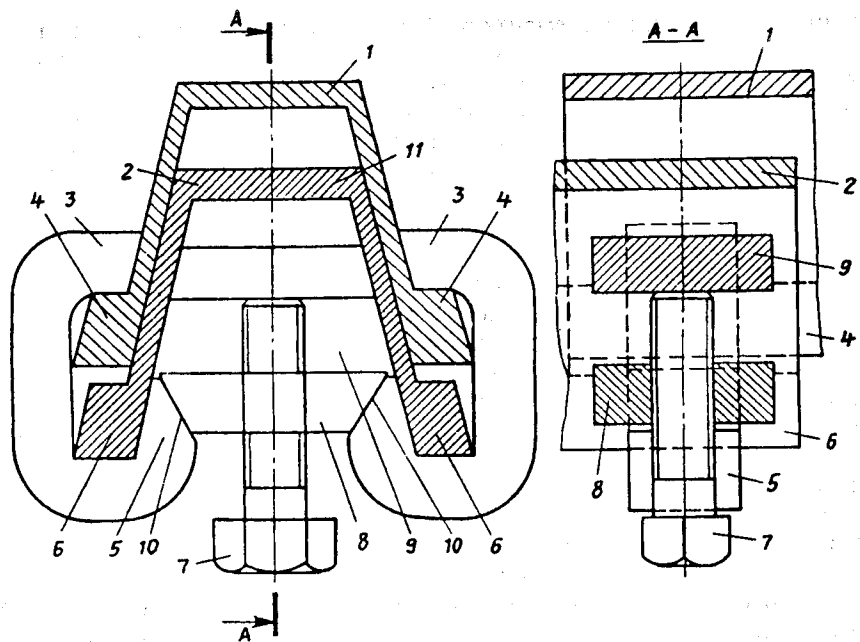


Рис. 3.19. Клино-распорный узел конструкции ДГМИ

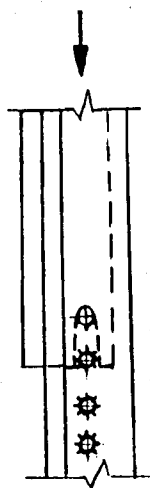


Рис. 3.20. Принцип работы деформационного узла С.-Пб.ГГУ

пи, сложность конструктивного исполнения, невозможность повторного использования.

Общими недостатками деформационной группы узлов податливости являются необходимость, как правило, выполнять предварительное обжатие соединяемых спецпрофилей, что заметно усложняет технологию монтажа крепи; зависимость усилия податливости от начального зазора между фланцами спецпрофилей и сложность его контроля; опасность ослабления клина при взрывных работах в забое выработки и др.

Среди шарнирно-податливых соединений заслуживает внимания конструкция, предложенная проф. Смирняковым В. В. [3.24]. В ней (рис. 3.21) элементы крепи 1 и 2 соединяются с помощью скоб 4, гаек 9, планок 3, скрепленных друг с другом болтом 7 и гайкой 8 через вилку 5 и шайбы 6. Вилка своим вырезом входит в днище спецпрофиля и приваривается к нему. Благодаря введению двух дополнительных симметрично расположенных шарниров достигается более равномерное распределение внешних нагрузок при

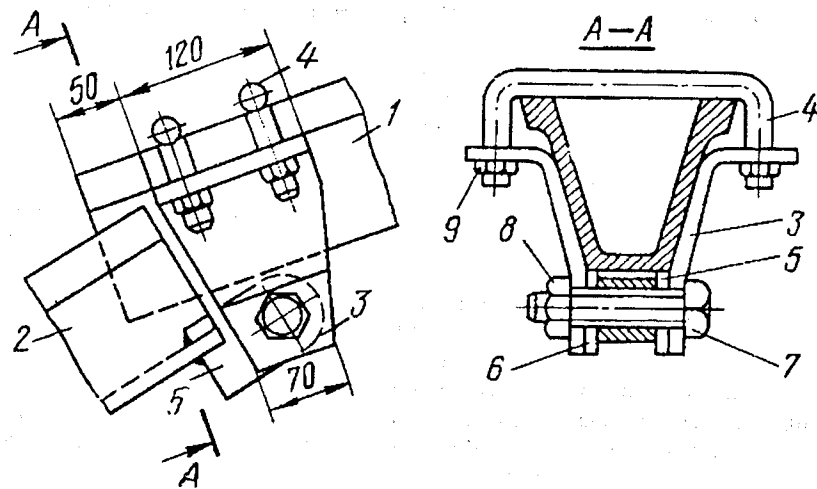


Рис. 3.21. Шарнирно-податливое соединение конструкции С.-Пб.ГГУ

обеспечении повышенной податливости крепи. Однако из-за усложнения конструкции и ее ослабления в шарнирном соединении она не нашла широкого применения.

Таким образом, разработанные конструкции различных узлов податливости хотя и обеспечивают податливый режим работы стальных рамных крепей, однако нуждаются в совершенствовании. Наряду с соблюдением общих конструктивных требований (простота, технологичность изготовления и монтажа, экономичность и др.) можно выделить такие направления совершенствования узлов:

- создание управляемого усилия сопротивления податливости;
- простота и доступность его контроля на всех этапах работы крепи;
- плавность перемещения элементов крепи в узле, исключение скачкообразного изменения усилий и деформирования крепи;
- восприятие предельных изгибающих моментов без заметного изменения сопротивления податливости;
- возможность демонтажа и повторного использования.

Решение технической задачи обеспечения надежной работы податливых соединений во многом предопределяет конкурентоспособность и перспективы применения рамных крепей.

### 3.4. Аналитический обзор и область применения рамных крепей

Исторически развитие и совершенствование стальных конструкций рамной крепи происходило путем наследования решений для деревянной крепи. Впоследствии, по мере усложнения горно-геологических условий, формы и конструкции крепи все более усложнялись, увеличивалось их многообразие. В настоящее время можно выделить два основных направления развития форм рамных крепей (см. рис. 3.1): из криволинейных элементов (сводчатые, подковообразные, кольцевые и др.) и прямолинейных (прямоугольные, трапециевидные, полигональные конструкции).

Крепи из криволинейных элементов занимают доминирующее положение в практике крепления. Их основными преимуществами являются: форма, близкая к очертанию свода естественного равновесия, достаточно высокая степень податливости, относительно небольшая разница между площадью сечения выработки в свету и в черне, простота изготовления и монтажа. Эти конструкции удобно выполнять податливыми, что позволяет применять их в условиях больших смещений породного контура для крепления горизонтальных и наклонных горных выработок при породах кровли прочностью свыше 30 МПа. Для менее прочных пород крепь может применяться только по особому проекту, обосновывающему ее усиленные параметры. Для обеспечения контакта крепи с вмещающими породами требуется создать в выработке сводообразное обнажение пород кровли, соответствующее контуру арки. Установка криволинейного верхняка под плоское обнажение кровли не допускается. Конструктивная податливость крепи должна соответствовать ожидаемым смещениям пород.

Выбор формы крепи нуждается в особом обосновании (см. раздел 2.2). Как считали немецкие исследователи [1.5], форма крепи в виде эллипса с вертикальной длинной осью обеспечивает наибольшее соответствие распределению напряжений в породе и минимальное развитие проявлений горного давления. В криволинейных элементах эллиптической крепи под воздействием нагрузки возникают меньшие внутренние усилия по сравнению с прямолинейными элементами крепей других форм. Наибольшая эффективность эллиптической формы крепи обусловлена требованием, чтобы большая ось эллипса была обращена «против направления главного давления». Поэтому на угольных шахтах Германии в штреках с наклонным залеганием пород пытались устанавливать крепь в форме эллипса с наклонной центральной осью [1.5]. Но из-за сложности установки и трудности изготовления она не получила широкого применения.

В то же время эллиптическая форма крепи с точки зрения проведения и функционального назначения выработки малорациональна (технологам «нужна» ширина, а не высота выработки). Поэтому по практическим соображениям почти повсеместно принимают арочную конфигурацию крепи, близкую к полуэллиптической. В зависимости от соотношения ожидаемых боковых и вертикальных нагрузок рекомендуется принимать различную форму арки. Следует отметить, что такие рекомендации до сих

пор не получили должного теоретического обоснования и часто носят аналого-эмпирический характер. А если учесть, что контур горной выработки в процессе ее проведения в большинстве случаев заметно отклоняется от проектного положения и не всегда соответствует конфигурации рамы, то подобные рекомендации оказываются малоэффективными.

Среди конструкций арочной крепи следует выделить группу с подковообразной (со смещением опор стоек в сторону выработки) и дугообразной (со смещением опор стоек в сторону массива) формами. Подковообразная крепь, типовые сечения которой были разработаны «Южгипрошахтом» (рис. 3.22), применяется в Кузнецком угольном бассейне. Она отличается тем, что концы стоек сдвинуты внутрь выработки, а стойкам придан наклон с выпуклостью в сторону пород. Такая форма, по замыслу разработчиков, позволяет крепь лучше работать на восприятие изгибающих моментов в условиях повышенного бокового давления со стороны массива. Кроме того, при преобладающем давлении со стороны кровли подковообразная форма обеспечивает смещение стоек в сторону пород и за счет возникающего с боков пассивного отпора достигается более равномерное распределение нагрузки по всему периметру. В подковообразной крепи снижается вероятность потери устойчивости стоек при их продольно-поперечном изгибе. Важным преимуществом такой крепи является увеличение габаритных зазоров в выработке на самом ответственном участке периметра (на высоте транспортных сосудов), что заметно повышает надежность ее эксплуатации. Однако следует указать и на недостатки такой формы: крепь сложнее возводить, затрудняется укладка затяжки на стойках и требуется более тщательная забутовка закрепного пространства. Поэтому такая крепь нашла ограниченное применение. Параметры подковообразной крепи приведены в табл. 3.7.

Дугообразная форма крепи применяется в Карагандинском бассейне и Западном Донбассе. Она отличается от подковообразной противоположным наклоном стоек (рис. 3.23). Такая форма, несмотря на упрощение установки затяжек, несколько усложняет монтаж рамы. К числу достоинств можно отнести уменьшенный размер верхняка, что облегчает его установку. Разработчики данной конструкции рекомендовали ее при всестороннем давлении пород и, особенно,

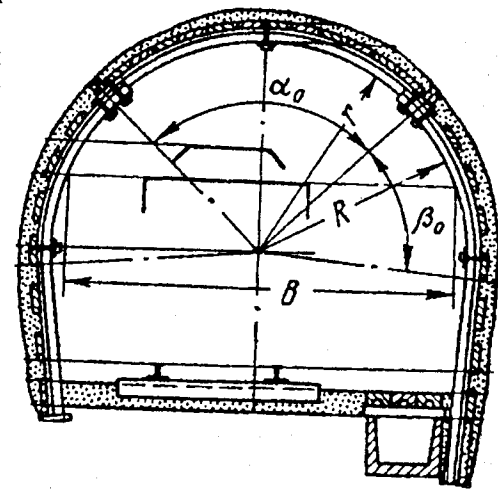


Рис. 3.22. Трёхзвенная подковообразная крепь

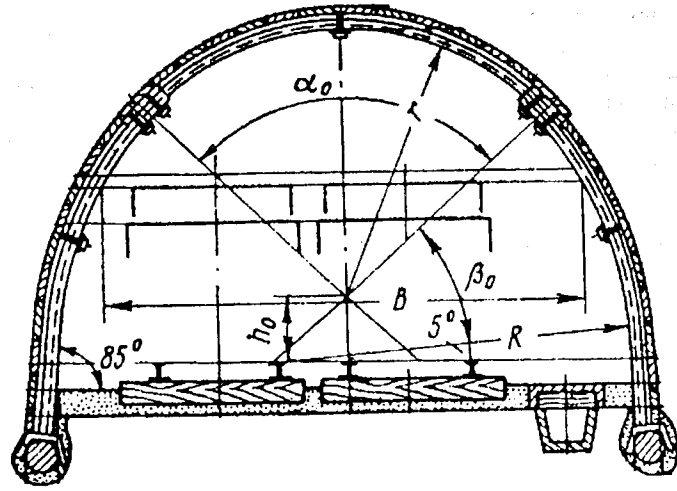


Рис. 3.23. Трёхзвенная дугообразная крепь

при пучении почвы горных выработок, однако теоретических обоснований ее работы, насколько нам известно, не было. Следует отметить, что, поскольку стойки обладают увеличенной длиной, снижается роль пассивного отпора пород, а при боковом давлении можно ожидать потери их продольной устойчивости и кручения. При деформации стоек повышается опасность исчерпания транспортных зазоров в выработке.

Благодаря универсальности и простоте изготовления в практике крепления нашли массовое применение арочные крепи с циркульным сводом. В угольной промышленности СНГ обычно применяют трех-, значительно реже — четырех- и пятизвенные податливые крепи КМП-А3, КМП-А4 и КМП-А5.

Арочная податливая крепь КМП-А3 (рис. 3.24) рекомендуется для крепления горизонтальных и наклонных горных выработок при породах кровли прочностью свыше 30 МПа. Это самая распространенная конструкция крепи в отечественной горной промышленности: ею крепится и поддерживается более 80% горных выработок. Такому широкому применению во многом способствовало то, что в результате унификации элементов крепи все типовые сечения выработок с арочной крепью разработаны с использованием только четырех типоразмеров стоек и семи типоразмеров верхняков (табл. 3.8). Большим преимуществом этих крепей является значительная конструктивная податливость, что позволяет их применять в выработках с высокими смещениями породного контура, в том числе и в зоне активного влияния очистных работ. Так, максимальная податливость трехзвенной крепи КМП-А3, в зависимости от типа податливых соединений, составляет 300 — 400 мм, а пятизвенной КМП-А5 — 600...1000 мм.

Таблица 3.7. Параметры подковообразной крепи

Порядковый номер про-филя	Вертник	Стойка левая		Стойка правая		Суммарная масса всех крепежных деталей соединительных замков арки, кг	Масса одной межрибной распорки из уголка 63 × 63 × 5 мм и крепежных деталей, кг, при длине распорки, м
		Длина, м	Радиус кривизны R, м	Длина, м	Радиус кривизны R, м		
17	1,33	2,55	1,52	2,75	1,52	47,02	0,5
17	1,52	2,85	1,52	2,75	1,52	47,02	0,8
17	1,52	2,85	1,52	3,25	1,52	55,58	1,0
17	1,74	3,10	1,74	3,25	1,74	60,70	
22	2,27	4,40	2,27	3,25	2,27	60,70	
27	2,52	4,40	2,52	3,65	2,52	77,79	
27	2,84	5,00	2,84	3,95	2,84	106,65	
				4,25		114,75	
						12,46	4,00
						18,20	5,09
							6,02

Таблица 3.8. Параметры трехзвенной арочной крепи

Типоразмер крепи	Тип трехзвенной арочной крепи	Размеры элементов до осадки, м			Площадь сечения выработки в свету до осадки, м²		Площадь сечения выработки в свету после осадки, м²	Площадь сечения арки в свету до осадки, м²
		Радиус ножки	Радиус верхняка	Высота арки в свету	с балластом	без балласта		
1	СВП-14	1,65	1,45	2,68	6,4	7	5,2	7
2	СВП-17	1,65	1,65	2,76	7,3	7,9	6	7,9
3	СВП-19	2,11	1,65	3,01	8,5	-	7,1	9,2
4	СВП-22	2,11	2,11	3,13	10,4	11,2	8,9	11,2
5	СВП-27	2,62	2,32	3,44	12,8	13,8	11,2	13,8
6	СВП-33	2,62	2,62	3,55	14,5	15,5	12,7	15,5
7	СВП-33	2,74	2,74	3,97	17,2	18,3	16,4	18,3

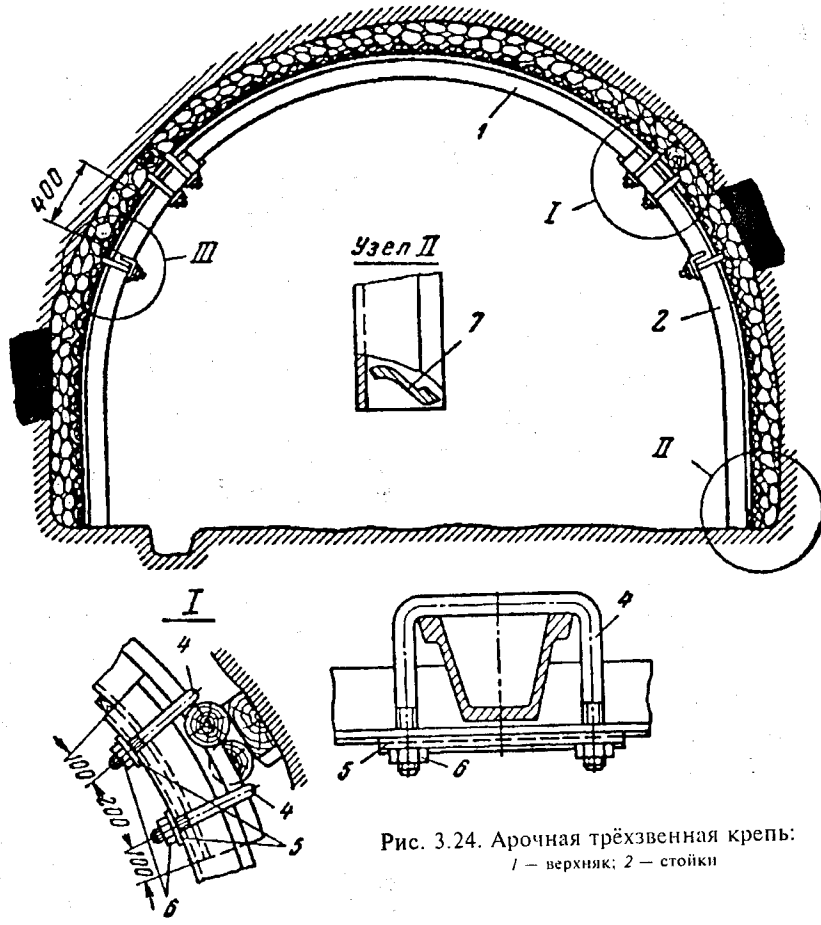


Рис. 3.24. Арочная трёхзвенная крепь:  
1 — верхник; 2 — стойки

Не менее важным показателем является соответствие ее направления ожидаемым смещениям породного контура. Если крепи КМП-А3 и КМП-А5 позволяют осуществить податливый режим, главным образом, в вертикальном направлении, то четырехзвенная крепь КМП-А4, наряду с вертикальной податливостью до 400 мм, обеспечивает и горизонтальную до 300 мм (табл. 3.9).

Появление четырехзвенных конструкций арочной крепи (рис. 3.25) с третьим узлом податливости, расположенным в центре составного верхника, было обусловлено недостаточностью горизонтальной податливости обычной крепи, что приводило к ее преждевременной деформации. Дополнительный узел в верхнике одновременно решает и другую важную задачу при обеспечении работы крепи в условиях наклонного (более 10°) за-

Таблица 3.9. Характеристики стальных податливых крепей

Тип крепи	Обозначение		Ширина выработки в проходке, м	Тип спецпрофиля	Сопротивление крепи** в податливом режиме М, кН, в зависимости от вида податливости узлов		Максимальная податливость А, мм	
	старое	новое			Прямые планки и фигурные скобы	Фигурные планки ЗПК и скобы с резьбой	вертикальная	горизонтальная
Металлическая податливая арочная трехзвенная	АП, АП-3, МПК-А3	КМП-А3	3,2—3,8	СВП-17	100	180	300/360*	—
	М, АП-3П, МПК-А4	КМП-А4	4,1—4,7	СВП-22	120	200	300/400	—
Металлическая податливая арочная четырехзвенная	МВ, М3	КМП-А5	5,3—5,9	СВП-27	140	215	300/400	—/300
	МВ, М3	КМП-А4	4,7—5,3	СВП-22	—	200	—/400	—/300
Металлическая податливая арочная пятизвенная	АП-5, ИАК	КМП-А5	5,3—5,9	СВП-27	—	215	—/400	—/300
	АП-5, ИАК	КМП-А5	3,8—4,0	СВП-19	100	190	600, 800, 1000***	—
Металлическая податливая кольцевая четырехзвенная (шестизвенная)	КП, КПК, КПК-ПЛ, МК	КМП-К4	4,0—4,7	СВП-22	120	200	600, 800, 1000	—
	КП, КПК, КПК-ПЛ, МК	КМП-К4	4,7—5,0	СВП-27	140	215	600, 800, 1000	—
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	КП, КПК, КПК-ПЛ, МК	КМП-К4	5,0—6,2	СВП-33	160	230	600, 800, 1000	—
	КП, КПК, КПК-ПЛ, МК	КМП-К4	2,8—3,8	СВП-17	100	180	300/300	300/300
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	3,8—4,1	СВП-22	120	200	300/350	300/350
	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	Не более 3	СВП-17	—	200	—/600	—
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	3,0—3,8	СВП-22	—	200	—/700	—
	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	3,8—4,1	СВП-22	—	300	—/700	—
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	3,8—4,1	СВП-27	—	400	—/800	—
	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	4,1—4,7	СВП-22	—	300	—/700	—
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	4,1—4,7	СВП-27	—	400	—/800	—
	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	12—15	СВП-22	—	300	—/700	—
Металлическая податливая трапециевидная (прямоугольная)	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	12—15	СВП-27	—	400	—/800	—
	МПК-Т(П), МИК-4С, КПС, КВВ, ТИК, МТПШ, ИПК	КМП-Т(П)	4,1—4,7	СВП-27	—	400	—/800	—

\* В числителе — податливость со старыми узлами (с прямой планкой), в знаменателе — с замками ЗПК.

\*\* Сопротивление крепи с узлами ЗСД принимается на 25-30 % ниже по сравнению с крепью с узлами ЗПК (данные по сопротивлению крепи в податливом режиме представлены ИПД им. А. А. Скочинского).

\*\*\* Для крепей КМП-А5 первое, второе и третье значения податливости относятся к пятизвенным крепям с дополнительной ножкой соответственно 700, 900 и 1200 мм.

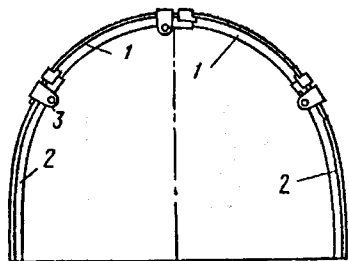


Рис. 3.25. Четырехзвенная арочная крепь конструкции ИГД им. А.А. Скочинского:  
1 — верхние сегменты; 2 — боковые;  
3 — кулачковый узел

рый способен вызвать (и, как правило, вызывает) разрывы скоб. Чем больше угол падения пород, тем заметнее проявляются эти недостатки взаимодействия трехзвенной крепи с массивом. Четырехзвенная крепь дает определенную гарантию обеспечения податливости в необходимом направлении, совпадающем со смещениями породного контура, ее работоспособность значительно выше [3.25].

К недостаткам четырехзвенной крепи можно отнести усложнение конструкции и монтажа, ослабление несущей способности верхняка в наиболее опасном сечении узлом податливости, работа последнего под действием значительного изгибающего момента, что требует особых конструктивных решений по узлу. Следует упомянуть и общий для всех податливых крепей недостаток — несогласованность работы узлов податливости, оказывающихся под действием разных значений усилий — изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

В условиях высоких прогнозируемых осадок пород (более 300 мм) трех- и четырехзвенные крепи недостаточно эффективны из-за ограниченного запаса податливости, поэтому в этих условиях рекомендуются крепи с большими запасами на осадку, что достигается выполнением стоек составными, в которых элементы соединены замками податливости (рис. 3.26). Интересно отметить, что разработчики пятизвенной крепи не уделили должного внимания согласованию сопротивления установленных на раме узлов податливости. Поскольку, как было отмечено выше, на прямолинейных участках существующие узлы с П-образными скобами работают неудовлетворительно из-за перекосов и вызванного ими ослабления натяжения, то крепи типа КМП-А5 не создают должного отпора при смещениях кровли и быстро теряют запас податливости по высоте. В то же время узлы податливости на верхняке не работают в податливом режиме вплоть до полного исчерпания податливости узлов на составных стойках. Следовательно, пятизвенные крепи предопределяют недопустимо высокую потерю сечения горной выработки даже при незначительном

легания пород в выработках, пройденных по простиранию. Обычная крепь в этих условиях оказывается несимметрично нагруженной при смещении пород кровли, что вызывает значительные различия в продольных силах, возникающих в симметрично установленных замках податливости. Поэтому податливость происходит только в одном из узлов (со стороны всячего бока) и приводит к еще большей асимметрии нагружения крепи, т. е. наблюдается эффект саморазвития нештатной работы конструкции. Другой узел податливости оказывается под воздействием высокого изгибающего момента, кото-

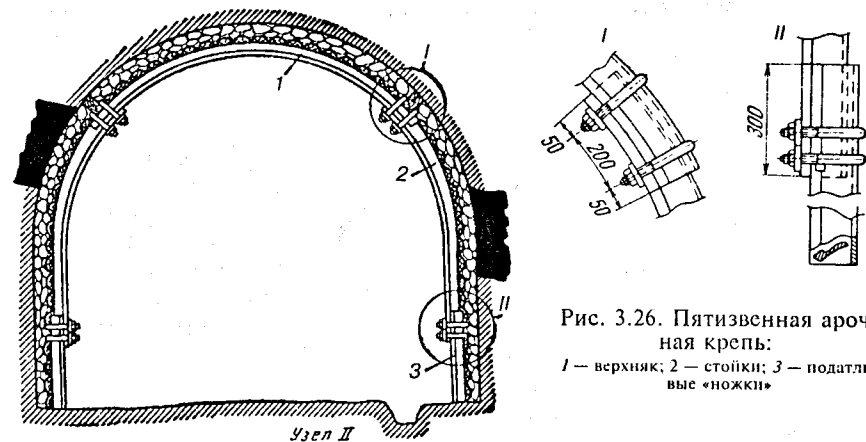


Рис. 3.26. Пятизвенная арочная крепь:  
1 — верхняк; 2 — стойки; 3 — податливые «ножки»

горном давлении и поэтому малоэффективны. Если к тому же учесть, что их стоимость повышена, возведение более трудоемко, а повторное использование крепи затруднено, то их применение в ряде случаев себя не оправдывает. Однако, если обеспечить повышение сопротивления податливости узлов на составных стойках по крайней мере до 100 кН и равномерное, без «рывков», скольжение сопрягаемых в замке спецпрофилей, можно существенно улучшить эффективность работы конструкции.

При значительных углах падения пород направление податливости в арочной крепи и направление наибольших смещений породного контура не совпадают, что делает арочную крепь малоэффективной для данных условий. Хотя четырехзвенная крепь с узлом податливости в центре составного верхняка в определенной мере решает задачу крепления выработок на наклонном падении, однако на крутых пластах, при преобладающих смещениях боковых пород, ее применение неоправданно и требует применения специальных конструкций.

Для крепления выработок с тяжелыми условиями поддержания ДонГТУ разработаны крепи направленной податливости типа АПК [3.26]. Крепь АПК-4 (рис. 3.27) имеет симметричную полукольцевую форму с асимметричным расположением узлов податливости, соответствующим образом ориентированных для восприятия основных нагрузок. Крепь состоит из двух взаимозаменяемых стоек 1, составного верхняка 2, трех нижних 3 и трех верхних 4 узлов податливости (рис. 3.27, а). Стойки крепи и звенья верхняка имеют один и тот же радиус кривизны и тип профиля. На нижнем конце стоек профиль перекрыт наклонной диафрагмой б, приваренной к боковым стенкам профиля. Звенья соединяются между собой внахлестку посредством направляющих узлов, перемещающихся совместно со звеньями при работе крепи в режиме податливости. Нижний узел состоит из обоймы 1, плоской планки 3 и двух скоб 2 с гайками 5 (рис. 3.27, б) В конструкции обоймы предусмотрены упорные выступы 4,

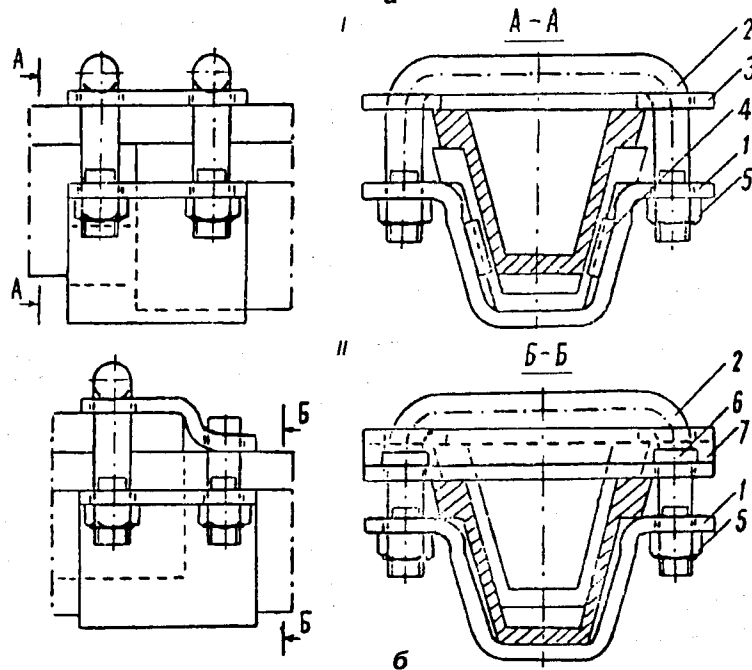
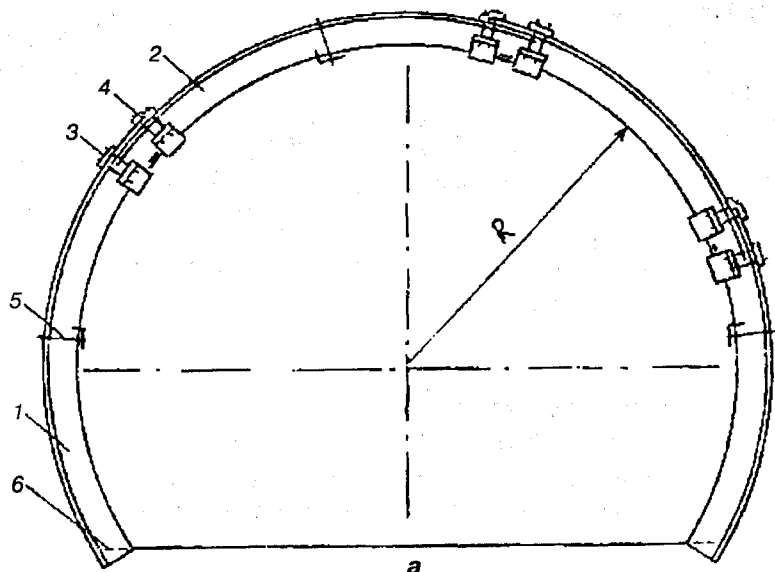


Рис. 3.27. Крезь АПК-4 конструкции ДонГТУ:

а — рама крепи; б — податливые соединения элементов: I — нижний узел; II — верхний узел

куда упирается торец звена, обеспечивая подвижность узла при его работе в режиме податливости. Верхний узел состоит из обоймы 1 и изогнутой планки 7, соединяемых между собой скобой 2 специальными болтами 6 с гайками 5. Скоба охватывает двоянные профили и выполняет роль запорного устройства, а два спецболта 6, охватывающие одинарный профиль, выполняют роль направляющего элемента. Данная конструкция обеспечивает работу узлов без перекосов и реализует податливость при односторонней нагрузке до 550 мм. Крезь успешно прошла опытно-промышленную проверку на шахтах Центрального района Донбасса и рекомендована для выработок на пластах крутого падения. Недостаток конструкции — трудоемкость изготовления и монтажа многочисленных резьбовых узлов податливости, невозможность достижения согласованной их работы.

Разработанная ДонУГИ четырехсегментная крезь для крутого падения ПАР-2 (рис. 3.28, а) более рационально, чем обычная трехзвеневая арка, приспособляется к неблагоприятному распределению нагрузки и смещениям пород. Но усложнение конструкции и недостаточная надежность сдерживают ее применение.

Для крепления штреков на крутых пластах ДонУГИ разработана крезь КПК [3.27]. Она представляет собой (см. рис. 3.28, б) довольно сложную шарнирно-податливую конструкцию, состоящую из пяти отрезков спецпрофиля, один из которых (вставка) — прямолинейен, а остальные выполнены с изгибом одного из концов, где размещается узел податливости. Основная идея конструкции — обеспечить запас податливости по направлению нормали к висячему боку и к кровле выработки. Спецпрофиль элементов повернут, в отличие от большинства конструкций крепи, днищем к породе, а узел податливости имеет некоторые конструктивные отличия. Однако основные недостатки обычного П-образного замка сохранились. Поэтому при смещениях пород наблюдались перекосы и разрывы скоб в замках податливости, что снижало надежность работы конструкции. Крезь КПК не получила широкого распространения, поскольку содержит много не унифицированных элементов различной формы, неудобна и трудоемка при возведении, требует повышенных объемов забутовки и установки дополнительного лежня под одну из стоек, опирающуюся на угольный пласт, обладает невысоким коэффициентом повторного использования.

В условиях пучения почвы используют замкнутые кольцевые крепи, а также арочные с обратным сводом. Это значительно усложняет конструкцию крепи, технологию проходки, стоимость и трудоемкость сооружения горной выработки. Надежность обратных сводов крепи, особенно «пологой» формы, невысока и почти никогда не оправдывает затрат на их возведение.

Показательными конструкциями с обратными сводами являются кольцевая податливая крезь КПК и кольцевая крезь с пологим лежнем (рис. 3.29).

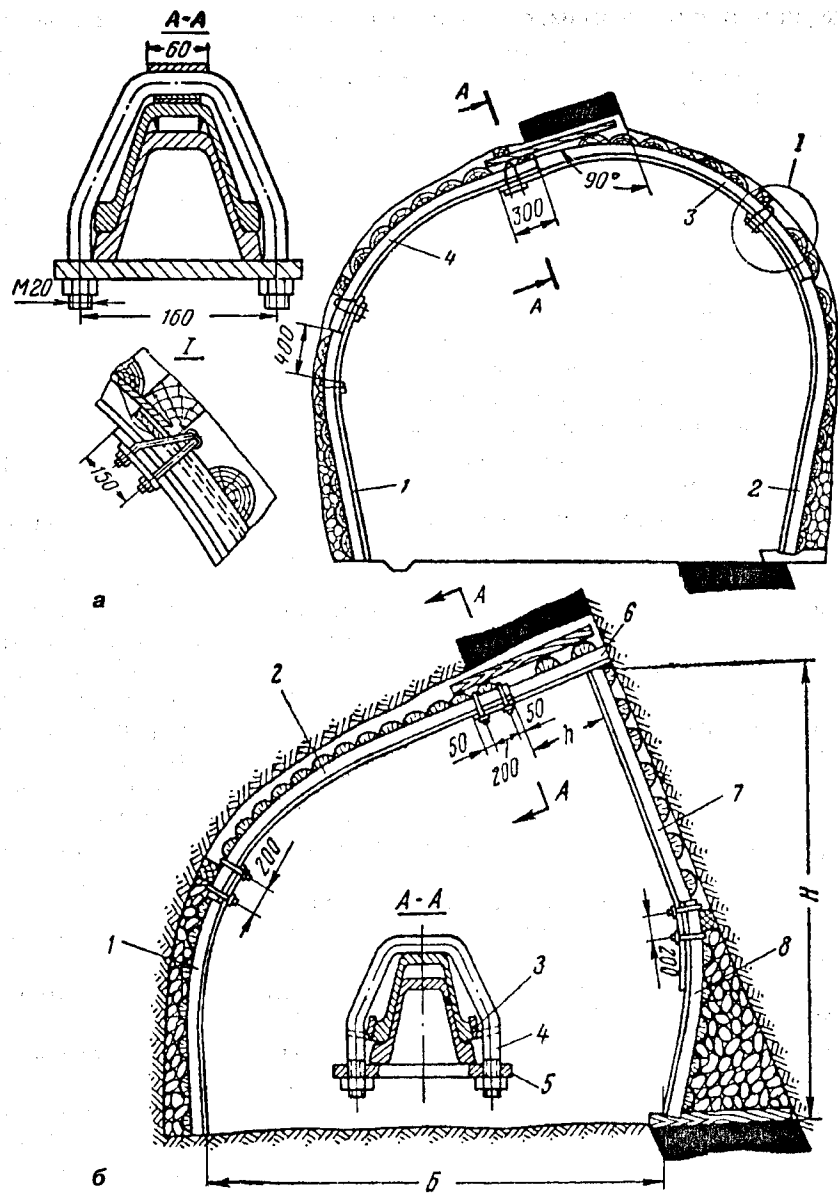


Рис. 3.28. Стальные податливые крепи для штреков на крутых пластах:

*a* — конструкции ИГД им. А. А. Скочинского;

1, 2 — стойки; 3, 4 — элементы составного верхника; *b* — крепь КПК конструкции ДонУГИ; 1, 8 — нижние стойки; 2 — верхник; 3 — угольник; 4 — скоба; 5 — планка; 6 — составная часть верхника; 7 — верхняя стойка

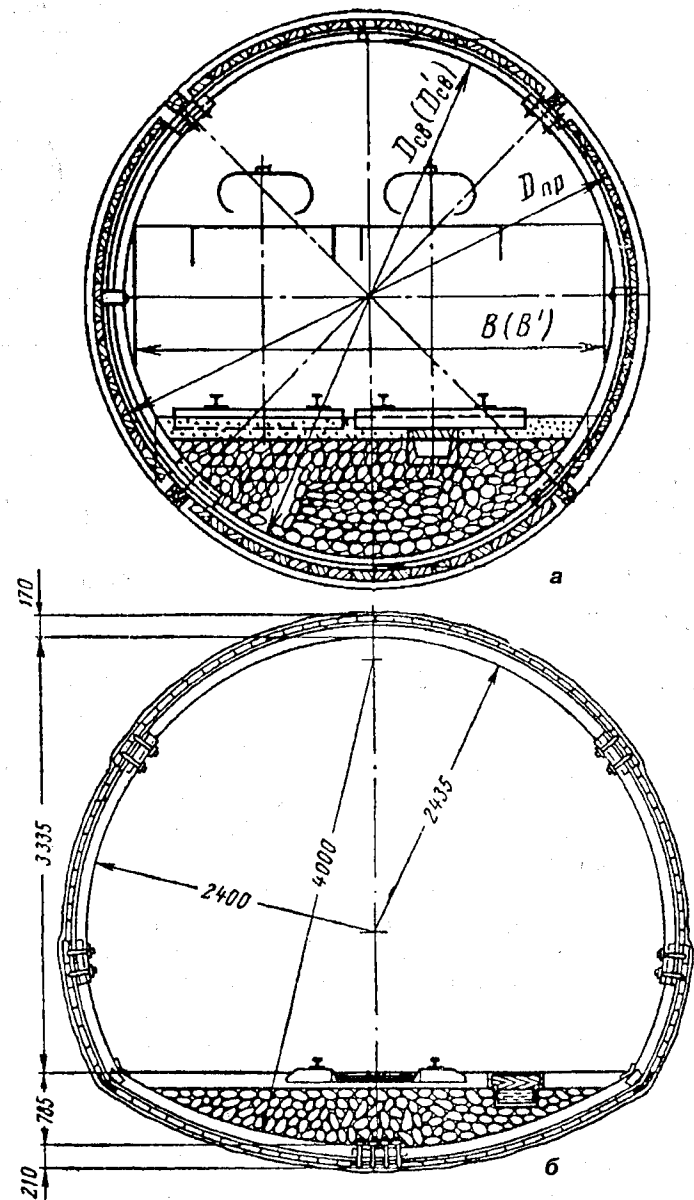


Рис. 3.29. Податливые крепи с обратным сводом:

*a* — кольцевая крепь КПК конструкции Центрогипрошахта; *b* — крепь с пологим лежнем конструкции Донгипрошахта



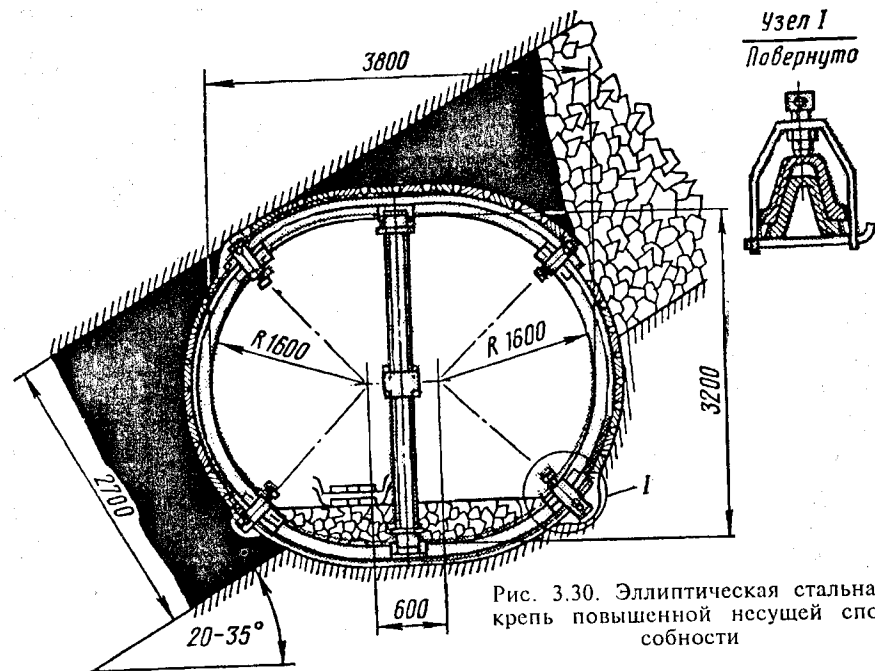


Рис. 3.30. Эллиптическая стальная крепь повышенной несущей способности

Первая конструкция (табл. 3.10) представляет собой раму кольцевой формы, нижняя часть которой заглублена в почву выработки посредством засыпки пород до уровня балластного слоя рельсового пути после возведения рамы. Рама снабжена четырьмя обычными узлами податливости, два из которых находятся ниже уровня почвы и должны обеспечивать податливость обратного свода. Несколько лучшей является вторая конструкция крепи с пологим лежнем с точки зрения уменьшения трудоемкости работ по проведению и креплению выработки. Однако несущая способность лежня в результате увеличения радиуса кривизны оказывается значительно ниже, чем у кольцевой крепи, что, при низкой работоспособности существующих узлов податливости и невозможности их регулировки в обратном своде, приводит к неизбежной его деформации при пучении пород почвы.

КузНИУИ разработана конструкция эллиптической стальной крепи повышенной несущей способности. Она предназначена для крепления горных выработок, прилегающих к очистным забоям и проводимых в слабых, склонных к размоканию и пучению породах [3.28]. Эллиптическая крепь (рис. 3.30) представляет собой стальную четырехзвенную замкнутую конструкцию эллиптической формы из двух одинаковых пар криволинейных элементов с податливой средней стойкой. Элементы соединены одноболтовыми податливыми узлами. Несущая способность кон-

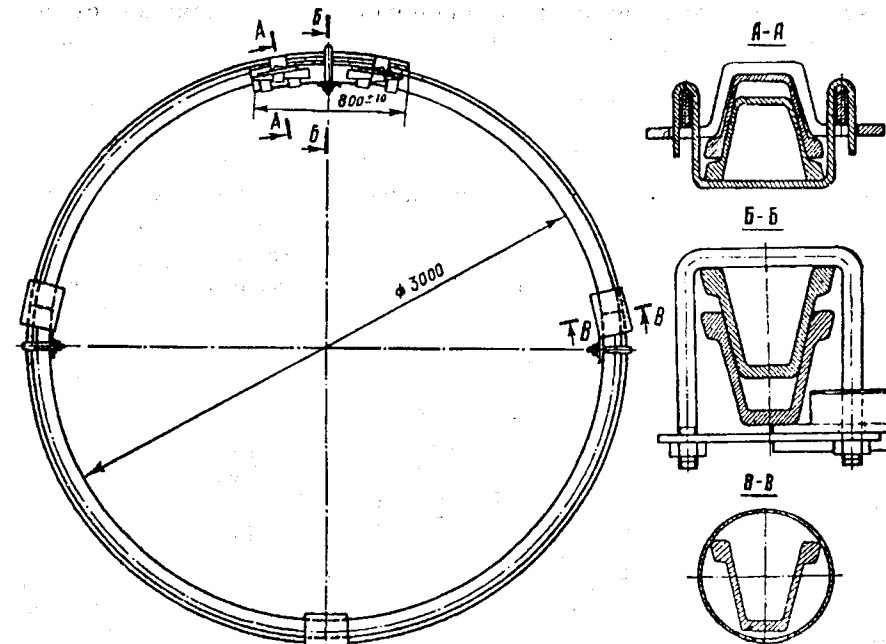


Рис. 3.31. Конструкция кольцевой крепи с верхним расположением податливых узлов

струкции, по мнению разработчиков, благодаря ее форме и наличию средней податливой стойки на 66% выше, чем обычной кольцевой крепи. Крепь прошла приемочные испытания на шахтах объединения «Сахалин-уголь» в конце 70-х годов.

В это же время НИГРИ предложил усовершенствованную кольцевую крепь для выработок главных направлений [3.29]. Крепь отличается (рис. 3.31) верхним расположением двух податливых клиновых узлов, соединяющих верхние сегменты; остальные три соединения — шарнирно-трубчатые с торцевой стыковкой профилей элементов. Проведенные шахтные испытания выявили неэффективность шарнирно-трубчатых соединений, в которых происходит проскальзывание сегментов и потеря вертикальной устойчивости колец. Поскольку податливый узел расположен в замке свода крепи, то ее вертикальная податливость отсутствует и область применения такой крепи ограничивается условиями преобладающего бокового давления.

Применение крепей с обратными сводами сопровождается трудностями технологического характера:

недопустимо высоким соотношением площади выработки в проходке к площади в свету, что заметно (на 20 — 30%) увеличивает объем выдаваемой породы при проходке;

сложностью оформления кольцевого сечения при буровзрывной проходке;

устройством водоотливной канавки в почве выработки;

быстрой коррозией обратного свода крепи в почве, что снижает срок его службы;

недостаточной несущей способностью обратного свода при проявлении пучения почвы, его выдавливанием в выработку и невозможностью последующего ремонта.

Таблица 3.10. Параметры кольцевой податливой крепи

Типоразмер профиля	Площадь поперечного сечения выработки, м <sup>2</sup>		Ширина выработки в свету по почве, см		Высота выработки в свету, см		Вертикальная податливость, см	Масса кольца со стержнями, кг	Предельная нагрузка, кН, на кольцо в режиме		
	в проходке	в свету		до осадки	после осадки	до осадки			после осадки	податливым	жестком
		до осадки	после осадки								
СВП-17	8,6	6,5	5,1	275	224	258	228	30	248	150	250-300
СВП-17	9,7	7,5	6,1	306	263	282	252	30	254	150	250-300
СВП-17	10,8	8,1	6,6	321	276	282	252	30	264	150	250-300
СВП-17	10,8	8,3	6,8	322	277	291	261	30	264	150	250-300
СВП-22	12,2	8,7	7,2	333	285	289	256	30	354	180-200	300-320
СВП-27	16,8	12,0	9,9	416	370	337	302	35	481	200-220	350-400
СВП-27	19,9	13,2	10,9	447	398	338	303	35	509	200-220	350-400
СВП-27	19,9	13,5	11,1	445	397	344	309	35	509	200-220	350-400
СВП-27	23,2	15,3	12,8	487	438	362	327	35	536	200-220	350-400

Таким образом, попытки использования замкнутых стальных крепей в условиях пучения нельзя признать удачными; вряд ли целесообразно их совершенствование в этом направлении. Как показала практика применения крепей с обратным сводом, они не способны в большинстве случаев предотвратить пучение почвы выработок и существенно улучшить их эксплуатационную устойчивость. Для обеспечения их надежной эксплуатации в пучащих породах более перспективны способы и средства управления напряженно-деформированным состоянием и прочностью пород вмещающего массива, в частности, разработанный в ДГМИ способ активной разгрузки и последующего упрочнения пород почвы (АРПУ) [3.30]. В условиях, где этот способ непригоден (размокающие глинистые и мергелистые породы), имеет смысл прибегнуть к замкнутым конструк-

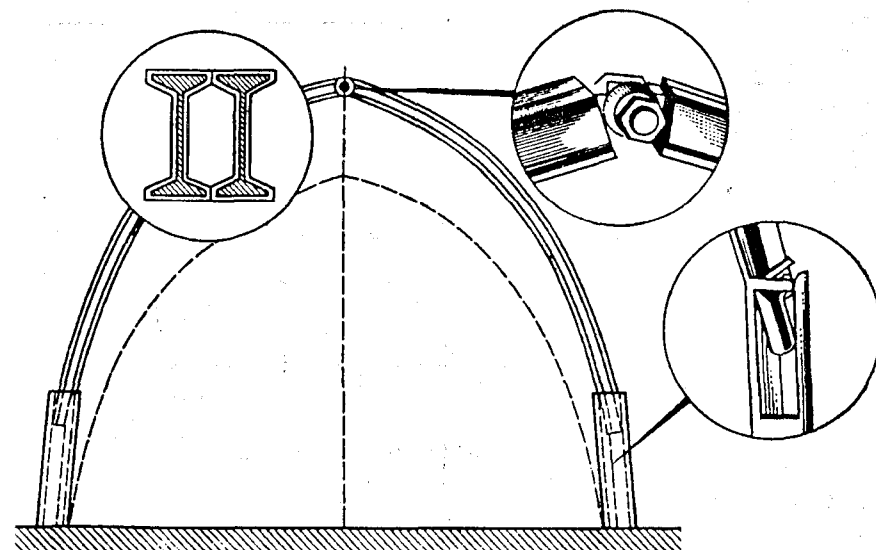


Рис. 3.32. Арочная шарнирно-податливая крепь фирмы "Ушпурвис"

циям крепи с обратными сводами. Такой стратегии проектирования стали придерживаться ведущие проектные институты (Южгипрошахт, Луганскгипрошахт, Карагандагипрошахт и др.) при разработке паспортов крепления горных выработок новых шахт и горизонтов.

Среди криволинейных форм крепи следует выделить шарнирно-податливые конструкции. Стрельчатая форма (рис. 3.32) нашла применение на шахтах Германии, как попытка оптимизировать (снизить) нагрузки на раму. Шарнир в своде арки и податливые узлы на нижних концах стоек должны обеспечивать надежную работу крепи в податливом режиме. Однако малое число шарниров (по сути, их всего три) не позволяет в полной мере использовать преимущества шарнирных кинематически изменяемых конструкций, а податливые узлы недостаточно работоспособны в случае несимметричного одностороннего нагружения.

К шарнирно-податливым конструкциям относится предложенная в НГА Украины крепь, состоящая из шести сегментов профиля СВП-27 в форме стрельчатой арки с выположенным обратным сводом (рис. 3.33). В ключе свода элементы соединены цилиндрическим шарниром. Такие же шарнирные связи предусмотрены между опорами арки и обратным сводом. Крепь успешно испытана на шахте № 5-бис «Трудовская» в условиях неустойчивых боковых пород [3.31]. Как показали исследования проф. Максимова А. П., арочные крепи с шарниром в вершине свода при симметричной приложенной внешней нагрузке со стороны массива обла- дают на 60 — 70% большей несущей способностью, чем обычные двух-

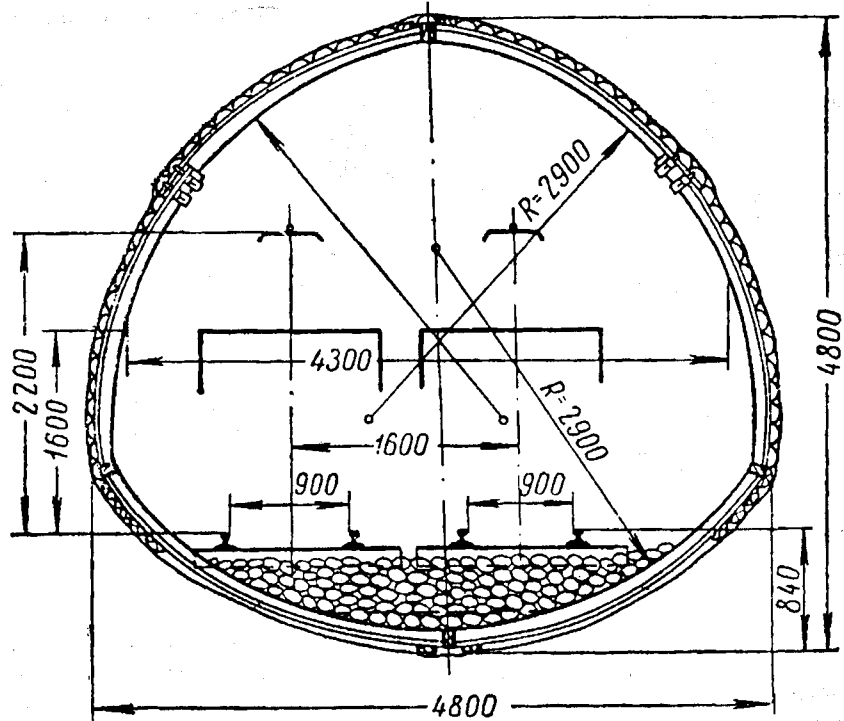


Рис. 3.33. Шарнирно-податливая замкнутая крепь конструкции НГА Украины

шарнирные арки. Тем самым в значительной степени компенсируется усложнение конструкции и ее монтажа.

Одной из удачных шарнирно-податливых конструкций является, по мнению авторов, крепь проф. Смирнякова В. В. [3.24]. Она сочетает в себе возможности рационального перераспределения внешних нагрузок за счет введения двух добавочных шарниров (всего их четыре), податливого режима работы (что обеспечивают два податливых узла) и высокой технологичности монтажа благодаря эффекту складывания элементов в шарнирах и доставки крепи в забой в сложенном виде (рис. 3.34, а). Испытания конструкции на шахтах бывшего ПО «Стахановуголь» показали ее высокую надежность в тяжелых горно-геологических условиях, причем податливость в узлах достигала 800 мм при сохранении работоспособности конструкции. Предложены оригинальные схемы соединения элементов крепи в зависимости от назначения выработки (рис. 3.34, б). Если вилки шарниров устанавливают на верхних концах стоек, обеспечивается вертикальная податливость до 300 мм (I), а при установке на концах верхняка — свыше 600 мм (II). Для крутого и наклонного падения

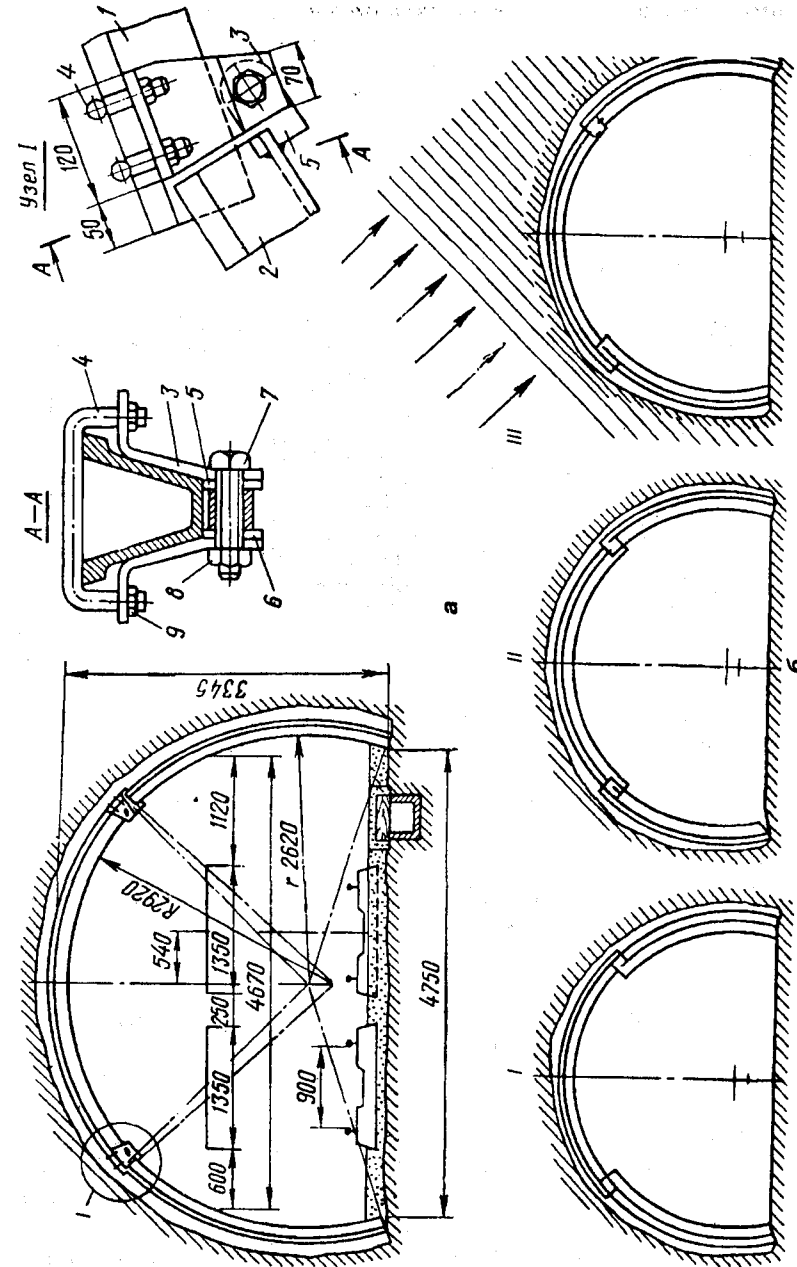


Рис. 3.34. Шарнирно-податливая крепь СПГГУ.  
а — конструкции складывающейся крепи; б — схемы соединения элементов крепи

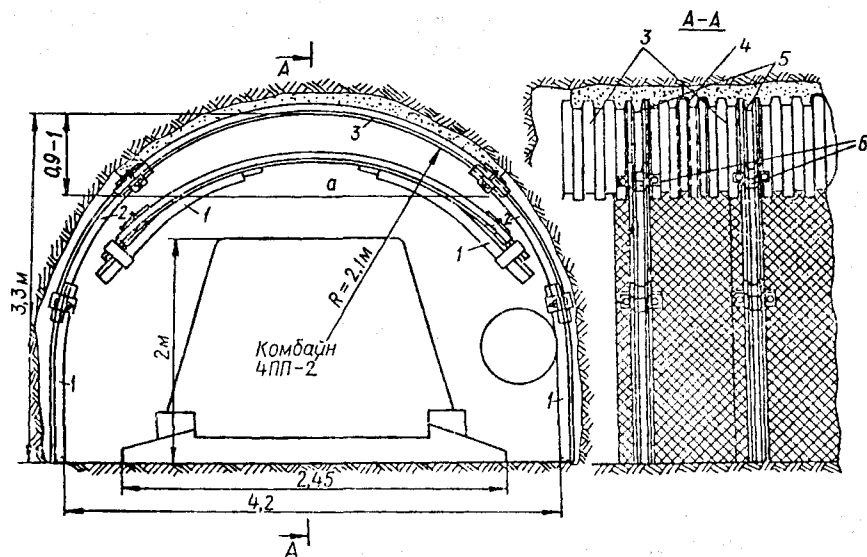


Рис. 3.35. Арочная пятизвенная крепь с гофрированным перекрытием  
(а — секция-комплект крепи в транспортном состоянии)

пород одна из вилок со стороны висячего бока устанавливается на верхнем конце стойки, вторая (со стороны лежачего бока) — на конце верхняка (III). Таким образом, сделана попытка создания универсальной крепи с широкой областью применения и эффективным решением монтажных операций, предусматривающим доставку крепи в собранном виде. Из-за сложности конструкции, высоких требований к квалификации рабочих и качеству возведения эта крепь не нашла широкого применения.

В целях снижения трудоемкости процесса крепления были предложены и другие конструктивные решения, например арочная крепь для механизированного крепления при комбайновом проведении выработок, разработанная в ДонУГИ [1.21]. Особенностью этой конструкции является то, что верхняк одновременно выполняет несущую и ограждающую функции, заменяя собой затяжку и межрамные стяжки. Пятизвенная арочная податливая крепь (рис. 3.35) состоит из стоек в виде отрезков 1 и 2 спецпрофиля одинаковой длины, соединенных податливыми узлами типа ЗСД или ЗПК, и верхняка 3, выполненного в виде гофрированного перекрытия цилиндрической формы. Плотность и размеры гофр выбираются такими, чтобы обеспечить необходимый момент сопротивления свода 4 в пределах 70—90 см<sup>3</sup> на 1 м выработки. В средней части перекрытия предусмотрена увеличенная гофра 5, выполненная по форме внутреннего сечения спецпрофиля стоек с возможностью соединения с ними посредством жесткого узлового устройства 6.

Сборка крепи в секцию-комплект (перекрытие со сдвинутыми стойками и замками) производится на монтажном участке за пределами зоны работы проходческого комбайна. Крепь в сложенном виде доставляется с помощью тележки по монорельсу и поднимается гидроподъемником с манипулятором, смонтированным на корпусе проходческого комбайна. Возможен вариант установки крепи типовым крепеустановщиком на монорельсе (см. раздел 7.2). При подъеме крепь прижимается к кровле, одновременно стыкуясь с ранее установленной секцией. Затем производится ослабление соединительных узлов, опускание и установка стоек в рабочее положение, фиксация узлов на своде и стойках. Достоинствами крепи являются снижение трудоемкости и времени возведения крепи в забое до 70%, повышение коэффициента использования комбайна и безопасности работ в забое. К недостаткам можно отнести сложность ремонтов и перекреплений, громоздкость верхняка — перекрытия при складировании и доставке, непригодность на участках закруглений выработок, повышенную стоимость.

В условиях, когда кровля представлена достаточно устойчивыми слоистыми породами, их подрывка для придания выработке арочной формы нарушает несущую способность пластов пород и оказывается нецелесообразной. В этом случае большую устойчивость обеспечивает трапециевидная форма выработки с плоской кровлей, образованной пластом породы. Обычно такие условия наблюдаются при пологом залегании пород, где в выработках небольшого сечения довольно широко может использоваться стальная податливая крепь трапециевидной формы. При этом достигается более полное использование площади сечения, которая может быть уменьшена по сравнению с арочной формой на 10—15%. Трапециевидная форма выработки, в отличие от арочной, упрощает установку крайней секции механизированного комплекса в откаточной выработке, способствует повышению устойчивости сопряжения лавы со штреком и снижает трудоемкость его крепления.

Многими организациями были предложены разнообразные конструкции трапециевидной крепи, которые обладают рядом отличий. В первую очередь следует упомянуть крепь МПК-Т1 с кулачковыми узлами податливости конструкции ИГД им. А. А. Скочинского (рис. 3.36). Рама крепи изготавливается из шахтного спецпрофиля СВП и состоит из двух податливых составных стоек и верхняка. Каждая стойка включает два отрезка СВП, соединяемых внахлестку податливым узлом, тем самым обеспечивая вертикальную податливость до 600 мм. Верхние концы стоек снабжены приваренным оголовком для опирания верхняка. В выработках шириной более 3—4 м несущая способность верхняка оказывается недостаточной и требуется его подкрепление промежуточной составной стойкой. Крепь эффективна в горизонтальных и наклонных (до 25—30°) горных выработках, в том числе подверженных влиянию очистных работ.

В КузНИУИ были разработаны специальные конструкции инвентарных крепей из прямолинейных элементов повышенной несущей способ-

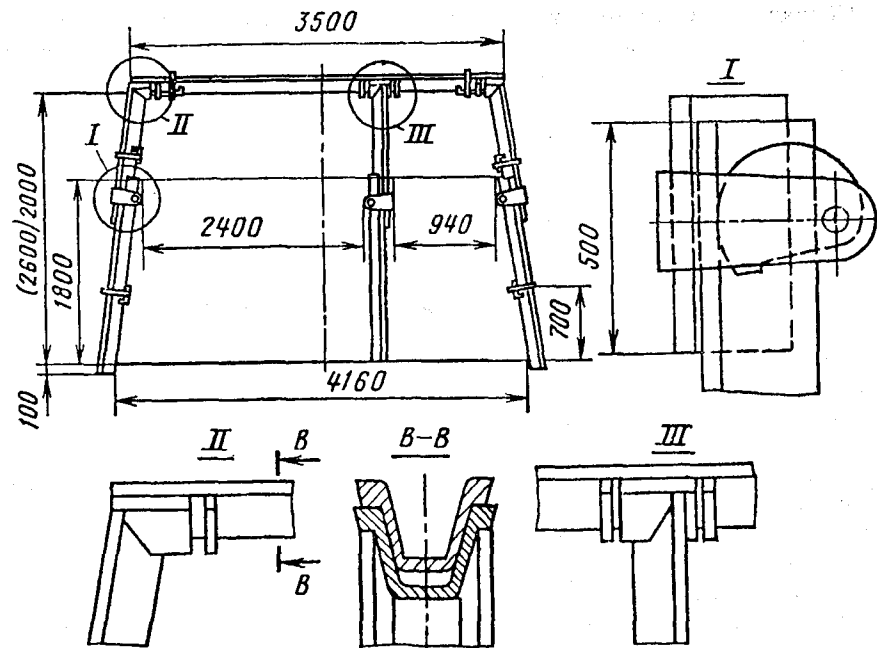


Рис. 3.36. Трапециевидная крепь МПК-Т1 конструкции ИГД им. А. А. Скочинского

ности и постоянным сопротивлением: прямоугольной формы (ИПК) и арочной (ИАК) [3.32]. Крепь ИПК предназначена для сохраняемых для повторного использования подготовительных выработок при разработке столбовыми системами пологих пластов с непосредственной кровлей средней устойчивости и устойчивой. Крепь (рис. 3.37, а) состоит из отдельных рам прямоугольной формы, включающих боковые податливые составные стойки 1, 2 и верхняк 4 из профилей СВП-17-27. Торцы верхней части стойки срезан под углом на высоту спецпрофиля так, чтобы верхняк своим днищем и полками опирался на торец днища и полку стоек. Для фиксации стоек относительно верхняка на концах последнего приварены укосные пластины. Стойки состоят из двух отрезков спецпрофиля и соединяются клиновым узлом податливости, состоящим из хомута 3, клина 5 и укосной пластины 7, свариваемой в верхнюю часть нижней стойки. Рамы соединяются между собой при помощи распор 6. Клиновое узел конструкции КузНИУИ при первоначальном нагружении стойки работает в режиме быстро нарастающего сопротивления, которое достигает 150—170 кН. После этого происходит проскальзывание частей стойки в

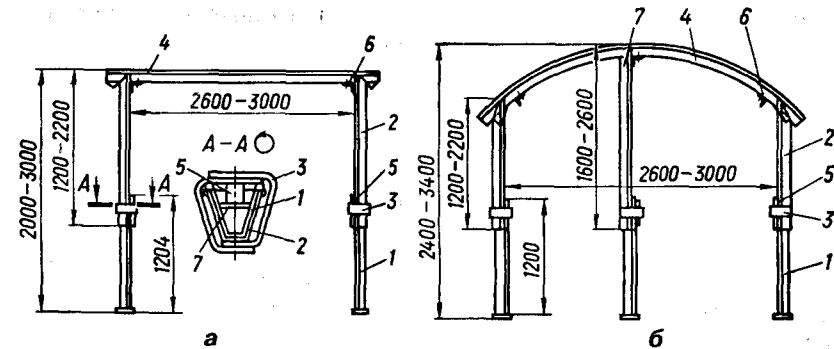


Рис. 3.37. Инвентарные крепи конструкции КузНИУИ:  
а — инвентарная прямоугольная крепь ИПК: 1 — нижняя ножка; 2 — верхняя ножка; 3 — хомут; 4 — верхняк; 5 — клин; 6 — распор; 7 — пластина; б — инвентарная арочная крепь ИАК: 1 — нижняя ножка; 2 — верхняя ножка; 3 — хомут; 4 — верхняк; 5 — клин; 6 — распор

замке на 2—5 мм и спад нагрузки до 80—100 кН. При дальнейшем нагружении процесс повторяется. Общая податливость стойки — до 1000 мм.

Крепь ИАК (см. рис. 3.37, б) предназначена для сохраняемых и повторно используемых подготовительных выработок позади очистного забоя при отработке пологих пластов с неустойчивыми породными кровлями. Крепь состоит из верхняка арочной формы, двух боковых и одной средней стоек. Связь между верхняком и стойками осуществляется клиновым узлом, аналогичным крепи ИПК. Крепи прошли успешные шахтные испытания и внедрены на шахтах Кузбасса в конце 70-х годов. Трудоемкость монтажа одной рамы крепи ИПК составляет 0,02—0,07 чел.-см, а ее демонтаж с учетом дополнительных мероприятий по обеспечению безопасных условий при извлечении — 0,06...0,1 чел.-см [3.33].

В институте ИГД им. А. А. Скочинского разработаны стальные инвентарные рамные крепи типа МИК (рис. 3.38), предназначенные для многократного использования в подготовительных выработках с наибольшим сроком службы [3.34]. Отличительной особенностью инвентарного типа крепей является возможность их удобного транспортирования, монтажа и демонтажа. Конструкции крепей шарнирно-податливы, комплектуются из семи унифицированных элементов. Комплект унифицированных элементов состоит из прямолинейных и криволинейных верхняков 1, 2, лежня 7, выдвигаемых частей 3, 4 и оснований 5, 6 стоек.

Для унификации крепей МИК разработан взаимозаменяемый прямолинейный верхняк и приняты одинаковыми размеры выдвигаемых частей и оснований стоек. Для увеличения несущей способности верхняка его среднюю часть можно заваривать в короб пластиной 9 толщиной 5—6 мм. Крепи снабжены кулачковыми и клиновыми узлами податливости, в которых клинья забивают перпендикулярно к оси стойки в приваренные к ней направляющие пластины. Для шарнирного соединения стойки

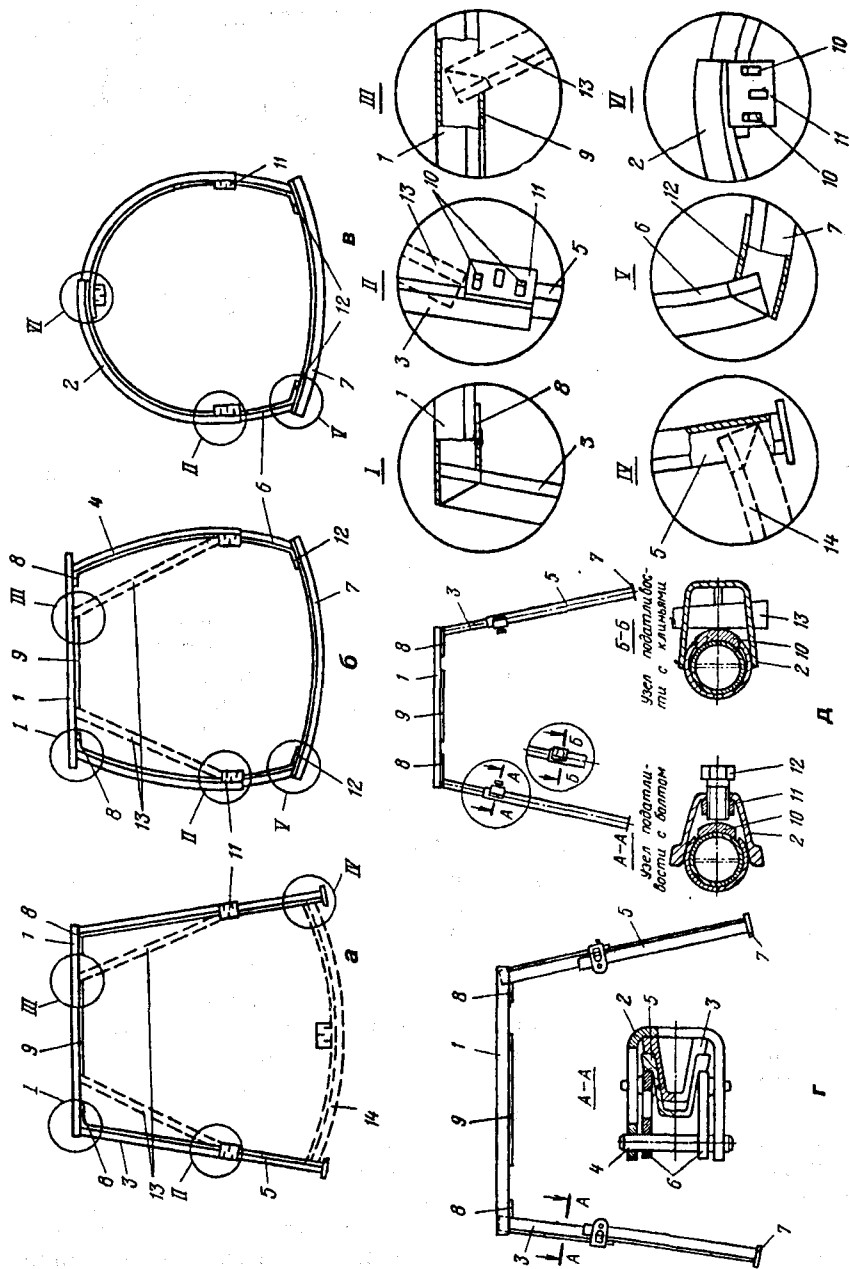


Рис. 3.38. Инвентарные крепи МИК конструкции ИГД им. А. А. Скочинского:  
 а — МИК-5; б — МИК-4с; в — МИК-46; г — МИК-46; д — МИК-46

с верхняком ее верхний конец на длине 60—100 мм сплющивается, что позволяет его вставить внутрь профиля верхняка. Последний на участке стыка со стойкой усиливается приваренной косынкой 8. При необходимости рама может быть усилена установкой двух подкосов 13, которые нижней частью опираются на приваренные к стойке пластины податливого узла, а верхней входят внутрь профиля верхняка до упора в его днище и опираются на усиливающую пластину 9. Подкосы позволяют увеличить несущую способность верхняка в 1,5—2 раза, сохраняя заданную податливость крепи. Усиливающие элементы устанавливаются в зоне влияния очистных работ и переносятся на следующие рамы по мере подвигания очистного забоя и извлечения крепи при погашении выработки. Для всех крепей МИК предусмотрены варианты замкнутой конструкции с лежнем из спецпрофиля, шарнирно опирающимся на стойки и несколько изогнутым в сторону почвы в виде пологого свода. Для условий повышенного бокового давления предусмотрена установка стоек, изогнутых в сторону пород боков, что несколько повышает их работоспособность и снижает действующие изгибающие моменты.

В крепи МИК-46 (см. рис. 3.38, д) используются податливые стойки в виде стальных низколегированных бесшовных катаных труб, соединенных телескопически. В этой крепи используется клиновой или винтовой узел податливости, хомут которого приварен к стойке, а последняя упирается в верхняк через приваренную к нему опору. Крепь МИК-4з выполнена из СВП и снабжена кулачковым узлом податливости (рис. 3.38, з). В крепи МИК-4с (рис. 3.38, а) предусмотрена установка подкосов для условий высокого вертикального давления. Для замкнутых конструкций МИК разработан составной лежень 14, который комплектуется из двух выдвигаемых частей стоек, соединенных в центре с помощью стандартного для крепей МИК клинового податливого узла. Составной лежень сопрягается со стойками шарнирно путем введения его расплющенных концов внутрь профиля оснований стоек. Такая конструкция лежня позволяет ему при значительных нагрузках со стороны почвы выработки скользить вверх по стойкам, одновременно сокращаясь по длине. Сопrotивление податливости лежня зависит от степени сопротивления его узла.

Крепь МИК-5 (рис. 3.38, б) предназначена для крепления выработок с преобладающим давлением горных пород со стороны боков и почвы. Она представляет собой бочкообразную замкнутую конструкцию, состоящую из прямолинейного верхняка, криволинейного лежня и двух податливых криволинейных стоек. Стойки изготавливаются из двух отрезков СВП с радиусом кривизны 3,57 м, обращенных внутрь выработки фланцами, соединенными внахлестку. Нижний элемент крепи (лежень) изготавливается из отрезка СВП днищем к породе со стрелой прогиба 200—300 мм. На концы лежня приваривают упорные пластины 12, образующие пазы для размещения стоек.

Крепь МИК-6 (рис. 3.38, в) предназначена для выработок со значительным всесторонним горным давлением и выполнена в виде замкнутой арки, состоящей из двух верхних криволинейных элементов 2, соединенных между собой и основанием стоек 6 внахлестку клиновыми узлами податливости (клин 10 и пластина 11 с прорезьями). Конструкция лежня аналогична крепи МИК-5.

Технические характеристики крепей МИК приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11. Технические характеристики крепей МИК

Показатели	МИК-4с	МИК-4а	МИК-4б	МИК-5	МИК-6
Несущая способность рамы, МН:					
со стороны кровли:					
без усиления	0,1—0,2	0,1—0,2	0,1—0,2	0,1—0,2	0,2—0,4
с усилением	0,25—0,4	0,25—0,4	0,25—0,4	0,25—0,4	—
со стороны боков:					
без усиления	0,04—0,07	0,04—0,07	0,04—0,07	0,1—0,15	0,16—0,2
с усилением	0,06—0,1	0,06—0,1	0,06—0,1	0,16—0,2	—
Податливость, мм:					
вертикальная	700	700	600	700	700
горизонтальная	300	300	300	250	300
Масса рамы в сборе (без стяжек), кг:					
без усиления	177,8	182,4	131	233,0	214,5
с усилением	331,8	336,4	—	319,0	—
Размеры крепи, мм:					
высота	До 3000	До 3000	До 3000	До 3000	До 3000
ширина	4000	4000	3400	3250	3250
Площадь сечения выработки, м <sup>2</sup> :					
в проходке	До 10,0	До 10,0	До 9,0	До 9,0	До 8,5
в свету	До 8,5	До 8,5	До 7,3	До 7,0	До 6,5

Примечание. В настоящее время разработаны крепи для выработок с площадью сечения до 18 м<sup>2</sup>.

Рамы крепи прошли всесторонние лабораторные испытания в ИГД им. А. А. Скочинского в податливом и жестком режимах работы. Нагружение производилось ступенями в 20 кН, проскальзывание элементов измерялось мерной линейкой, а прогибы несущих элементов — прогибомерами ПМ-3. Испытания показали, что крепи МИК-4с и МИК-5 без усиливающих элементов в жестком режиме выдерживают нагрузку до 160 кН

на раму со стороны кровли при профиле СВП-22 и до 50—100 кН со стороны боков (профиль СВП-17). Усиление этих крепей двумя подкосами увеличило несущую способность рамы до 280 кН со стороны кровли и до 60—140 кН со стороны боков (в зависимости от формы стойки).

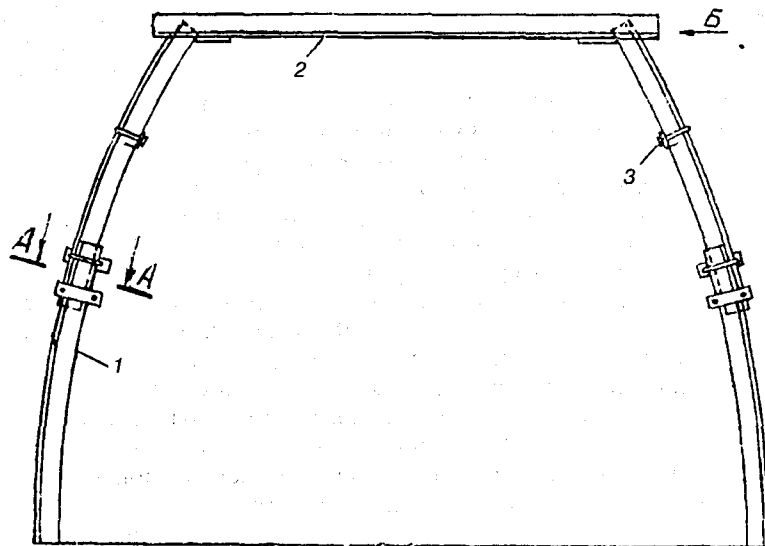
Сопротивление податливости клиновых узлов по данным испытаний превосходит сопротивление стандартных из скоб и планок примерно в 1,5 раза.

Можно отметить, что все подвиды конструкций крепи МИК предусматривают крепление многих элементов с помощью сварки (косынки верхняка, пластины податливого узла, подкосы), что, безусловно, усложняет их изготовление, требует тщательного контроля качества. Нельзя признать удачными конструкторские решения крепи с обратными сводами (лежнями). В крепи МИК-4с и ей подобных податливый составной лежень при несимметричном нагружении со стороны пород почвы способен легко выдавливаться, поворачиваясь возле одной из опор. Лежень в МИК-5,-6 полностью исключает горизонтальную податливость крепи. Предусмотренное использование двух — трех клиньев в клиновом узле податливости малоэффективно, поскольку при поочередной забивке любого из клиньев ослабляются остальные.

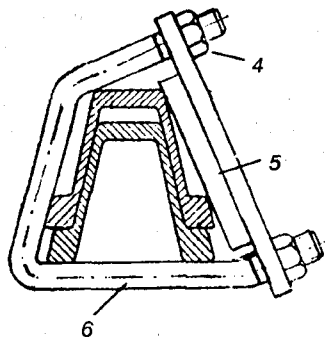
Однако следует отметить плодотворность идеи создания унифицированного ряда инвентарных крепей. Трудоемкость их применения, по данным разработчиков, на 27—44% меньше, чем деревянной трапезиевидной крепи. Трудоемкость возведения и извлечения крепей находилась соответственно в пределах 0,6—2 и 0,3—0,7 чел.-ч на 1 м выработки. Крепь прошла шахтные испытания, которые показали, что разовые потери при ее повторном использовании составляют менее 10%. Применение инвентарных крепей в выемочных выработках увеличило скорость их проведения на 20—50% в результате снижения объемов доставки материалов и быстрой сборки крепежной рамы.

ДГМИ совместно с ИГД им. А. А. Скочинского разработана стальная крепь повышенной податливости и несущей способности КМПС-ПА [3.35]. Она включает в себя (рис. 3.39) две стойки, состоящие из двух сегментов, соединенных внахлестку узлами податливости с фигурными скобами, и верхняк. Узел податливости, в зависимости от требуемой жесткости, включает от двух до четырех соединительных узлов. Испытания их на стенде ДонУГИ показали, что при работе под нагрузкой узлы не перекашиваются и не заклиниваются, длительное время сохраняя заданное сопротивление податливости (100—250 кН в зависимости от типа профилей и бокового сжатия их нахлестки). Конструктивная величина вертикальной податливости составляет 1,2 м. Крепь была внедрена на шахтах ПО «Луганскуголь» и обеспечила безремонтное поддержание горных выработок в сложных условиях. К недостаткам конструкции предложенного узла податливости следует отнести его повышенную материалоемкость, сложность изготовления, монтажа и регулирования натяжения скоб.

Карагандинским НИУИ разработана податливая трапезиевидная крепь КВВ, предназначенная для крепления горизонтальных и наклон-



*A-A повернуто*



*Вид Б*

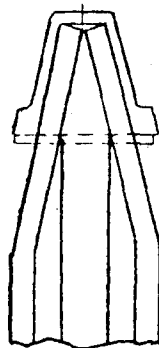


Рис. 3.39. Крепь КМПС-ПА повышенной несущей способности:  
1 — стойка; 2 — верхняк; 3 — межрамная стяжка; 4 — гайка; 5 — планка; 6 — С-образная скоба

ных (до  $18^\circ$ ) подготовительных выработок, проводимых по углю и породе [3.21]. Крепь КВВ (рис. 3.40) состоит из верхняка и двух составных стоек с клиновыми узлами податливости (см. рис. 3.18, б). Верхняк крепи изготовляется из шахтного профиля СВП-22 или СВП-27 в зависимости от размера поперечного сечения выработки. В зоне активного горного давления под верхняк устанавливается дополнительная стойка в центре пролета. Предельная нагрузка на раму КВВ для выработок с площадью попе-

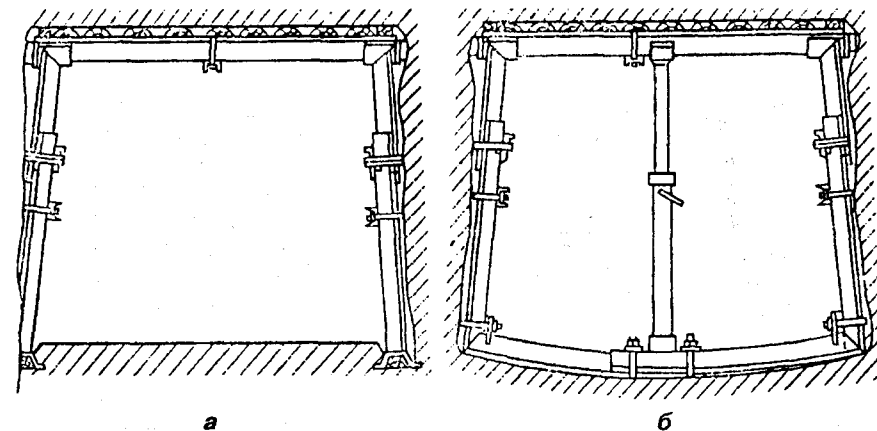


Рис. 3.40. Трапециевидная крепь КВВ конструкции КНИУИ:  
а — КВВ без лежня; б — КВВ с лежнем и усиливающей стойкой

речного сечения до  $12 \text{ м}^2$  составляет 140—200 кН, а с усилением промежуточной стойкой — 340—400 кН. Максимальная податливость — 600 мм, масса — 182—317 кг. Крепь прошла опытно-промышленные испытания на шахтах Карагандинского бассейна.

В ряде конструкций трапециевидных крепей — КПС (ДонУГИ), МТПШ-2 (ПечорНИУИ) и др. — для соединения прямолинейных элементов составных стоек используются типовые П-образные узлы, применяемые в арочной крепи (рис. 3.41). Как показано выше (см. раздел 3.3), такие узлы податливости не работоспособны на прямолинейных участках; данные крепи после перекоса и пластической вытяжки скоб в узлах теряют грузонесущую способность и исчерпывают свой запас податливости почти без сопротивления смещениям пород. Тем не менее из-за простоты конструкции и наличия типовых деталей они нашли неоправданно широкое распространение в угольной промышленности.

Обобщая характеристику конструкций с прямолинейными элементами рамы, следует отметить, что технические данные, полученные в результате испытаний, могли бы быть представительными и информативными, если бы были известны все основные параметры нагружения крепей, особенно способ приложения и закон распределения нагрузки. Судить о несущей способности крепи в реальных условиях на основании только лабораторных испытаний затруднительно. Так, если последние производились под жесткой плитой пресса, перекрывающей всю длину верхняка, то грузонесущая способность конструкции будет предопределяться только сопротивлением узлов податливости, а после ее исчерпания — потерей устойчивости стоек при незначительных деформациях верхняка. Иные условия испытаний, например приложение сосредото-



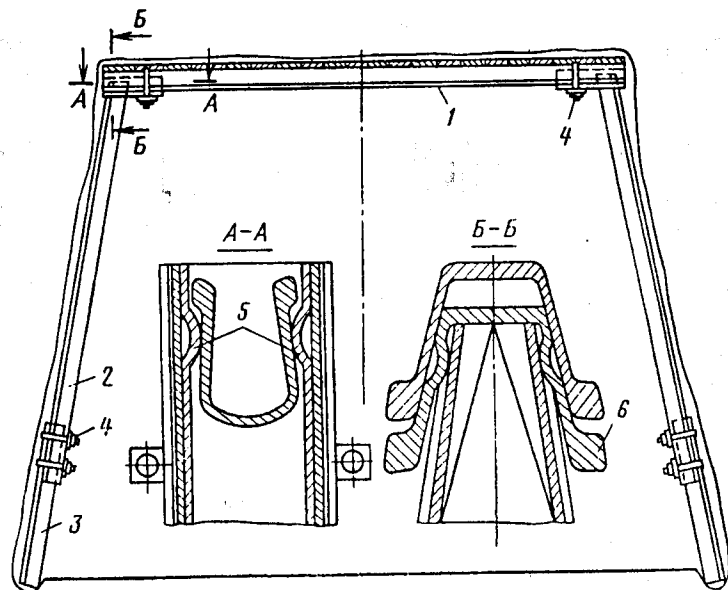


Рис. 3.41. Трапециевидная крепь МТПШ-2 конструкции ПечорНИУИ:  
1 — верхняк; 2, 3 — отрезки составных стоек; 4 — скобы с планками и гайками; 5 — сферический выступ; 6 — съемная вставка

ченной силы по центру верхняка, при котором несущая способность крепи минимальна и предопределяется изгибом верхняка под приложенной силой, характеризуют наиболее неблагоприятный случай взаимодействия крепи с массивом. Поэтому отсутствие полных сведений об условиях проведения испытаний крепи не позволяет достоверно оценивать работоспособность конструкций.

Общим недостатком крепей из прямолинейных элементов следует считать несоответствие несущей способности верхняка, подверженного изгибу, и стоек, работающих, в основном, на сжатие. Даже до наступления режима податливости велика вероятность появления пластических шарниров в верхняке. Так, два типовых узла обеспечивают податливый режим при нагрузке на раму от 100 до 200 кН. В то же время, равномерно распределенная нагрузка (наиболее благоприятный случай) на верхняк длиной 3 м из СВП-22 из условия начала текучести стали не должна превышать 70 кН, а случае сосредоточенной нагрузки (что наиболее типично) — 40 кН. Таким образом, недопустимые деформации верхняков заранее заложены в такие конструкции, что делает их малоэффективными и требует существенного изменения. Попытки усилить верхняк подкосами и промежуточными стойками значительно усложняют конструкцию, увеличивают ее материалоемкость, сокращают полезную площадь сечения и

ограничивают транспортные возможности выработки. Этим, до определенной степени, можно объяснить недостаточную распространенность экономически целесообразной трапециевидной формы выработок.

Приведенный обзор стальных рамных крепей свидетельствует о наличии большого числа конструкций, эффективных для различных горно-геологических условий, прошедших лабораторные и шахтные испытания, но не нашедших широкого промышленного применения. Практика проектирования крепи сводится, как правило, к безвариантному «выбору» трехзвневой податливой арки с упрощенным определением плотности установки рам по малодостоверным методикам.

Нельзя согласиться с формальным назначением типа спецпрофиля исходя лишь из размеров площади сечения выработки. Такой подход был оправдан на «малых» глубинах разработки, где преобладают проявления горного давления в виде сводов естественного равновесия, которые, как известно, создают нагрузку на крепь пропорционально ширине выработки. Для выработок, вокруг которых образуется зона неупругих деформаций, выбор спецпрофиля должен быть увязан с относительными размерами ЗНД, закономерностями взаимовлияния смещений пород контура и отпора крепи, что предполагает иной, чем в случаях сводов естественного равновесия, алгоритм выбора параметров крепи.

Сложность проектирования крепи горных выработок обусловлена тем, что из-за изменчивости свойств горного массива значение и распределение действующих нагрузок не могут быть точно определены и носят вероятностный характер. Традиционные методы расчета крепи используют детерминированные формы учета нагрузки и принимают ее равномерно распределенной по периметру крепи и вдоль выработки. Такой подход не отражает реальных условий функционирования крепи и ведет к избыточным затратам, о чем свидетельствуют большие объемы ежегодных перекреплений, а также частые случаи недогруженного состояния крепи. Решение задачи ресурсосбережения в угольной промышленности во многом зависит от реализации принципов оптимального проектирования шахтной крепи, что достигается соответствием между действующими нагрузками и несущей способностью элементов рамы [3.37].

Учитывая невысокую достоверность существующих методов выбора параметров крепи, основанных на использовании усредненных по всей промышленности показателей, в качестве альтернативного подхода можно использовать хорошо себя зарекомендовавший в условиях неопределенности метод двухстадийного проектирования. Данный метод представляет собой концепцию последовательного использования проектных и новых сведений, полученных при сооружении выработки с корректировкой конструкции в соответствии с фактическими проявлениями горного давления, что позволяет учесть особенности не только конкретного региона, но и отдельной выработки.

Благодаря управлению несущей способностью крепи (ее последовательному усилению или облегчению) можно обеспечить соответствие

между действующими нагрузками и материалоемкостью конструкции по всей длине выработки. Однако практическое использование данного способа сопровождается рядом трудностей. Большинство конструкций крепей усиления сопоставимы с базовой (первоначальной) крепью по материалоемкости и сложности монтажа, что исключает возможность эффективного «наращивания» ее несущей способности необходимыми ступенями. Многие элементы усиления рамы (дополнительные стойки, анкера, тампоны закрепного пространства, инъекционное упрочнение массива и др.) эффективны на ранних стадиях геомеханических процессов (смещения и разрушения пород), а их запоздалое применение снижает эффективность усиления. При усилении (облегчении) крепи возможны длительные «простои» выработки.

Для эффективного использования метода двухстадийного проектирования необходимо постоянное сотрудничество между заказчиком, проектировщиком и исполнителем работ с целью оперативного принятия решений, распределения риска и прибыли при экономии ресурсов.

Существующий консервативный подход безосновательно игнорирует достижения инженерной мысли в области крепления горных выработок, снижает возможности эффективного применения рамных конструкций и, наряду со сложностью прогнозирования горного давления, является основной причиной значительных материальных издержек в горном производстве.

*Чтобы усовершенствовать всю систему крепления штрека, необходимо в первую очередь решить проблему надежности затяжки.*

*Д-р К. Сими*

#### 4. Межрамные ограждения

Важной и неотъемлемой частью рамных крепей является межрамное ограждение, предназначенное для выполнения грузонесущих и изолирующих функций. Грузонесущая функция осуществляется посредством затяжек и состоит в восприятии давления со стороны массива горных пород, передачи его на рамы крепи и предотвращения вывалов породы в выработку. Изолирующая функция выполняется разнообразными покрытиями и сводится к предотвращению потери прочности и устойчивости пород путем выветривания под действием внешних агентов рудничной атмосферы. Отказы затяжек в выработке приводят к обрушению пород между рамами, потере устойчивости выработки, травматизму подземных рабочих, аварийности на рудничном транспорте и другим негативным последствиям.

Высокие стоимость и уровень трудозатрат крепления во многом обусловлены большими объемами материалоемких, трудно поддающихся механизации возведения межрамных ограждений. Расход лесоматериалов при применении деревянных затяжек составляет  $0,6...1,0 \text{ м}^3$ , а железобетонных плит —  $0,3...0,5 \text{ м}^3$  на 1 м выработки. Трудозатраты на доставку и возведение ограждений таких видов составляют до 50% всех затрат на крепление [4.1].

Многочисленные шахтные наблюдения свидетельствуют, что на многих шахтах затяжки ломаются, хотя деформации рамной крепи отсутствуют. Недостаточная несущая способность затяжек ограничивает шаг установки рам: вместо 1 м — до 0,7 и менее, поэтому в неблагоприятных условиях несущую способность непосредственно рам используют лишь на 50 — 70% [1.13, 3.31]. Эта тенденция подтверждается и экспериментальными данными, собранными при ремонтах и восстановлении выработок. Так, объемы перекреплений на большинстве шахт приближаются к объемам проведения выработок, тогда как объемы ремонта выработок с полной заменой затяжек («перезатягиванием») больше в 1,5—2 раза [1.24], а на некоторых шахтах (например, в Центральном районе Донбасса) — в 3—4 раза. Недостаточная работоспособность межрамных ограждений ограничивает применение в сложных условиях усиленных конструкций рам с оптимальным шагом установки, что снижает эффективность их применения [4.2]. В Германии акцентируют внимание на затяжке как

наиболее слабом месте традиционной штрековой крепи, которая не гарантирует соответствия предъявляемым к крепи требованиям на протяжении всего срока службы выработки [4.3].

Основными факторами, влияющими на технико-экономическую эффективность межрамных ограждений, являются: технологичность изготовления затяжек, соответствие несущей способности крепи и ограждающих ее элементов, долговечность, стоимость, трудоемкость монтажа, транспортные расходы, возможность повторного использования, надежность и эксплуатационные расходы по ремонтам и перезатягиванию выработки [4.4]. Разнообразие горно-геологических условий и поиск экономически эффективных решений привели к появлению большого числа типов межрамных ограждений, многие из которых, однако, не нашли промышленного использования. Их наиболее полная классификация [4.5] по функциям подразделяет ограждения на несущие, изолирующие и комбинированного назначения (рис. 4.1). В подготовительных выработках угольных шахт обычно используют несущие конструкции — затяжки, которые могут быть жесткими (железобетонные конструкции), полуэластичными (деревянные, металлические и полимерные конструкции) и эластичными (металлическая сетка, рулонная стеклоткань). Такая классификация является в определенной мере условной, поскольку нет четко указанных критериев отнесения затяжек к тому или иному типу.

Наибольшее распространение получила деревянная затяжка шахтной крепи, представляющая собой доски и распилы толщиной 30—50 мм или кругляк хвойных пород дерева диаметром 70—120 мм. Деревянной затяжкой крепится около 70—80% общего объема подготовительных выработок, что объясняется простотой ее изготовления, транспортирования и укладки, а также относительно низкой стоимостью. В то же время недостаточная несущая способность (разрушение наступает при нагрузке 10—20 кПа [4.6]) и малый срок службы (0,5—3 года) вследствие гниения становятся причинами массового отказа деревянных затяжек в виде внезапного хрупкого излома с запредельными деформациями (рис. 4.2). Существенным недостатком таких затяжек является горючесть, что ограничивает их применение выработками, оговоренными в правилах безопасности.

В сложных горно-геологических условиях при высоком давлении пород деревянная затяжка может быть выполнена из круглых стоек. Момент сопротивления круглой стойки в 1,5 раза выше суммарного сопротивления двух распилов, полученных из этой стойки. Поэтому, если применить затяжку из круглых стоек вразбежку с интервалом в один диаметр, как предлагается в [3.31], можно получить межрамное ограждение в 1,5 раза более прочное при том же расходе древесины.

В настоящее время ввиду высокой дефицитности лесоматериалов в Украине область применения деревянных затяжек существенно ограничивается, все большее применение находят затяжки из других материалов. В 15—20% горных выработок, как правило с длительным сроком

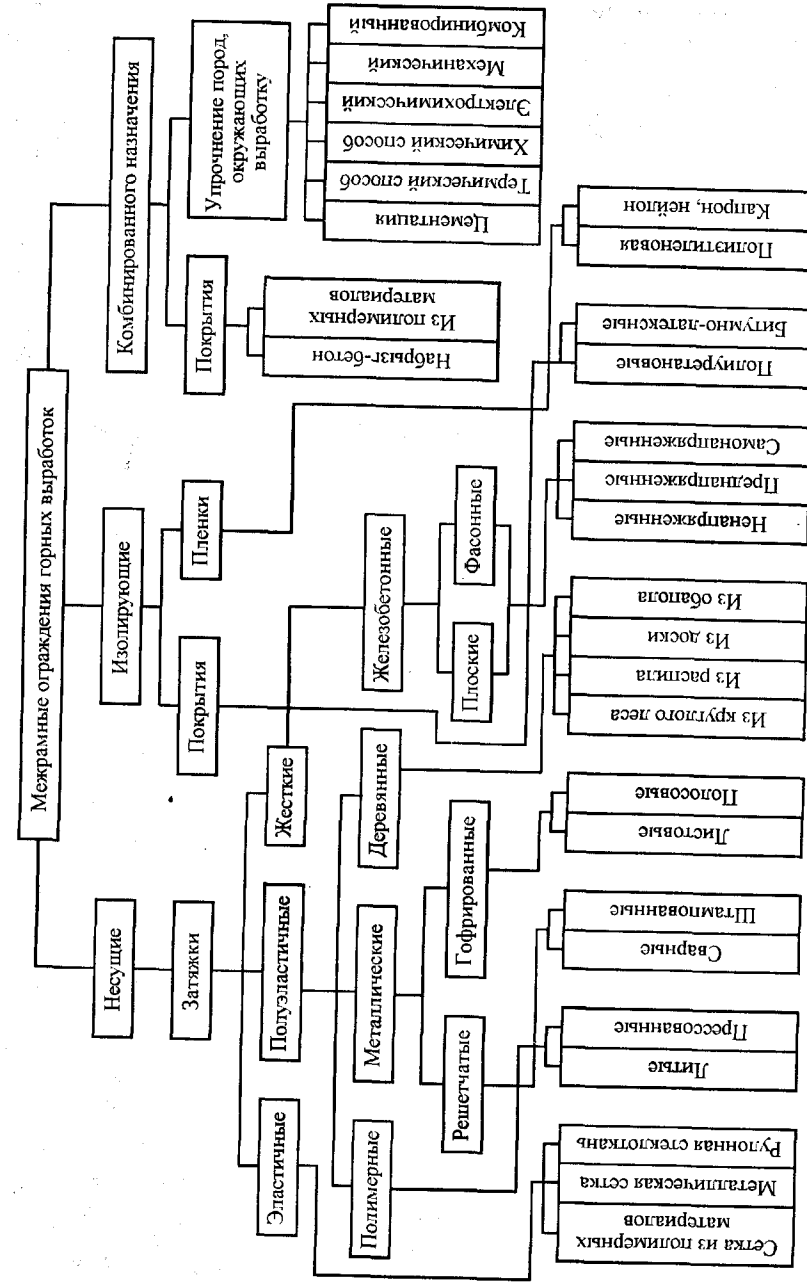


Рис. 4.1. Классификация межрамных ограждений шахтной крепи

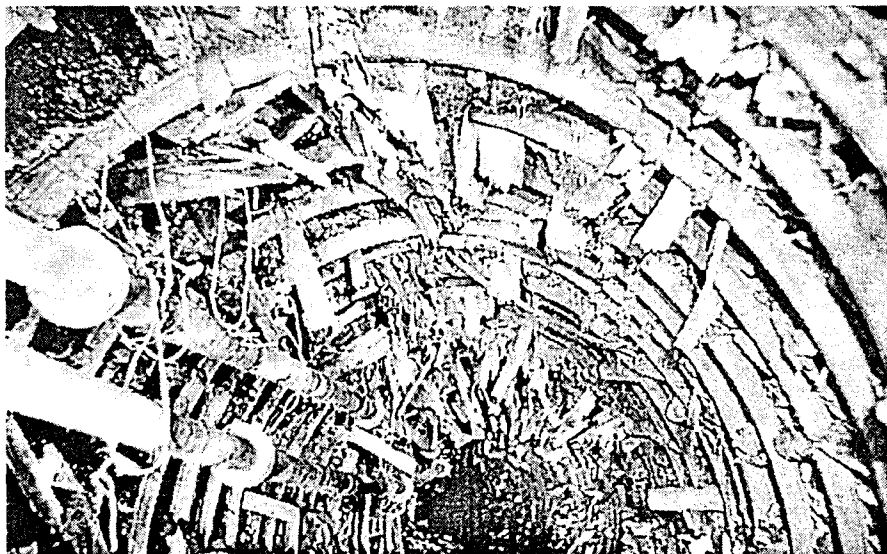


Рис. 4.2. Типичные отказы деревянной затяжки

службы, нашла применение железобетонная затяжка в виде плоской плиты длиной от 0,8 до 1,2 м (рис. 4.3, а), изготавливаемая из бетона классов В15—В25, армированная сварной сеткой из проволоки Ст.3 диаметром 3—8 мм. Ее технико-экономические показатели приведены в табл. 4.1.

Несмотря на повышенную по сравнению с деревянной затяжкой несущую способность (до 50 кПа при равномерной нагрузке), плоская железобетонная затяжка имеет ряд недостатков: расположение арматуры вблизи нейтральной оси ведет к низкой прочности на изгиб, низкая ударная прочность является причиной разрушения до 30% затяжек в процессе транспортирования к забою, трудоемкость укладки на крепь из-за большой массы доходит до 50% трудозатрат на крепление.

Таблица 4.1. Показатели железобетонных затяжек длиной 1 м

Показатели	Затяжка	
	плоская	кессонная
Размеры сечения, см	20×5	20×5
Расход бетона на 100 шт. затяжек, м <sup>3</sup>	1,0	0,84
Расход арматуры на 100 шт. затяжек, кг	81,4	53,2
Масса одной затяжки, кг	24,0	19,6
Число затяжек из 1 м <sup>3</sup> бетона, шт.	100	120
Трудоемкость изготовления 100 шт. затяжек, чел.-ч	5,12	5,10

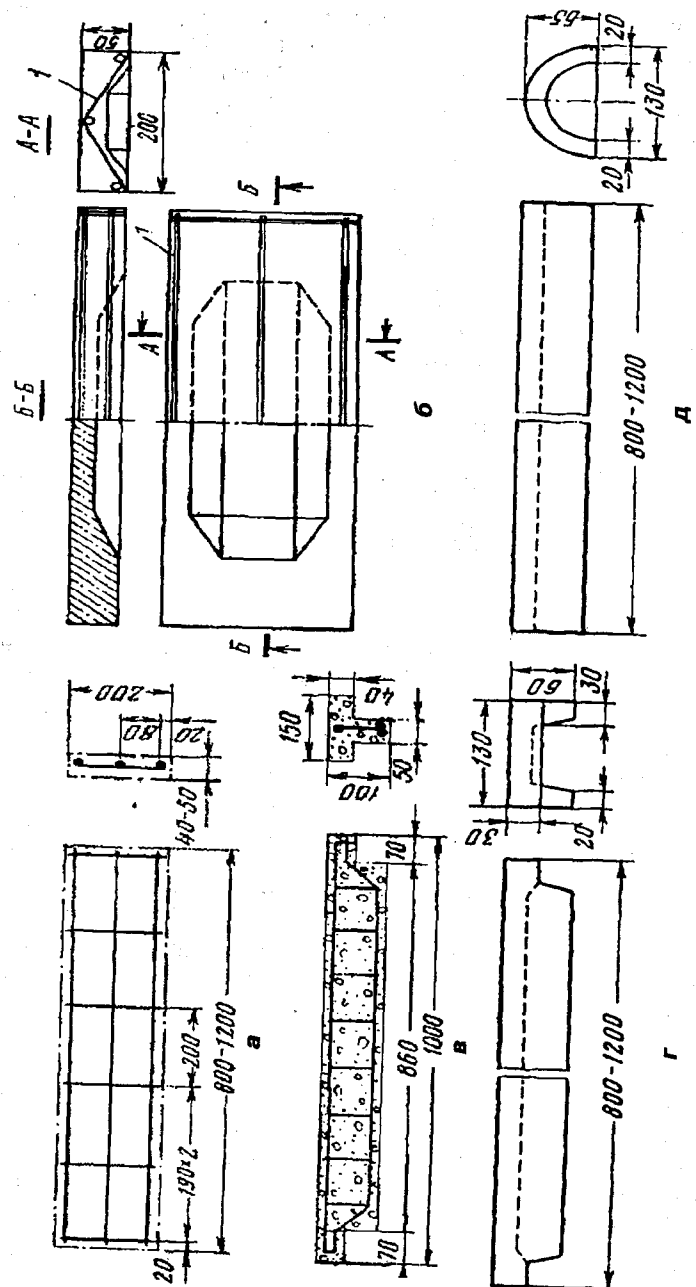


Рис. 4.3. Конструкции железобетонных затяжек: а — плоская; б — кессонная; в — тавровая; г, д — фасонные

В целях совершенствования плоской железобетонной затяжки НИИОМШС создал кессонную затяжку, отличительной особенностью которой является наличие кессона (рис. 4.3, б). За счет применения объемного арматурного каркаса и строго фиксированного его положения относительно нейтральной оси достигнута более высокая несущая способность при одновременном снижении расхода материала и массы изделия [1.22, 4.7]. Однако из-за необходимости применения дорогостоящей формы и усложнения технологии изготовления конструкции она не нашла широкого применения. Для увеличения несущей способности железобетонной затяжки в 3—4 раза ей можно придать тавровый профиль [3.31] с размещением рабочей арматуры в полке тавра (рис. 4.3, в). Конструктивная высота затяжки увеличивается в 2 раза, а ширина сокращается на 25%, что ведет к повышению удельного расхода материалов на 20%. Эта идея нашла воплощение и в других предложениях по изменению конструкции железобетонных затяжек со сложным профилем поперечного сечения — корытные (рис. 4.3, г), сводчатые (рис. 4.3, д) и пр., — которые остались на уровне технических разработок или применялись небольшими партиями.

С целью исследования эффективности применения железобетонных затяжек в ДГМИ были обследованы 32 протяженные горные выработки различного назначения на 7 шахтах ГХК «Луганскуголь». Был охвачен следующий диапазон горно-геологических условий: глубина разработки изменялась от 270 до 710 м, показатель предела прочности пород на одноосное сжатие — от 30 до 85 МПа, площадь сечения выработок в свету — от 7,9 до 18,3 м<sup>2</sup>, угол падения пород — от 0 до 30°, срок службы выработок на момент обследования — от 1 до 40 лет. Шахтными наблюдениями фиксировались остаточные деформации элементов рамной крепи, смещения в узлах податливости, размеры закрепных пустот в характерных точках сечения контура (кровля, узлы податливости, бока на уровне межрамных стяжек), количество и длина участков нагружения по периметру рамы, участки разрушения, формы и типы деформаций затяжек.

По результатам обследования было установлено:

1. Характерными видами деформации железобетонной затяжки являются (рис. 4.4) первичные трещины в бетоне, отломы углов и кромок, излом в пролетной части без и с разрывом арматуры, соскальзывание конца затяжки с фланца спецпрофиля, смятие затяжек при податливости крепи из-за уменьшения её периметра. Из всех видов деформации лишь первичные трещины могут считаться допустимыми.

2. В большинстве случаев имеются пустоты за крепью на всех стадиях развития горного давления, в том числе в податливом и жестком режиме работы, когда появляются остаточные деформации элементов крепи. Это свидетельствует, что контакт крепи с массивом имеет место лишь на огра-

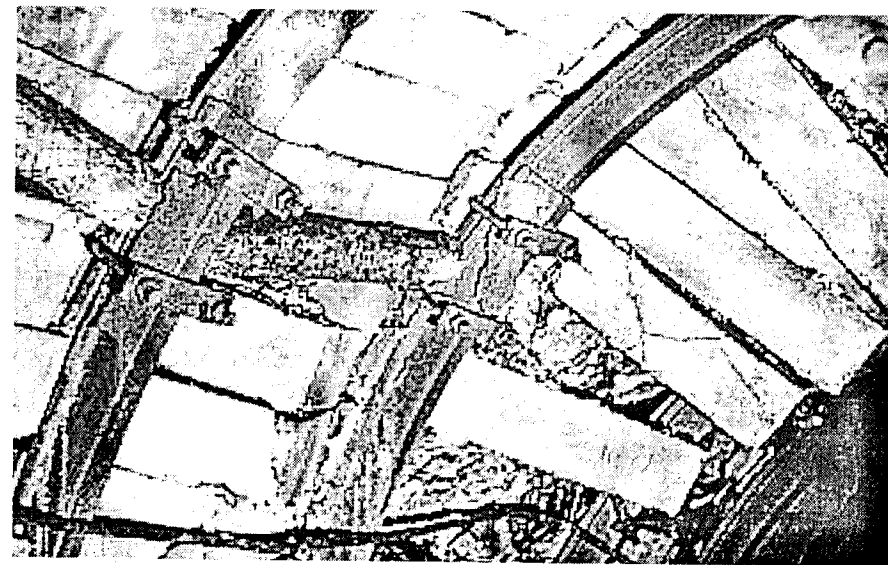


Рис.4.4. Отказы железобетонных затяжек

женном участке периметра, а забутовка либо отсутствует, либо выполнена с плохим качеством, особенно в кровле выработки.

3. Участки периметра выработки с деформациями крепи и затяжки во многих случаях совпадают, нередко поломанные затяжки наблюдаются при удовлетворительном состоянии рам, что подтверждает факт несоответствия режимов работы крепи и межрамного ограждения, т.е. отсутствие у последнего необходимого запаса прочности или податливости.

4. В горных выработках, где наблюдались пустоты закрепного пространства по всему периметру и поэтому затяжки не были загружены, обнаружены трещины и поломки в некоторых из них на различных участках контура, что объясняется их повреждениями при транспортировке и укладке. Минимальный объем таких затяжек в крепи — 5...10%.

5. В 90% обследованных выработок поломка затяжек в кровле значительно выше, чем в боках, что объясняется пологим залеганием пород и преобладающим их смещением в кровле. Поэтому участки в боках выработки могут служить резервом снижения материалоемкости межрамных ограждений.

6. Средневзвешенная надежность затяжки по массиву обследованных выработок в кровле составляет 0,77, в боках — 0,85, а на участках с активными проявлениями горного давления в зоне влияния очистных работ не превышает 0,4.

На основании анализа конструктивных решений железобетонных затяжек и шахтных наблюдений за их работой можно заключить, что жест-

\* Авторы признательны инж. С. Г. Хворостиненко (трест «Луганскуглестрой») за помощь в проведении шахтных наблюдений.

кий режим является основным режимом их взаимодействия с породами и формирует неблагоприятное распределение внешних нагрузок. При этом затяжка не способна перераспределить внешнюю нагрузку без разрушения, т.е. лишена возможности приспособляться к смещениям пород (адаптироваться), что значительно снижает ее работоспособность. С другой стороны, нередки случаи, когда такая затяжка после излома бетона и прогиба в выработку, при защемлении концов на фланцах спецпрофиля, длительное время не обрушается, частично сохраняя свою работоспособность. В этом состоянии затяжка принципиально меняет свой режим работы на податливый, превращаясь за счет защемленной арматуры в подобие вантовой конструкции. Бетон в последней оказывается излишним, выполняя лишь роль ограждения. Следовательно, создание жестких затяжек требует излишней материалоемкости конструкции. Поэтому в мировой практике развитых горнопромышленных стран железобетонная затяжка почти не применяется.

Попыткой избежать этого технического противоречия можно считать разработанное в ДГМИ компромиссное решение железобетонной затяжки [4.8], использующей вантовый принцип работы. Затяжка (рис. 4.5, а) выполнена из армированной криволинейной плиты с вогнутостью внутрь выработки и плоскими опорами на концах. Благодаря вогнутости затяжки внутрь выработки забутовочный слой породы в центральной части пролета имеет повышенную толщину и, следовательно, меньшую, по сравнению с забутовкой над спецпрофилем, жесткость. Это приводит к изменению эпюры нагрузок: над рамой крепи происходит их возрастание (концентрация), что ведет к надежному защемлению опор, а над затяжкой — снижение с рациональным перераспределением (минимум в центре пролета и повышение нагрузки к концам). При возрастании нагрузки затяжка переходит в рабочее состояние, при котором образуются трещины в бетоне и продольная арматура работает как растянутые ванты, защемленные на раме. Тем самым затяжка представляет собой полуэластичное межрамное ограждение. Межарматурное заполнение здесь не является грузонесущим, но препятствует выпадению мелких кусков породы, заземляет на крепи и изолирует арматуру от коррозии, выполняя одновременно ограждающую, фиксирующую и изолирующую функцию. Благодаря этому обеспечивается повышение грузонесущей способности затяжки в 1,5—2 раза при одновременном снижении расхода бетона на 30—40%. Но затяжке присущи и некоторые недостатки: она чувствительна к качеству забутовки, требует более тщательной укладки на крепь и надежного защемления концов, а криволинейная форма и малая толщина усложняют ее изготовление.

Дальнейшим развитием идеи перераспределения нагрузки с пролетной части затяжки на рамы крепи можно считать предложенную ДГМИ шарнирно-податливую конструкцию (рис. 4.5, б), представляющую собой плоскую тонкостенную плиту 1, уложенную своими концами 2 на рамы 3, снабженную парами односторонних шарниров 4 в виде поперечных вы-

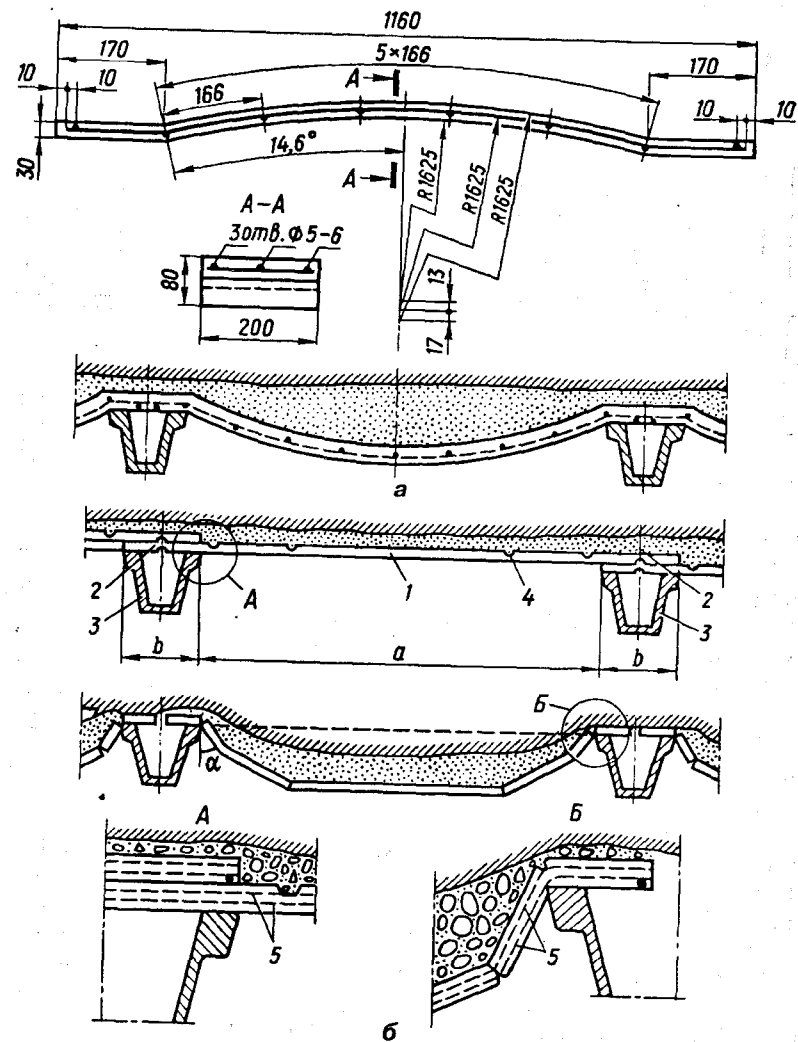
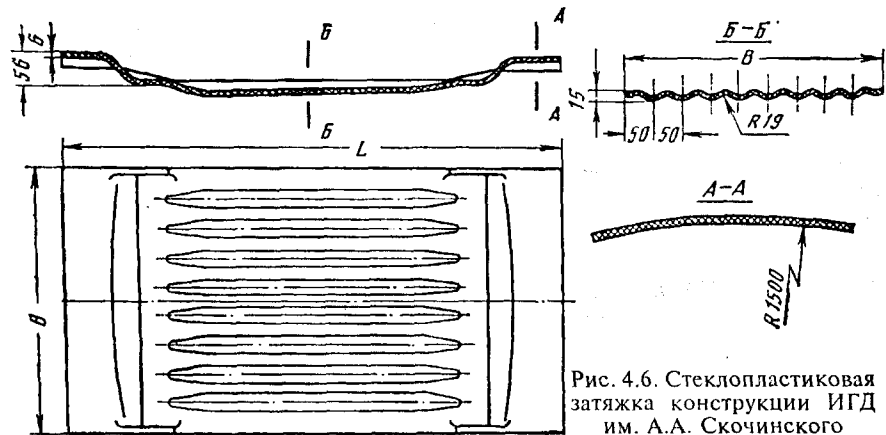


Рис. 4.5. Облегченные затяжки конструкции ДГМИ:  
а — криволинейная с вогнутостью внутрь выработки; б — шарнирно-податливая

мок в поверхностном (сжатом) слое бетона и армированную стержнями 5. При смещении породного контура происходит деформация затяжки в шарнирах 4 и плавное опускание её центральной части благодаря постепенному проскальзыванию концов 2 на профиле рам 3. Затяжка, смещаясь под действием нагрузки, «уходит» от горного давления, перераспределяя



его на рамы крепи. Это обеспечивает такие же высокие показатели надежности и экономичности, как в описанной выше криволинейной конструкции, но значительно упрощает её изготовление и монтаж.

Следует отметить работы в области изготовления затяжек из других материалов, заменителей бетона (фосфогипс, шлакобетон, и др.) [1.22, 4.9]. За счет использования местных материалов удастся несколько снизить стоимость затяжки, однако жесткий режим ее работы сохраняет все недостатки жестких конструкций, которые усугубляются недостаточной стабильностью свойств и невысокой прочностью этих материалов.

Полуэластичный режим работы, позволяющий затяжке прогибаться под нагрузкой с одновременным перераспределением ее на рамы, реализуется в стеклопластиковых затяжках. В ИГД им. А.А. Скопинского разработана стеклопластиковая затяжка, прочность которой равна прочности бетонной, а масса и толщина в 5-6 раз меньше [4.10]. Она выполнена в виде листа волнистого профиля с плоскими концами (рис. 4.6). За счет ориентации и группировки стекложгутов в изделиях из стеклопластика при их фиксации в матрице (полимерной смоле) можно сконструировать затяжку, соответствующую заданному распределению нагрузок на крепь. Конструкция предусматривает соединения концов соседних затяжек между собой, что существенно повышает их несущую способность, но усложняет изготовление и монтаж.

С целью снижения аэродинамического сопротивления рамной крепи НГАУ разработаны конструкции профильных затяжек из стеклопластика (рис. 4.7), которые позволяют создать гладкую поверхность выработки за счет выступов желоба конструкции в выработку между рамами «заподлицо» со спецпрофилем [4.11]. Эти затяжки обладают высокой прочностью, хотя требуют тщательной установки арок. Несущая способность затяжек ограничена опиранием их концов на спецпрофили соседних рам и необходимостью качественной забутовки из мелкой породы в

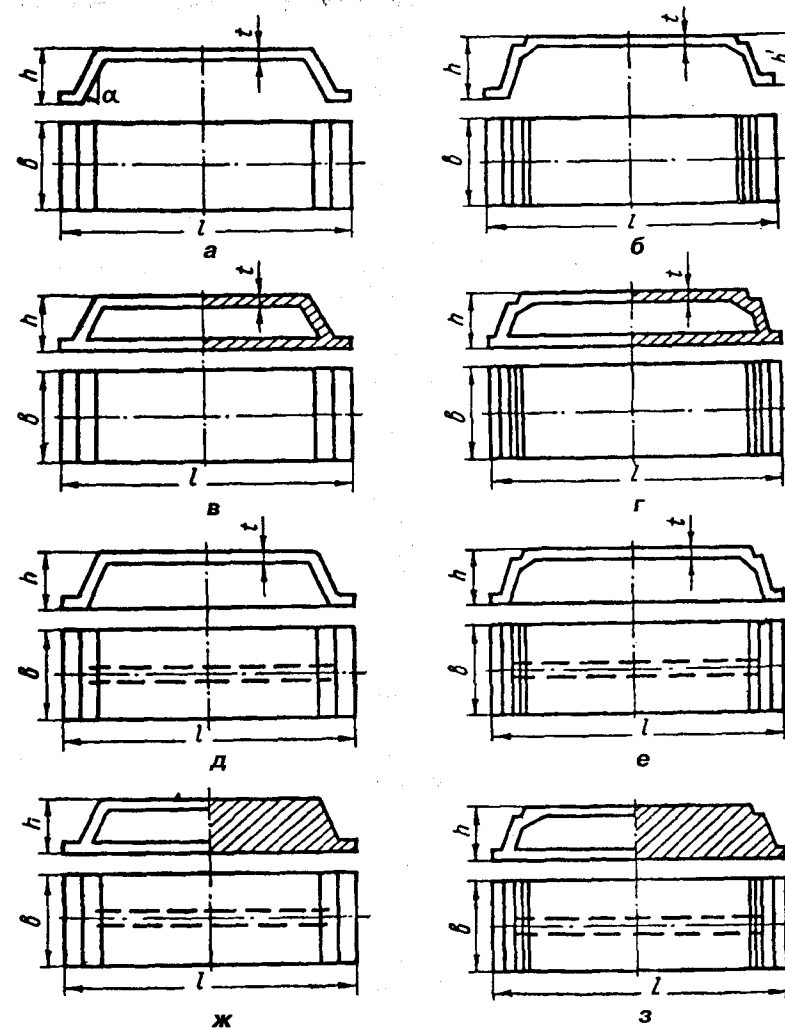


Рис. 4.7. Конструкции стеклопластиковых профильных затяжек:  
а, б — основная форма; в, г — с дополнительной задней стенкой; д, е — с ребром жесткости;  
ж, з — с ребром жесткости и задней стенкой

желобе конструкции. Препятствием для широкого применения стеклопластиковых материалов для крепи являются их высокая стоимость, дефицитность и отсутствие промышленной базы для производства.

Из полимерных материалов можно изготовить эластичные стеклотканевые межрамные ограждения [1.22, 4.10]. Стеклоткань обладает высокой

прочностью на растяжение, негорючестью и химической стойкостью. В то же время широкое применение стеклоткани сдерживается рядом факторов. В частности, закрепление концов стеклоткани на раме деревянными клиньями и соединение полос между собой предопределяет в итоге несущую способность ограждения, значительно более низкую, чем самой стеклоткани. Последняя провисает между рамами и требует натяжения. Непременным условием применения является тщательная забутовка закрепного пространства, так как падающие куски породы легко разрывают стеклоткань. Кроме этого, она повреждается породой при ведении взрывных работ, что требует отставания межрамного ограждения от забоя на 15–20 м и применения в призабойной части выработки железобетонной затяжки в качестве временной. Как показали исследования [4.12], эластичные затяжки почти не оказывают сопротивления смещению пород в пролете между рамами, в результате чего выработки, закрепленные ими, деформируются наиболее интенсивно.

В то же время низкие надежность и работоспособность жестких затяжек вызвали появление многочисленных конструкций полужестких стальных межрамных ограждений. Все их разнообразие можно подразделить на три типа: решетчатые, пластинчатые (листовые) и комбинированные. Одними из первых появились сварные решетчатые затяжки из полосовой стали (рис. 4.8, а), которые работают в режиме, близком к жесткому. Их установка на крепь проста и не требует специальных мер по соединению соседних затяжек между собой. Затяжки не повреждаются при транспортировании и монтаже, имеют повышенную несущую способность на единицу веса, благодаря малой площади ячеек между полосами практически предотвращают просыпь мелкой породы из закрепного пространства. Для условий повышенного горного давления на шахтах и рудниках Кривбасса были предложены затяжки (рис. 4.8, б) из жестких ограждающих решеток, скрепленных с рамами [4.13]. В этих решетках наряду с полосами металла использовалась арматурная решетка в центре затяжки и жесткое обрамление из швеллеров по ее краям. Этот тип затяжек отличается большим расходом металла.

С целью снижения материалоемкости и стоимости обычно решетчатые затяжки изготавливают из прутков (арматурной стали), варьируя размеры ячеек, длину и ширину затяжки. Последние представляют собой (рис. 4.9) сварную сетку из продольных прутков диаметром 5–12 мм с загнутыми под углом 30–60° концами и поперечных прутков диаметром 3–5 мм. Размер ячеек между прутками изменялся в пределах (50...80) × (180...250) мм. Длина затяжки рассчитана на стандартный шаг крепи 0,5, 0,75 и 1 м.

В решетчатых затяжках весьма важную роль играет их соединение между собой или с рамами крепи. Простейший вариант такого соединения предусматривает использование в качестве зацепов загнутых концов продольных прутков, которые охватывают фланцы спецпрофиля. Простота изготовления и монтажа конструкции, а также невысокая стоимость

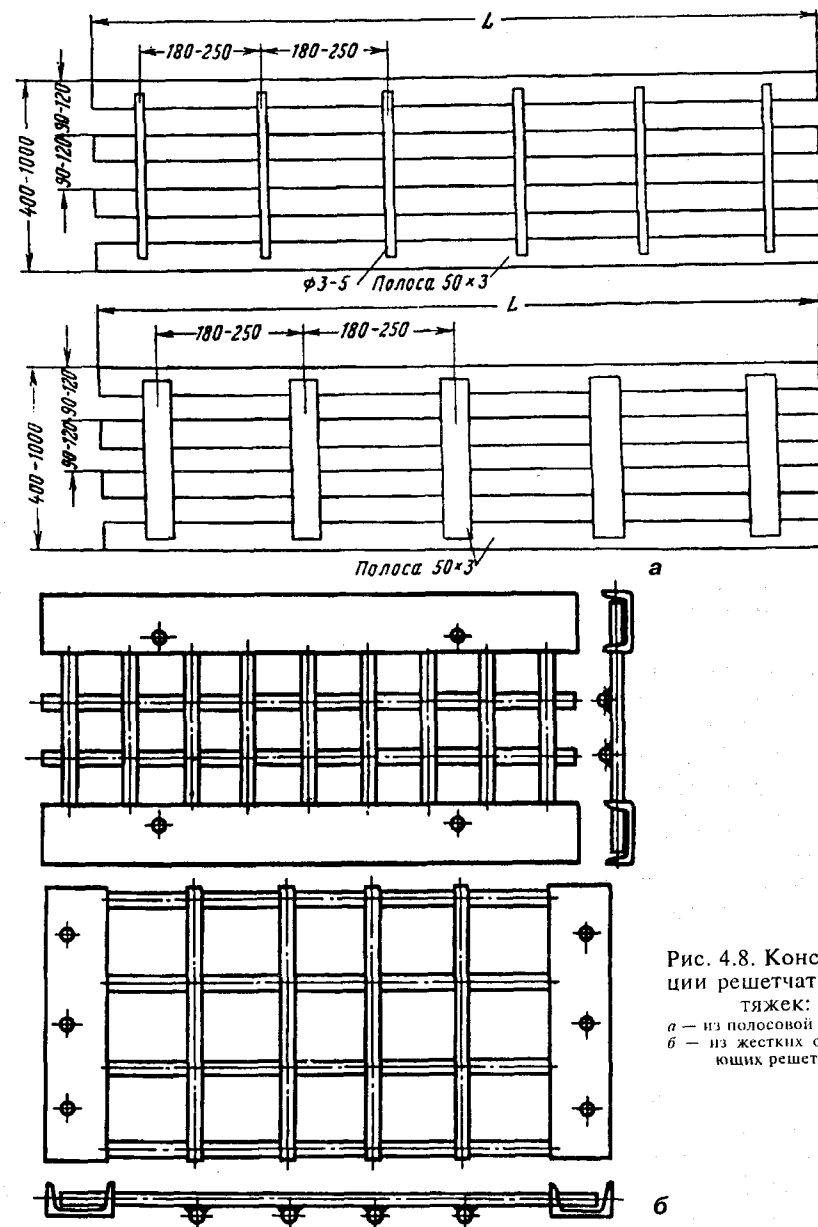


Рис. 4.8. Конструкции решетчатых затяжек:  
 а — из полосовой стали;  
 б — из жестких ограждающих решеток



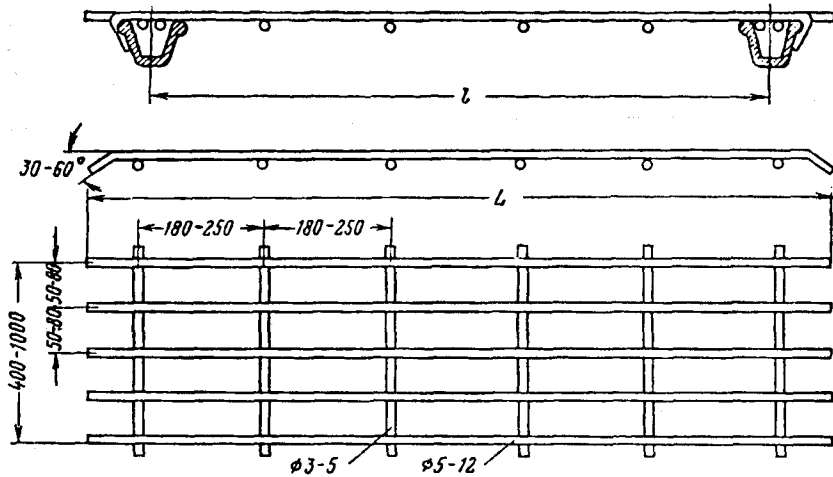


Рис. 4.9. Решетчатая затяжка из стальных прутков

делают эту затяжку весьма привлекательной. Однако ее несущая способность ограничена условиями зацепления концов за спецпрофиль и недостаточна для восприятия давления со стороны пород, что может привести к их обрушению в выработку при разгибе зацепа затяжки.

Для повышения надежности и несущей способности решетчатой затяжки в ЦНИИподземмаш разработана конструкция затяжки из сварных продольных прутков диаметром 6 мм, концы которых отогнуты и заварены в виде петель, и поперечных прутков диаметром 3 мм. Ширина затяжки 1 м, длина 1 и 1,5 м, размер ячейки сетки 60×200 мм (рис. 4.10). Соединение затяжек по длине выработки осуществляется с помощью соединительного стержня 1 диаметром 8 мм, продеваемого в петли затяжки. В поперечном направлении затяжки соединяются внахлестку. Такое соединение соседних затяжек существен-

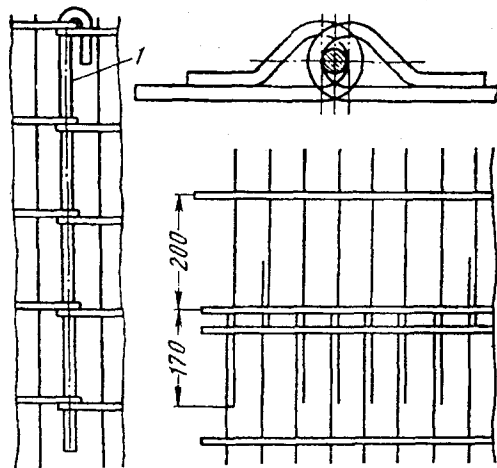


Рис. 4.10. Стальная решетчатая затяжка МРЗ конструкции ЦНИИподземмаша

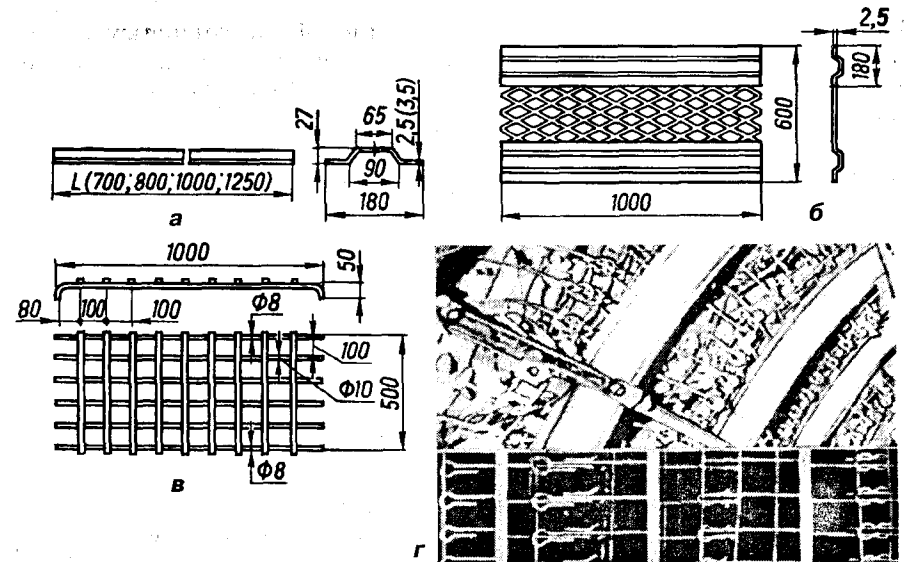


Рис. 4.11. Конструкции стальных затяжек, применяемых на шахтах ФРГ: а — пластинчатая (тонколистовая); б — комбинированная пластинчато-решетчатая; в — решетчатая; г — решетчатая с узловым соединением фирмы «Зальгиттер»

но увеличивает несущую способность и надежность работы межрамного ограждения. В то же время возникают значительные неудобства при монтаже затяжки, поскольку продевание соединительного стержня в петли при ширине затяжки 1 м затруднительно, особенно при укладке затяжки на арку, когда большая ширина затяжки приводит к необходимости ее изгиба по радиусу верхняка.

Большое распространение решетчатые затяжки получили в Германии, вытеснив из промышленного использования другие конструкции [4.14]. Как правило, эти затяжки выполняют из прутков диаметром 8—10 мм с достаточно мелким размером ячеек: от 60×150 до 100×100 мм. Смежные затяжки по оси выработки соединяются между собой крюками. Два или три конца крюков отгибаются трубчатым рычагом, после чего затяжки не могут произвольно рассоединяться и способны выдерживать повышенную нагрузку. По периметру выработки смежные затяжки соединяются между собой мягкой стальной проволокой диаметром 2 мм. Наиболее просты по конструкции затяжки, приведенные на рис. 4.11, в. Они укладываются на крепь и должны быть прижаты к ней деревянными клиньями (что не всегда возможно при переборах породы), а несущая способность такой затяжки ограничена сопротивлением разгибу крюка, заведенного за спецпрофиль. Более совершенны решетчатые затяжки фирмы «Зальгиттер» (рис. 4.11, г). Они отличаются конструкцией элементов соединения затяжек между собой. Концы продольных стержней толщиной

4—6 мм выполнены в виде отогнутых под углом 45° незамкнутых колец. При соединении колец смежных затяжек образуется узел, который при нагружении затягивается. За счет этого затяжка обладает некоторой податливостью и повышенной работоспособностью. Прочность узла соединения выше прочности стержней, его образующих. К недостаткам затяжки можно отнести сложность ее изготовления, высокие требования к качеству установки, невозможность ее демонтажа.

На угольных шахтах были попытки использовать в качестве межрамных ограждений рулонные сетки из проволоки диаметром 2 мм. На шахтах ФРГ такую сетку усиливают решетчатыми секциями из двух продольных и десяти поперечных стержней [4.15]. Это позволяет избежать нежелательной вытяжки сетки под нагрузкой за счет повышения жесткости. Такая конструкция является, по сути, сочетанием решетчатой и сетчатой затяжек, обладает повышенной надежностью и позволяет избежать выпадения даже мелких кусков породы в выработку.

Концерном «Рурколе АГ» были проведены исследования решетчатых затяжек с целью обоснования критериев их выбора с точки зрения горной технологии, безопасности работ и экономичности [4.3]. Отмечены типичные случаи повреждения систем затяжки:

1. Вытягивание обычной сетчатой затяжки под нагрузкой. Сетчатая затяжка «протаскивается» через профили арочной крепи и провисает между арками штрека.

2. Срез решетчатой затяжки на кромке желобчатого профиля арки при высоком натяжении.

3. Разгибание проволок с изогнутыми концами. Конструкция обычной решетчатой затяжки с изогнутыми для скрепления друг с другом концами не оказывает необходимого сопротивления разгибанию.

4. Разрушение продольных прутков перед соединительными элементами. При холодной гибке соединительные элементы несколько ослабляются, в результате чего в системе затяжки появляется «псевдоперезжим».

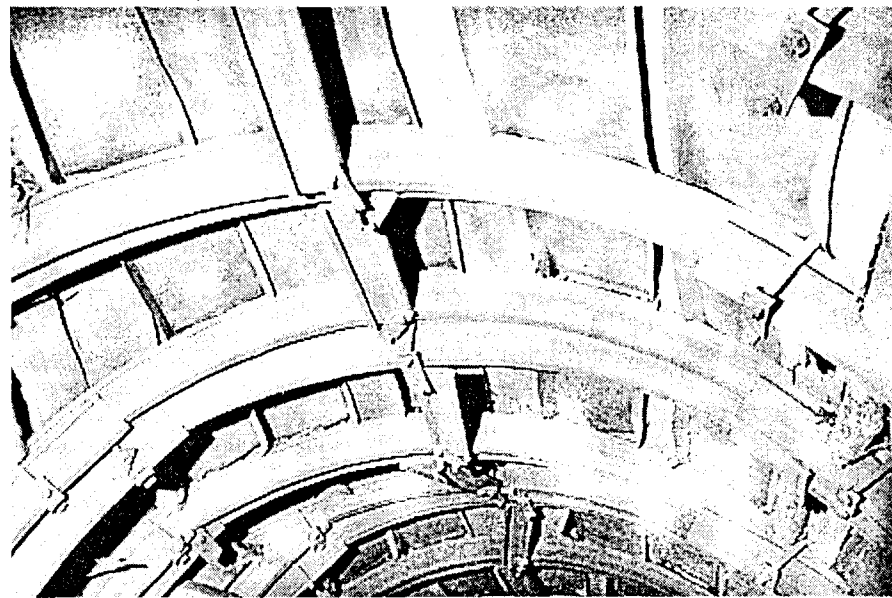
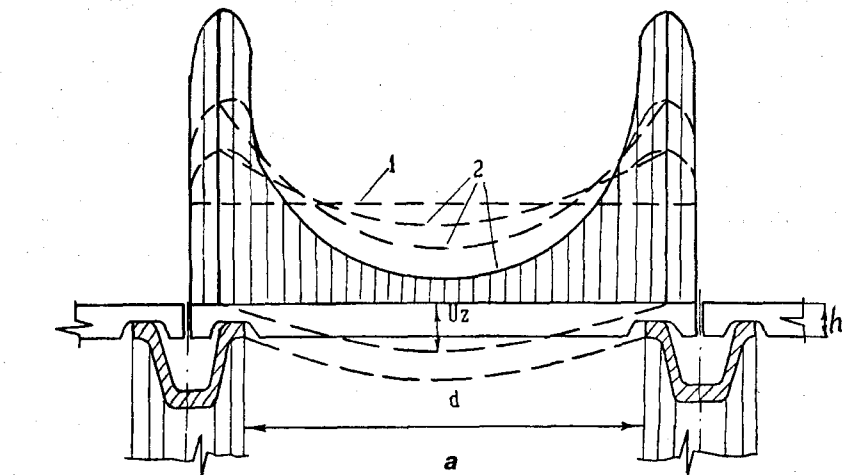
На лабораторном стенде исследовано взаимодействие решетчатых затяжек с разрыхленной отжимаемой породой [4.3] и сделан вывод об отсутствии универсальной затяжки, эффективной для любых горно-геологических условий. Все исследованные конструкции обладали недостаточной надежностью соединений затяжек в продольном направлении между собой и преждевременно выходили из строя при нагружении. Установлено, что максимальная величина несущей способности достигается после прогибания решетчатой затяжки приблизительно на 150 мм при пролете 1 м. Анализируя существующие конструкции решетчатых затяжек, следует отметить, что они являются реальной эффективной альтернативой железобетонным и деревянным затяжкам в угольной промышленности. В то же время необходимо вести дальнейшее совершенствование конструкций межрамных ограждений с учетом выявленных недостатков и обеспечения оптимальных режимов взаимодействия системы «рама — затяжка — забутовка — массив».

Для сложных горно-геологических условий были разработаны стальные пластинчатые (листовые) затяжки, отвечающие повышенным требованиям к безопасности. Они изготавливаются из стального листа толщиной 2—3 мм и представляют собой желобчатые конструкции, способные воспринимать значительные изгибающие моменты под действием внешней нагрузки (см. рис. 4.11, а, б). В ДГМИ [4.16] разработана стальная листовая затяжка в виде тонкостенного желоба с зацепами на концах, оптимизированы ее геометрические параметры, обеспечивающие надежную работу без опасности внезапного разрушения (рис. 4.12). Отличительная конструктивная особенность затяжки — ее зацепы — исключают возможность соскальзывания концов затяжки со спецпрофиля, позволяют фиксировать рамы на заданном расстоянии друг от друга, превращают затяжку в элемент крепи, обеспечивающий ее пространственную устойчивость при ведении взрывных работ в забое. Работоспособность такой затяжки обеспечивается ее плавной податливостью вплоть до стрелы прогиба  $U_{зт} = (0,1 \dots 0,15)d$ , где  $d$  — межрамное расстояние. Эпюра нагрузок на затяжку при ее деформировании в пролетной части значительно снижается, концентрируясь на рамах крепи. Результаты испытаний затяжек длиной 1 м, нагруженных в центре пролета сосредоточенной силой, представлены на рис. 4.13. Работоспособность новой затяжки, численно равная площади под ее деформационно-силовой характеристикой, выше, чем железобетонной, в 2,8—5 раз, а грузонесущая способность ее увеличивается почти в 2 раза. Если учесть снижение нагрузок со стороны массива из-за податливости затяжки, то это различие увеличивается еще более. Такую затяжку целесообразно устанавливать не по всему периметру арки, а на самых ответственных ее участках, что, несмотря на несколько повышенный расход металла, снизит эксплуатационные затраты на поддержание выработки, предотвратит травматизм рабочих от вывалов пород.

Сравнение технико-экономических характеристик шахтных затяжек приведены в табл. 4.2. Масса затяжки является важной характеристикой, связанной с ее материалоемкостью и затратами труда при монтаже. Наиболее тяжелой конструкцией является железобетонная затяжка, масса которой доходит 20 кг и более, а наиболее легкой — стеклотканевая, хотя ее возведение затруднено особенностями конструкции. Как показывают данные практики, трудоемкость монтажа затяжки увеличивается пропорционально ее массе, когда последняя превышает 4—6 кг.

Таблица 4.2. Техничко-экономические показатели шахтных затяжек

Тип затяжки	Масса, кг	Несущая способность, кПа	Допустимый прогиб, мм	Срок службы, лет	Относительная стоимость
Деревянная	6—8	10—20	50	1—3	0,3—0,5
Железобетонная	19—24	30—50	20	25—30	1,0
Стеклотканевая	до 1	25—30	>200	20	0,5—0,8
Стальная решетчатая	2—4	30—40	>200	3—7	0,7—0,9
Стальная листовая	4—6	40—70	150	5—10	1,5—2,0



б

Рис. 4.12. Стальная листовая затяжка конструкции ДГМИ:  
а — работа под нагрузкой: 1 — эпюра нагрузки в начальной стадии; 2 — семейство эпюр в процессе прогиба затяжки; б — испытание затяжки в сочетании с усиленной крепью (сдвоенные рамы) в условиях ш. «Полтавская» ПО «Орджоникидзеуголь»

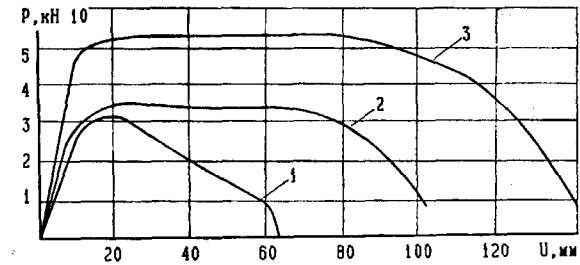


Рис. 4.13. Результаты испытаний затяжек:  
1 — железобетонной; 2 — стальной листовой при  $h = 4$  см; 3 — стальной листовой  $h = 6$  см ( $h$  — высота ребер жесткости см. рис. 4.12. а)

Сравнивая затяжки по несущей способности, следует иметь в виду, что этот показатель носит сугубо условный характер: лабораторные испытания затяжки не воспроизводят особенности ее взаимодействия с породой и крепью в натуральных условиях. Нагрузку задают равномерно распределенной и независимой от деформации затяжки, что редко наблюдается на практике. Поэтому приведенная в табл. 4.2 несущая способность дает приближенное представление о прочностных свойствах того или иного межрамного ограждения. Достаточно обратить внимание на тот факт, что несущая способность железобетонной затяжки при равномерной нагрузке превышает несущую способность рам в 1,5 — 2 раза, и поэтому теоретически она не может разрушиться раньше крепи. На практике наблюдается обратное, так как на затяжку действуют неравномерные (часто сосредоточенные) нагрузки.

Важным параметром, на который ранее специалисты мало обращали внимание, является допустимый прогиб затяжки, который отражает ее способность адаптироваться к неравномерности действующих нагрузок и перераспределять их на крепь. Однако и этот параметр сам по себе лишь частично может отражать грузонесущую способность конструкции. Поэтому следует для характеристики затяжки использовать понятие работоспособности, которое учитывает несущую способность и деформативность в совокупности. В общем случае работоспособность можно выразить в виде зависимости

$$A = \int_0^U S(x) dx, \quad (4.1)$$

где  $A$  — работоспособность затяжки, Н·м;  $U$  — допустимый предельный прогиб, м;  $S(x)$  — нагрузка на затяжку, Н;  $x$  — текущий прогиб, соответствующий нагрузке  $S$ .

Работоспособность является обобщенным показателем деформационно-силовой характеристики конструкции и равна площади под кривой в координатах  $S-x$ . Именно этот показатель и может быть принят в качестве объективного параметра, позволяющего судить о целесообразности применения межрамного ограждения. Исходя из табл. 4.2 можно при-

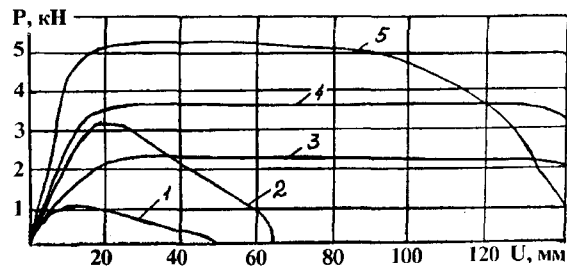


Рис. 4.14. Деформационно-силовые характеристики затяжек различных типов:  
1 — деревянная; 2 — железобетонная; 3 — стеклотканевая; 4 — решетчатая стальная; 5 — стальная листовая

ближенно оценить работоспособность различных затяжек (рис. 4.14). К числу наиболее работоспособных следует отнести затяжки, которые при деформировании обеспечивают высокий уровень прочности.

Обычно при выборе затяжек руководствуются их стоимостью (см. табл. 4.2), что не отражает эксплуатационных затрат на поддержание выработки. Поэтому для их выбора следует наряду со стоимостью в первую очередь учитывать работоспособность, особенно для сложных горно-геологических условий. Хотя каждый тип затяжки обладает своей областью эффективного применения, до настоящего времени отсутствуют исследования по оптимальному выбору их для различных горнотехнических условий. Несмотря на то, что по периметру рамы условия работы затяжки весьма различаются, в практике крепления повсеместно принят подход использования одного типа затяжки по всему контуру крепи. Поэтому, как правило, на одной и той же раме часть затяжек разрушена, а остальные — недогружены, что противоречит принципу оптимального проектирования, требующего равного запаса прочности для всей конструкции.

Оптимальное проектирование межрамных ограждений и крепи в целом целесообразно производить исходя из критерия минимизации функции затрат на крепление и поддержание с учетом возможно большего числа значимых влияющих факторов при заданной надежности функционирования выработки. Для этого критериальную функцию затрат  $Z_0$  представим в виде:

$$Z_0 = \sum k_i C_i, \quad (4.2)$$

где  $C_i$  — затратные функции при использовании затяжки;  $k_i$  — коэффициенты полноты затрат;  $i$  — порядковый номер затратных функций.

При построении функционально-стоимостной модели для выбора оптимального типа затяжки [4.17] были включены стоимость затяжки с учетом ее транспортирования и монтажа, возможность повторного использования, затраты на вентиляцию с учетом аэродинамического сопро-

тивления крепи и комплекс затрат, вызванных отказом затяжки. Последние включают в себя следующие издержки:

на ремонт (перезатяжку) выработки, вероятность которого зависит от соотношения сроков службы выработки и затяжки;

на возможное перекрепление из-за деформирования затяжки под нагрузкой и вывалов породы в выработку;

из-за прекращения использования выработки в период ее ремонта;

из-за травматизма рабочих вывалами породы.

Отказ затяжки можно трактовать как частичную или полную потерю способности выполнения функций, вызывающую необходимость проведения дополнительных работ в выработке по его устранению. Из критериальной функции затрат следует, что отказ может привести к высоким издержкам производства, и поэтому он заслуживает более подробного рассмотрения. Очевидно, отказ является случайным событием, вероятность наступления которого равна возможности превышения действующей нагрузки на затяжку над ее несущей способностью [4.18]. Численный расчет вероятности отказа можно выполнить, используя известные трактовки надежности строительных конструкций, как суперпозицию нормальных законов вероятностного распределения нагрузок  $S$  и прочности  $R$  затяжки. Если учесть, что случайные отклонения прочности затяжки по сравнению с дисперсией нагрузок невелики, то формула вероятности отказов будет иметь вид:

$$p(S > R) = 1 / 2 [1 - \operatorname{erf}(\frac{1-r}{\sqrt{2}k_V})], \quad (4.3)$$

где  $\operatorname{erf}(\ )$  — функция вероятности;  $r$  — коэффициент загрузки, равный отношению математических ожиданий действующей на затяжку нагрузки к ее прочности;  $k_V$  — коэффициент вариации нагрузки.

В табл. 4.3 представлены результаты расчетов вероятности отказов затяжки при различных значениях относительной нагрузки  $r$  и ее коэффициентов вариации  $k_V$ .

Таблица 4.3. Вероятность отказов затяжки в зависимости от  $k_V$  и  $r$

Значение $k_V$	Значение $r$										
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,3	0,00	0,00	0,02	0,09	0,25	0,50	0,75	0,91	0,98	1,00	1,00
0,5	0,02	0,06	0,12	0,21	0,35	0,50	0,66	0,79	0,88	0,94	0,98
1,0	0,02	0,21	0,27	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66	0,73	0,79	0,98

Из таблицы следует, что вероятность разрушения затяжки существенно возрастает по мере увеличения относительной нагрузки. Следует обратить внимание на то, что если нагрузка на затяжку меньше ее проч-

ности ( $r < 1$ ), то вероятность разрушения не равна нулю и тем больше, чем выше коэффициент вариации  $k_V$ . Он является сложной функцией, зависящей от взаимодействия затяжки с системой «крепь — массив» и технологии работ по проведению и креплению выработки. Чем больше нарушения технологии проходки и крепления, тем выше  $k_V$ , тем вероятнее отказы. Так, если относительная нагрузка незначительна (например, только 20% прочности), то при  $k_V = 0,5$  будет разрушено 6% затяжек, а при  $k_V = 1,0$  — каждая пятая затяжка.

До настоящего времени горные специалисты недостаточно учитывали влияние режима работы затяжки на ее надежность. Величина и неравномерность нагрузок, отражаемые их коэффициентом вариации и законом распределения, должны компенсироваться не повышением прочности жестких конструкций за счет их избыточной массы, а путем адаптации к ним межрамных ограждений, работающих в податливом режиме.

Особенно эффективными могут оказаться податливые стальные затяжки в сочетании с упрочняющими и изолирующими покрытиями типа торкрет- и набрызгбетона. В таких комбинированных межрамных ограждениях достигается упрочнение забутовки на глубину 50 мм и более (в ряде случаев до поверхностного слоя породного массива) с образованием упрочненного породного слоя, адгезионно связанного с решетчатой затяжкой. Полученное армопородное ограждение типа «решетчатая затяжка — укрепленный слой породы» обладает новыми свойствами: заметно (в несколько раз) повышается несущая способность ограждения, устраняется возможность вывала кусков породы между ячейками, усиливается связь затяжек друг с другом и крепи в целом с массивом, достигается надежная защита от коррозии всех металлических поверхностей, гидро- и газоизоляция закрепного пространства. Эти дополнительные качества нового комбинированного ограждения позволяют сократить расход стали на крепление, повысить его срок службы, провести при необходимости последующий тампонаж закрепного пространства и окружающих выработку пород, снизить аэродинамическое сопротивление и запыленность выработки.

Таким образом, нашедшие широкое распространение в горной промышленности деревянные и железобетонные затяжки, как неэффективные конструкции, должны быть заменены на более прогрессивные. Поэтому следует сосредоточить внимание ученых и разработчиков на создании новых и расширенном применении существующих стальных податливых затяжек в комбинации, при необходимости, с изолирующими и упрочняющими покрытиями.

*Крепь не составляет одного целого с породой и не является ее непосредственным продолжением. Это система двух разнородных тел, хотя и действующих совместно.*  
Проф. Протодяконов М. М.

## 5. Средства обеспечения взаимодействия рамной крепи с массивом пород

### 5.1 Расклинки и стяжки

Несущая способность рамных податливых крепей в значительной степени зависит от распределения на контуре рамы пассивного отпора боковых пород, который в первоначальный период работы крепи передается через ее боковую расклинку [5.1]. Обычно расклинку производят в местах соединения верхняка со стойками, вбивая деревянный клин между породным обнажением и участком крепи, ограниченным скобами податливого узла (рис. 5.1).

Представляет интерес предложенная в ИГД им. А. А. Скочинского [5.2] оптимизация расположения расклинок в зависимости от направления приложения нагрузки на верхняк крепи (рис. 5.2). Несимметричное расположение расклинок при внецентренной нагрузке способствует более равномерному распределению усилий по контуру арки, снижая действующие в ней изгибающие моменты на 30 — 60%.

В ДонУГИ [5.3] проведены исследования, позволяющие определять рациональные параметры размещения расклинок (рис. 5.3) в зависимости конструктивных параметров крепи в виде безразмерных соотношений:

$$f_1(\beta, \gamma) = rP_{пр} / (2M_T), \quad (5.1)$$

$$f_2(\beta, \gamma) = rP_d / (2W[\sigma]),$$

где  $\beta, \gamma$  — угловые параметры расклинки крепи;  $P_{пр}, P_d$  — предельная и допустимая нагрузка на крепь;  $r$  — радиус кривизны верхняка крепи;  $W$  — момент сопротивления сечения профиля;  $[\sigma]$  — расчетное напряжение для материала крепи;  $M_T = S_x \sigma_T$  — изгибающий момент в пластическом шарнире крепи;  $S_x$  — статический момент спецпрофиля;  $\sigma_T$  — напряжение текучести для материала крепи.

Варьируя показатели  $\beta$  и  $\gamma$  для различных типов крепи, по графикам рис. 5.3 легко определить оптимальные параметры расклинки, позволяющие раме воспринимать максимальные нагрузки.

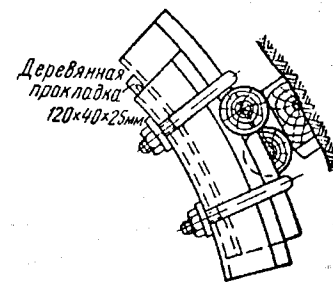


Рис. 5.1. Типовая расклинка арки на участке податливого узла

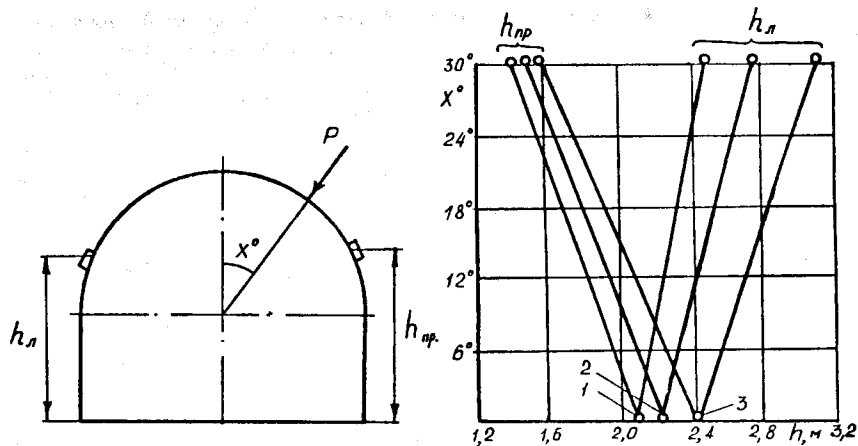


Рис. 5.2. Рациональное расположение расклинок при несимметричном нагружении:  
 $x$  — угол приложения нагрузки;  $h_a$ ,  $h_{np}$  — высота от почвы выработки до расклинивающего элемента слева и справа от оси симметрии выработки

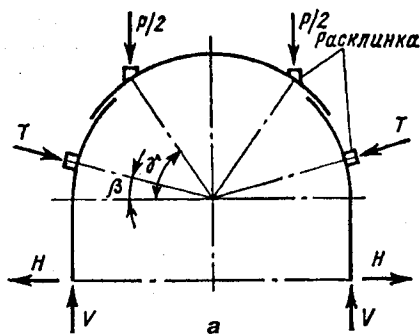


Рис. 5.3. Влияние параметров расклинки на грузонесущую способность крепи:  
 $a$  — схема размещения расклинок;  $б$  — зависимость по условию предельной нагрузки;  $a$  — по условию допустимой нагрузки

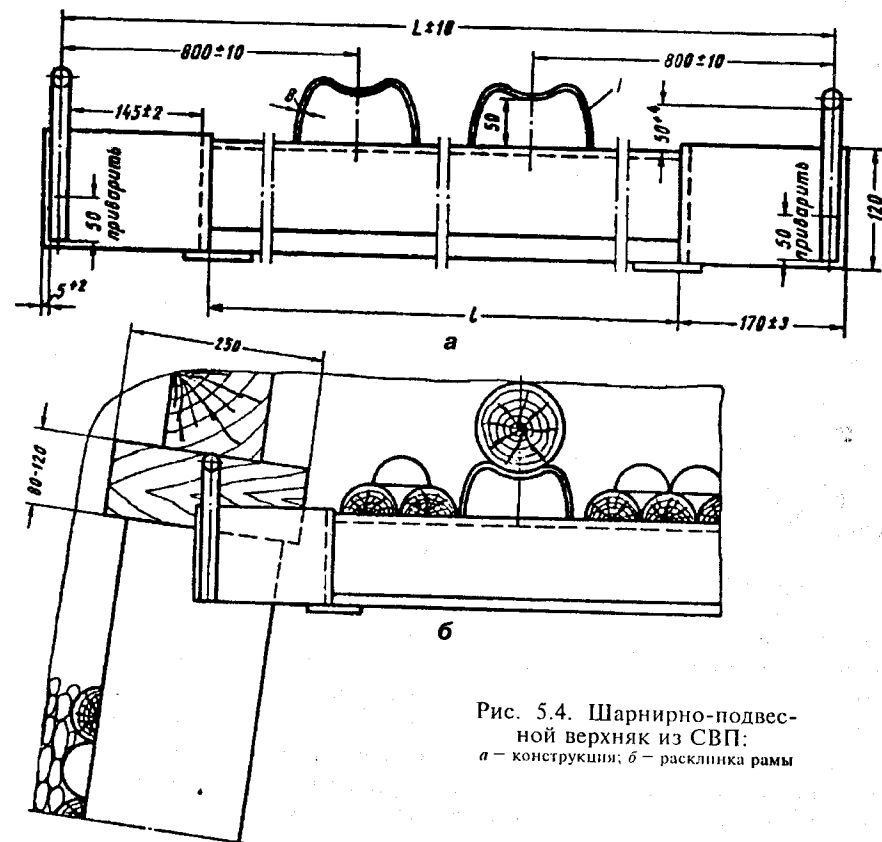
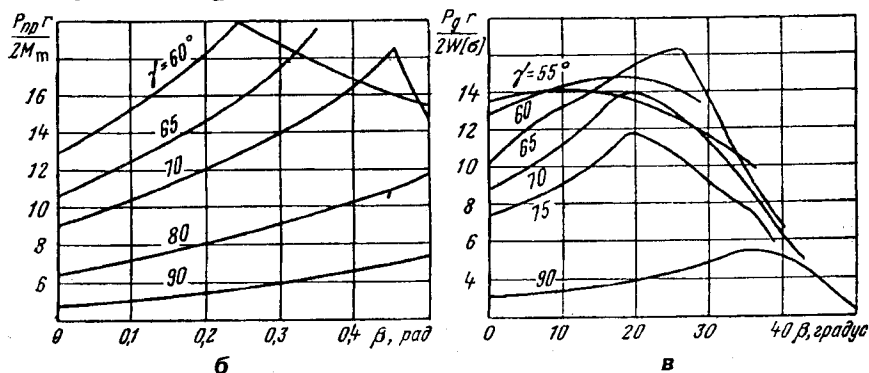


Рис. 5.4. Шарнирно-подвешенной верхняк из СВП:  
 $a$  — конструкция;  $б$  — расклинка рамы

С целью обеспечения благоприятного распределения нагрузки на прямолинейный верхняк трапецевидной крепи, ДОНУГИ принято конструктивное решение подвешено шарнирного верхняка (рис. 5.4) повышенной несущей способности. Это достигается за счет того, что точки приложения внешней нагрузки на верхняк со стороны массива, благодаря расклинке, оказываются отнесенными от центра верхняка к его опорам, что примерно в 1,5—2 раза снижает действующие в его сечении изгибающие моменты. Верхняк выполнен из спецпрофиля, повернутого дном к кровле, и снабжен двумя ограничителями нагрузки 5, разнесенными от его центра к опорам. Ограничители 1 выполнены в виде стальных скоб с выемкой для установки прогона между верхняком и породой. Они предназначены для создания некоторого запаса податливости и снижения изгибающих моментов в центре пролета верхняка. Такое решение отличается простотой, надежностью и высокой эффективностью, а к числу его

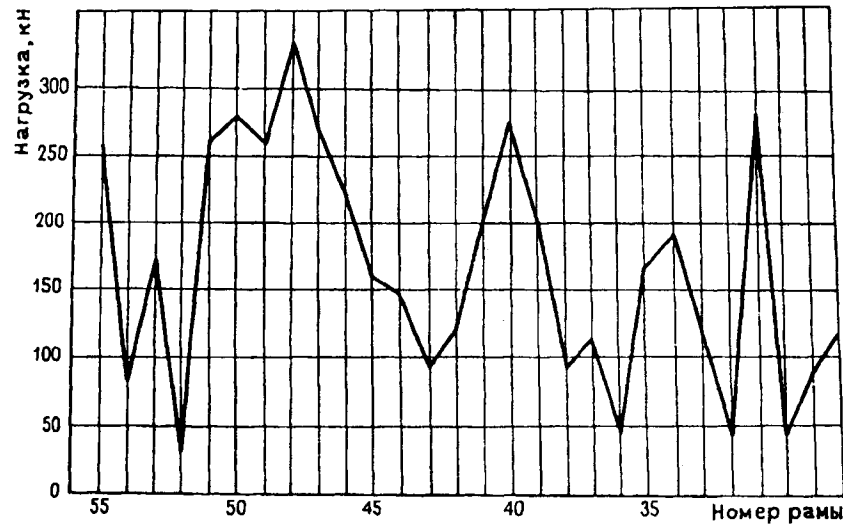


Рис. 5.5. График распределения нагрузки на рамы вдоль штрека

недостатков следует отнести некоторую потерю высоты выработки на величину возможной податливости ограничителей нагрузки, что, впрочем, окупается проведением выработки с запасом на податливость.

Недостатком деревянной расклинки является низкая надежность обеспечения контакта крепи с породным обнажением, особенно после смещения элементов крепи в узлах податливости и «обыгрывания» клина породой. В таких случаях расклинка нарушается и на крепь действует только активная нагрузка со стороны деформируемых пород (часто близкая к сосредоточенной), а пассивный отпор отсутствует. Это ведет к неблагоприятному распределению усилий в крепи и недопустимым деформациям ее элементов. Из-за больших (иногда 300 мм и более) размеров закрепных пустот забить клин не всегда представляется возможным. Поэтому, несмотря на обязательность установки расклинок, основное внимание по обеспечению контакта рамной крепи с массивом пород следует уделять способам создания предварительного распора конструкции и качественного заполнения закрепного пространства.

Одной из причин неудовлетворительной работы крепи является неравномерность распределения горного давления вдоль выработки, обусловленная нарушением и неоднородностью пород, низким качеством забутовки, различием механических характеристик отдельных рам и др. На рис. 5.5 приведен график распределения нагрузки на рамы крепи вдоль штрека [5.4]. Из рисунка следует, что нагрузки на близлежащие рамы могут отличаться в три и более раз. Такое положение во многом

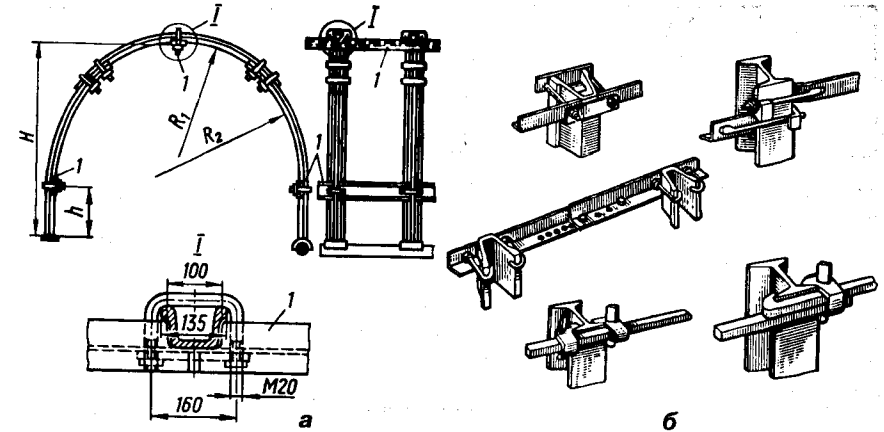


Рис. 5.6. Конструкции межрамных стяжек: а - типовые (I); б - фирм ФРГ

способствует ситуации, когда равнодействующая нагрузки, воспринимаемой одной рамой, отклоняется от центральной плоскости рамы так, что элементы крепи, наряду с обжатием продольной силой и изгибом в плоскости рамы, испытывают также кручение и изгиб из этой плоскости [3.10].

Теоретические и лабораторные исследования работы рамных крепей [5.5—5.8] указывают на существенное различие между работой плоской арки и пространственной системы рам, соединенных продольными связями. Для обеспечения совместной работы рам крепи, выравнивания нагрузки, приходящейся на отдельные арки, и снижения крутильных деформаций профиля целесообразно применение жестких конструкций межрамных связей. В работе [5.6] обоснованы параметры депланационных связей-планок, установлено, что их рациональным местоположением являются сечения, в которых моменты чистого кручения максимальны.

Современная практика крепления не в полной мере использует возможности рассматриваемого конструктивного элемента и применяет стяжки в основном для монтажных целей и удержания рам в проектом положении при ведении буровзрывных работ. Обычные конструкции стяжек (рис. 5.6) включают как обязательные элементы скобы и гайки, что повышает их стоимость и трудоемкость монтажа.

Число и место расположения продольных связей должно диктоваться отмеченными выше условиями объединения рам в пространственную конструкцию, создание которой позволяет зафиксировать крепь вдоль выработки, противостоять косонаправленным воздействиям сил горного давления из плоскости рамы, перераспределять нагрузку между рамами. Место размещения межрамных стяжек в типовых сечениях крепи (одна в вершине свода, две на прямолинейных участках стоек) нельзя считать

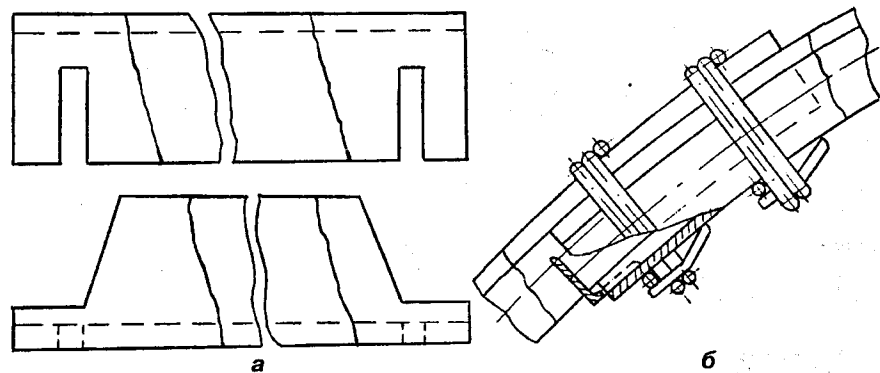


Рис. 5.7. Забивная стяжка конструкции ДГМИ:  
а — конструкция; б — месторасположение на раме

оптимальным для обеспечения ее устойчивости. Оно диктуется общепринятой и нуждающейся в изменении технологией монтажа арочной крепи (см. раздел 7), в которой стяжки играют роль удерживающих элементов стоек. В этом случае боковые стяжки устанавливаются на стойках без учета их дальнейшей работы в пространственной системе крепи, а их конструкция не позволяет воспринимать ударные нагрузки на верхняк при взрывных работах, что часто приводит к «выбиванию» рам.

Поскольку концы стоек заглублены в почву выработки и этим зафиксированы в проектном положении, то рационально разместить стяжки там, где наиболее вероятно возникновение максимальных перемещений крепи вдоль выработки под воздействием взрывных работ или косонаправленных нагрузок. Наиболее целесообразный участок — в районе узлов податливости, а в сложных условиях — дополнительно в вершине свода арки. Тем самым рамы фиксируются в пространстве наиболее жестко и на самых ответственных участках.

В ДГМИ разработана забивная стяжка (рис. 5.7), позволяющая значительно упростить такой монтаж. Стяжка выполнена из неравнобокого уголкового профиля, на концах которого методом штамповки созданы зацепы типа крюков. Достоинством конструкции является малая стоимость и отсутствие резьбовых соединений (скобы и гайки). При монтаже стяжки она забивается своими зацепами в зазор между спецпрофилями стойки и верхняка крепи, жестко фиксируя их пространственное положение. Внутренние упоры, созданные при штамповке зацепов на концах стяжки, создают распорные усилия между рамами и препятствуют их перемещению при взрывных работах в забое выработки, обеспечивая устойчивость крепи. На участках закруглений выработки следует применять раздвижные стяжки или изготавливать их различной длины. Наличие зацепа в зазоре между спецпрофилями на участке узла податливости улучшает его работу и препятствует разрыву днища спецпрофиля при воз-

никновении изгибающих моментов в узле. Демонтаж забивных стяжек предельно прост и сводится к выбиванию зацепов ударом молотка.

Следует отметить наметившуюся прогрессивную тенденцию совмещения функций удержания рам в проектном положении с межрамным ограждением. К числу таких конструкций можно отнести стальную листовую желобчатую затяжку ДГМИ (см. раздел 4). Безусловно, в промышленности должны найти широкое применение наиболее простые типы стяжек с минимальной стоимостью и трудоемкостью монтажа, обеспечивающие надежную работу рамной крепи как пространственной конструкции.

## 5.2. Заполнение закрепного пространства

Для обеспечения высокой работоспособности рамных крепей необходимо производить заполнение закрепного пространства породной мелочью (забутовкой) или специальными смесями, что способствует более равномерному распределению нагрузки на крепь при смещениях породного контура, создает условия для быстрого ввода ее в работу, сохраняет затяжку от разрушающего воздействия взрывной волны, улучшает проветривание выработки. Многочисленные обследования горных выработок [1.14, 1.22, 1.23, 5.9, 5.10 и др.] показывают, что переборы пород при проведении горных выработок буровзрывным способом достигают 20% площади сечения и более вместо допустимых по нормам 5—7%. Зазоры между породным обнажением и крепью неравномерны, имеют при падении наименьшую величину у основания стоек и наибольшую — несколько выше узлов податливости арки, достигая 50—60 см при среднестатистических значениях 20—30 см.

Технические требования по возведению крепи, предусматривающие заполнение пустот кусками породы и расклинку арки в узлах податливости, как правило, не соблюдаются. Вынужденно забутовку выполняют только с боков выработки, где она помогает удержать затяжку на крепи. Только 25—30% пустот закрепного пространства оказываются заполненными, причем устранить пустоты над верхняком практически не удастся. Такое положение обуславливает развитие смещений кровли без отпора крепи, беспрепятственный рост зоны неупругих деформаций и повышенную нагрузку на крепь [5.10—5.12]. Так, по данным [5.10], увеличение закрепных пустот в кровле от 100 до 400 мм приводит к росту смещений пород в 2 раза. Важно, чтобы плотный контакт крепи с породами был обеспечен на ранней стадии развития горного давления. Так, в условиях Западного Донбасса [5.13], там, где заполнение закрепного пространства выполнялось в забое выработки, смещения пород уменьшились почти в два раза по сравнению с участком, где заполнение велось с отставанием более 75 м от забоя, что подтверждает необходимость раннего введения крепи в работу.

При отсутствии забутовки интенсивный рост зоны разрушения пород усугубляется неблагоприятными условиями контакта между крепью и мас-



сивом [5.14]. В кровле выработки арочной формы в пределах центрального угла 60—80° возникает сосредоточенная нагрузка на верхняк; изгибающий момент здесь в 2—2,5 раза больше по сравнению с расчетным, во столько же раз снижается несущая способность крепи [5.15, 5.16].

В Германии на опытной шахте «Тремония» были проведены испытания [1.14], цель которых заключалась в определении максимальной нагрузки на арочную крепь при различных видах нагружения и степени заполнения закрепного пространства. Исследовались следующие виды нагружения:

сосредоточенная нагрузка, приложенная в своде арки (рис. 5.8, а, б, в);  
сосредоточенная нагрузка, приложенная в районе соединения стойки с верхняком (рис. 5.8, г, д, е);

равномерно распределенная нагрузка, приложенная к верхняку (рис. 5.8, ж, з, и);

равномерно распределенная нагрузка, приложенная к верхняку с дополнительной пригрузкой участка над соединением стойки с верхняком (рис. 5.8, к, л, м).

Степень заполнения закрепного пространства изменяли следующим образом:

почти без всякого заполнения (рис. 5.8, а, г, ж, к);

с заполнением закрепного пространства до половины высоты стоек крепи (рис. 5.8, б, д, з, л);

с заполнением закрепного пространства на всю высоту стоек крепи, т.е. до места их соединения с верхняком (рис. 5.8, в, е, и, м).

Полная забутовка закрепного пространства не исследовалась, так как она не встречается в практике крепления штреков. Для каждого случая нагружения на схемах рис. 5.8 указана наибольшая достигнутая нагрузка, когда в связи с увеличивающейся деформацией дальнейшее ее повышение было невозможным. В практике проектирования крепи в ФРГ допустимая расчетная нагрузка на крепь определяется обычными методами строительной механики на воздействие сосредоточенной силы при отсутствии пассивного отпора пород (наихудший из возможных вариантов загрузки) и составляет в данном случае 229 кН. Испытания показали, что при отсутствии забутовки фактическая несущая способность арочной крепи превышает расчетную в 1,2 раза, а при забутовке на высоту стоек арки — в 2,2 раза. Если же обеспечить распределенную нагрузку на верхняк, то несущая способность даже при отсутствии забутовки боков возрастает в 2,4 раза, а при ее наличии — более чем в 2,6 раза. Это еще раз подчеркивает важность создания благоприятных контактных условий при нагружении крепи со стороны массива.

Таким образом, качественное заполнение закрепного пространства должно быть неотъемлемой частью технологии применения рамных крепей. Как отмечалось ранее, практика крепления часто игнорирует это требование из-за большой трудоемкости ручной забутовки, необходимости пребывания рабочего в раскрепленной зоне. В этой связи перспектив-

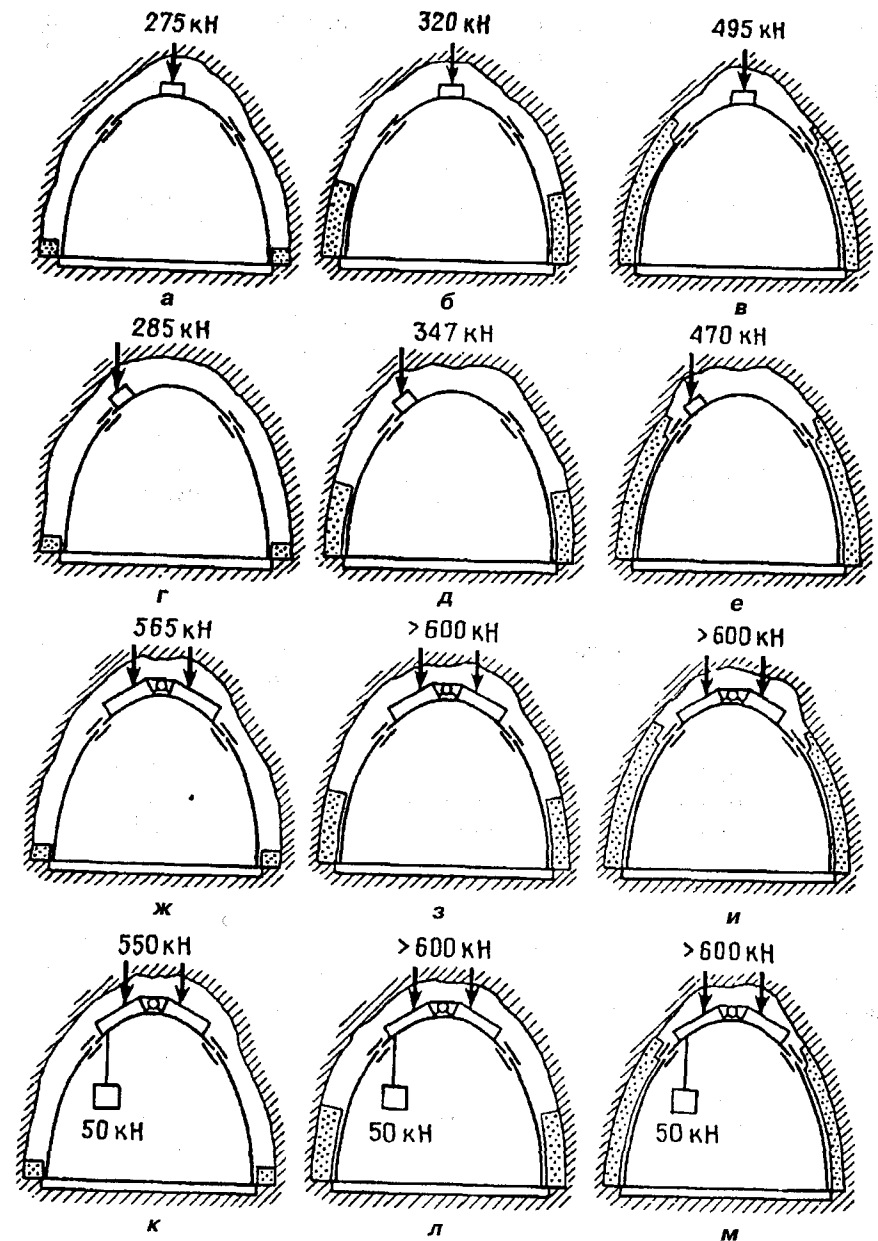


Рис. 5.8. Исследование несущей способности рам в зависимости от степени заполнения закрепного пространства

ными направлениями следует считать заполнение закрепных пустот с использованием высокотехнологичных способов приготовления и транспортирования забутовочного материала.

Широкое применение нашел гидромеханический способ, основанный на нагнетании раствороносцами цементно-песчаного раствора за крепь, который требует предварительной герметизации стыков между затяжками. Для снижения расхода цементной смеси можно применить заполнение закрепного пространства породной мелочью с последующей пропиткой ее твердеющим раствором, что, однако, существенно повышает общую трудоемкость забутовочных работ. В последнее время в отечественной и зарубежной практике находят применение твердеющие забутовочные материалы на основе местных вяжущих и отходов производств (ангидрит, гранулированные шлаки, топливные золы, фосфогипсы и др.). Они несколько дешевле цементных растворов, позволяют механизировать процесс их приготовления и транспортирования в закрепные пустоты, обеспечивают качественное их заполнение. Однако применение громоздкого оборудования отдалает производство работ как минимум на 20–30 м от забоя выработки. До начала работ успевает произойти до 50 % смещения породного контура без отпора крепи.

НИИОМШС разработан пневматический способ закладки кускового породного материала, позволяющий получить однородный забутовочный слой непосредственно в забое выработки [5.17]. Однако при механизированном заполнении пустот появляются значительные дополнительные затраты на оборудование и его обслуживание, подготовку материалов и их транспортирование. Например, на шахтах ФРГ они составляют от 600 до 1000 марок на 1 м выработки [4.14]. Поэтому широкое применение механического и пневматического заполнения закрепного пространства оправдывается в случае его одновременного использования для выкладки околострековых закладочных полос, заполнения погашаемых выработок и др. [5.18].

Представляет интерес способ заполнения закрепного пространства в забое выработки, использующий заранее изготовленные забутовочные элементы [5.19]. Сущность способа состоит в использовании эффекта увеличения в объеме полиуретановых смол, которые смешивают с сыпучими материалами (деревянная стружка, опилки, породная мелочь). Забутовочные элементы представляют собой полиэтиленовые мешки, на 1/10 наполненные сыпучим материалом, в которые перед укладкой вливается смола и отвердитель (по 1,5 л). Мешки укладываются в закрепное пространство и спустя 20 мин в результате увеличения в объеме полиуретановой смолы принимают форму закрепного пространства, заполнив собой все неровности породного контура. Применение новой технологии на шахте им. Лутугина ПО «Торезантрацит» позволило уменьшить смещение контура кровли выработки с 410 мм (при ручном заполнении пустот породной мелочью) до 130 мм. Следует отметить, что высокая стоимость

и дефицитность полиуретановых смол, повышение пожароопасности выработки сдерживают промышленное использование данного способа.

Широкое применение на шахтах ФРГ нашел способ частичного заполнения закрепного пространства рукавами «Буллфлекс» [5.20]. Этот способ предусматривает при установке в забое рам крепи укладку в углубления спецпрофиля тканевых рукавов, в которые затем под давлением нагнетают водный раствор твердеющей смеси. В результате расширения рукавов затяжки прижимаются к породному контуру выработки, а рама входит в плотный контакт с массивом пород (рис. 5.9). Для заполнения распорных рукавов применяют водные растворы мелкозернистых цементных смесей, причем при давлении нагнетания порядка 1,4 МПа вода отфильтровывается через водопроницаемую ткань распорного рукава и раствор приобретает благоприятное для затвердевания водоцементное отношение. Над затяжкой, прижимаемой к породному контуру, остаются лишь мелкие пустоты, влияние которых на работу крепи незначительно.

Степень заполнения закрепного пространства над рамой — около 70%. Крепление выработок с помощью системы «Буллфлекс» применяется, как правило, при комбайновом способе проходки, когда имеются минимальные переборы породы по периметру выработки, так как при переборах свыше 25 см эта система применяться не может.

Наиболее экономичным и перспективным авторам представляется способ взрывной забутовки закрепного пространства, впервые предложенный М.А. Навасардовым (ИГМиФ им. Цулукидзе, Грузия). Технология забутовки закрепного пространства разработана в ДонГТУ [5.21]; она предусматривает после возведения постоянной крепи бурение шпуров в приконтурный массив и его рыхление путем взрывания зарядов взрывчатого вещества. Однако, как показали промышленные испытания, заряд рыхления создает ударную волну в закрепном пространстве и значительные динамическим нагрузки на крепь, вызывающие ее деформацию. Кроме того, неизбежное при проходке выработки непостоянство размеров закрепного пространства требует непрерывной корректировки массы зарядов рыхления и поочередного их взрывания.

С целью исключения повреждений крепи и обеспечения равномерного распределения внешней нагрузки по периметру рамы в ДГМИ разработан способ, основанный на применении камуфлетных зарядов ВВ (рис. 5.10).

Способ состоит в следующем [5.22]. При проведении горной выработки шпур 1 по забое 2 бурят с таким расчетом, чтобы обеспечить сооружение выработки сечением в проходке 3, увеличенным по сравнению с сечением

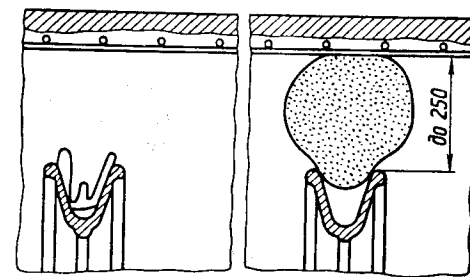


Рис. 5.9. Заполнение закрепного пространства с использованием системы «Буллфлекс»

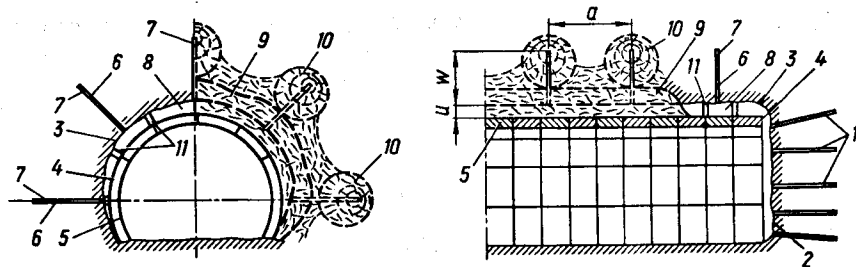


Рис. 5.10. Способ взрывозабутовки закрепного пространства

ем вчерне 4 на величину  $U$ , пропорциональную ожидаемым смещениям породного контура  $U_0$ , которые определяют по известным расчетным методам. Требуемый размер закрепного пространства определяется по формуле

$$U = k_u U_0 (1 - U_0 / R) + U_t, \quad (5.2)$$

где  $k_u$  — коэффициент, учитывающий конструктивную и технологическую податливость крепи ( $0 \leq k_u \leq 1$ );  $U_0$  — ожидаемые смещения породного контура, м;  $R$  — радиус породного контура выработки вчерне, м;  $U_t$  — гарантированный безопасный зазор между крепью и породой, м.

Если конструктивная податливость  $U_k$  крепи равна или превышает ожидаемые смещения породного контура выработки (определяют по известным расчетным методам или на основании накопленных опытно-экспериментальных данных), то коэффициент  $k_u$  принимают равным 0, в случае создания жесткой крепи, без конструктивной податливости  $U_k$ , коэффициент принимают равным 1; в промежуточных случаях этот коэффициент определяют по формуле

$$k_u = (U_0 - U_k) / (U_0 + U_k). \quad (5.3)$$

Гарантированный безопасный зазор  $U_t$  между крепью и породой обеспечивает надежную устойчивость крепи при взрывании камуфлетных зарядов. Он определяется по данным практики для каждого вида крепи и находится в пределах 50—100 мм. После возведения крепи бурят в вертикальной плоскости веер шпуров  $b$  и взрывают в них камуфлетные заряды ВВ 7 попарно-симметрично и последовательно снизу вверх, заполняя пустоты закрепного пространства 8 за счет откольных явлений во внешней зоне дробления 9 камуфлетных зарядов 7, для чего длину шпуров  $b$  определяют по формуле

$$l_{ш} = k_q (q / R_p)^{1/3}, \quad (5.4)$$

где  $k_q$  — коэффициент, учитывающий свойства пород и радиус внутренней зоны дробления 10, ( $k_q = 3...5$ );  $q$  — масса камуфлетного заряда 7, кг;  $R_p$  — прочность породы на одноосное растяжение, МПа.

Такое взрывание зарядов 7 обеспечивает равномерное обжатие снизу вверх внешнего контура крепи 5 разрушенной породой, что способствует постепенному повышению устойчивости крепи и увеличивает ее способность воспринять нагрузку со стороны пород на самом неблагоприятном этапе создания забутовки — при взрывании заряда в вертикальном шпуре, когда появляется опасность резкой посадки и деформации крепи, если она заблаговременно не окружена податливой взрывной забутовкой с боков выработки.

Если сооружают выработку арочной формы, то в каждом веере бурят от 3 до 5 шпуров, из которых один ориентируют по вертикальной оси симметрии выработки, два направляют симметрично вверх под углом  $45^\circ$ , а два остальных бурят горизонтально в бока выработки. Расклинку 11 (например, из дерева) располагают между устьями шпуров  $b$ , а расстояние между веерами шпуров  $b$  определяют по формуле

$$a = W / \sin(\pi / 4), \quad (5.5)$$

где  $W$  — линия наименьшего сопротивления, м.

Бурение и взрывание меньшего числа камуфлетных зарядов вокруг выработки не обеспечит достаточно равномерной и плотной забутовки закрепного пространства, что снизит ее эффективность. Большое число камуфлетных зарядов нецелесообразно, поскольку ввиду взаимодействия зарядов, произойдет выход внутренней зоны дробления на поверхность породного контура вокруг выработки и взрывание тем самым станет не камуфлетным, а типа рыхления. Это приведет к переуплотнению забутовки, снижению ее способности выполнять роль податливого слоя, усилит динамические нагрузки на рамную крепь и к возможному разрушению затяжки.

Исходя из рассмотренных видов заполнения закрепных пустот, можно рекомендовать следующие перспективные направления в их совершенствовании:

переход к «гладкостенным» способам ведения взрывных работ (контурному взрыванию) при проведении выработки с возможно более точным соблюдением размеров ее проектного контура;

заполнение пустот твердеющими смесями на основе местных вяжущих;

применение взрывной забутовки закрепного пространства как податливого породного элемента, обеспечивающего распор крепи за счет своего разрыхления после взрыва;

комбинирование этих методов с созданием породонесущих оболочек (например, взрывозабутовка с последующим тампонажем закрепного пространства и др.).

### 5.3. Предварительный распор рамных крепей

Важным условием обеспечения устойчивости пород вокруг выработки является быстрый ввод крепи в работу. Достичь этого качественным заполнением закрепного пространства в забое выработки, как было показано выше, весьма затруднительно. Поэтому отпорные свойства крепи при традиционной технологии ее монтажа не используются в первоначальный, наиболее ответственный период развития горного давления. В этой связи перспективными представляются способы монтажа рамных крепей с применением предварительного распора конструкции.

На шахтах Франции использовалась жесткая стальная арка, основанием стоек которой служили гидродомкраты (рис. 5.11). Их распор при монтаже крепи обеспечивал быстрый ввод ее в работу, а «проседание» выдвижных стоек домкратов под действием сил горного давления выполняло роль конструктивной податливости при фиксированном отпоре [5.23]. Установка на каждой раме двух стационарных гидростоек из-за неэкономичности такой крепи не получила широкого применения. Этот недостаток следует отнести и к применяемым на шахтах ФРГ гидравлическим подставкам, монтируемым у основания арок [5.9].

В МГГУ исследовано влияние принудительного («активного») распора на массив разрушенных пород [5.24]. Активный распор создавали гидростойками, установленными на почву выработки под верхняк крепи, при этом коэффициент расширения пород при их разрушении удалось снизить на 50—70%. Результаты экспериментов по распору крепи доказали возможность заметного снижения размеров зоны разрушения пород в глубь массива и конвергенции их в выработку. Однако стационарно установленные гидростойки загромождают сечение выработки, требуют повышенных затрат на ее поддержание, поэтому используются обычно как крепь усиления подготовительной выработки в зоне временного опорного давления впереди лавы.

В ДонГТУ предложен способ крепления подготовительных выработок (рис. 5.12) рамной податливой крепью с предварительным распором [5.25]. Распорное устройство 1 (например, стойка ГС с удлиняющими насадками) устанавливаются одним концом на почву выработки посередине ее пролета, другим упирают в верхняк и, ослабляя крепление 2 в узлах крепи,

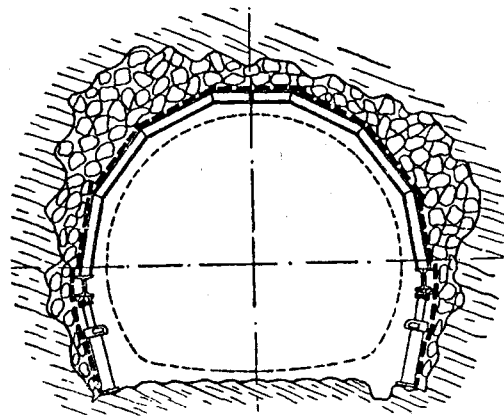


Рис. 5.11. Жесткая стальная арка на распорных стойках

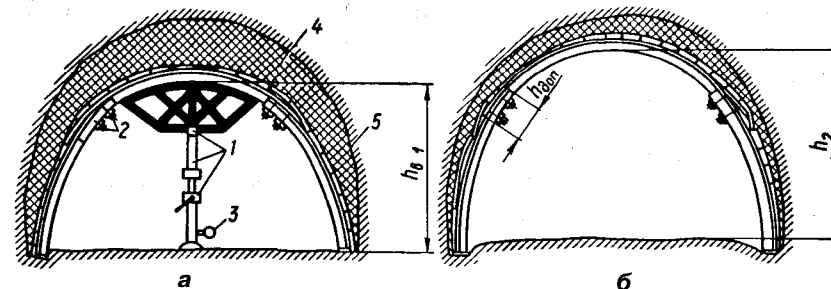


Рис. 5.12. Установка арочной крепи с предварительным распором: а — крепь в процессе распора; б — после распора ( $h_2 > h_1$ )

распирают стойку между верхняком и почвой, контролируя по манометру 3 нагрузку, которую доводят до несущей способности крепи в податливом режиме. При этом нахлестка сопряженных элементов рамы должна быть не менее допустимой  $h_{доп}$ . Распор крепи фиксируют путем затягивания узлов податливости, после чего стойки ГС убирают. В результате распора рамы устраняется зазор между крепью и породным контуром, уплотняется забутовка закрепного пространства 4, достигается равномерный контакт крепи с контуром 5 выработки. Предварительный распор препятствует свободному сдвигению пород в выработку, ограничивает зону разрушения вмещающих пород. Благодаря демонтажу гидростойки удается обеспечить эффективный ввод крепи в работу без повышения материалоемкости и стоимости конструкции, не загромождая сечения выработки. Как показали исследования [5.26], при проведении выработки с применением взрывных работ, предварительный распор крепи следует создавать на расстоянии примерно 6—8 м от забоя. В противном случае упругие колебания массива и воздействие взрывной волны при взрыве зарядов будут снижать эффективность распора рамы. При комбайновой проходке выработки распор крепи лучше выполнять непосредственно в забое проводимой выработки. На расстоянии более 10—12 м от забоя возводить крепь с распором менее эффективно, поскольку на этом расстоянии уже происходит интенсивное формирование зоны первичного разрушения пород вокруг выработки.

Недостатком рассмотренного способа является то, что элементы стоек рамы не участвуют в процессе создания распора и не несут нагрузки. По этой причине после демонтажа гидравлической стойки усилие распора в крепи полностью не сохраняется. Таким образом, данный способ хотя и обеспечивает более ранний ввод крепи в работу, но не позволяет использовать создаваемый распором эффект обжатия пород кровли, так как его величина значительно снижается.

В ДГМИ разработан способ распора рамной податливой крепи, в котором силовое устройство скреплено с опорным и выдвижным элемента-

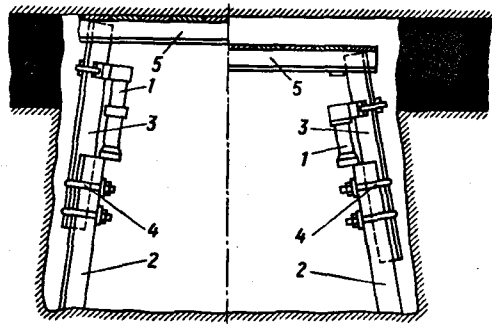


Рис. 5.13. Способ предварительного распора, предложенный ДГМИ

с собой (рис. 5.14) гидростойку 1, к которой приварен отрезок спецпрофиля 2 с планкой. Соединение с выдвигной частью стойки производится с помощью укороченной скобы 3. С нижней частью стойки распорное устройство соединено с помощью зацепа 4. После установки обеих гидростоек узлы податливости 4 на раме (см. рис. 5.13) ослабляют и производят силовую раздвижку элементов 2 и 3 между почвой и кровлей выработки, выбирая зазор  $\Delta h$  в закрепном пространстве и создавая распор верхняка 1 в кровлю. При этом нижние элементы 2 стоек оказываются вдавленными в почву выработки. Распор фиксируют, затягивая крепление узлов податливости 4, после чего демонтируют распорные устройства 1 и переносят их на следующую раму, где операции повторяют.

При осуществлении способа в забое выработки происходит обжатие и уплотнение забутовки в закрепном пространстве, ограничивается расслоение пород кровли и затрудняется их смещение в выработку. Дополнительным преимуществом предварительного распора крепи следует считать возникающий эффект расклинивания крепи в породе, чем исключается «выбивание» призабойных рам при ведении взрывных работ. В выработках с уже образовавшейся зоной неупругих деформаций этим способом можно сжать нарушенный участок массива и сомкнуть часть трещин расслоения, обеспечивая эффект поднятия кровли и восстановление запаса на осадку крепи.

Опытно-промышленная проверка разработанной технологии была проведена на шахте «Перевальская» ГХК «Луганскуголь» в подготови-

ми рамы [5.27]. На рис. 5.13 показан один из возможных вариантов осуществления способа при креплении выработки трапециевидной податливой крепью. При монтаже рамы заранее задают запас нахлестки соединяемых элементов стойки 2 и 3 не менее величины зазора  $\Delta h$  между верхняком 5 и кровлей выработки. Распор рамы осуществляют на обеих стойках с помощью распорных устройств 1. Последние представляют

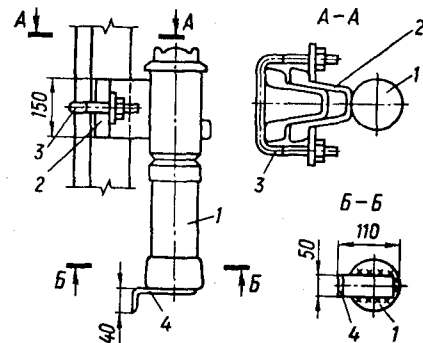


Рис. 5.14. Конструкция распорного устройства

тельной выработке, которая была подработана лавой по вышележащему сближенному пласту. В выработке произошли смещения пород кровли за счет их разрушения и расслоения. Распор крепи с усилием около 70 кН на стойку снизил конвергенцию в 1-4 раза по сравнению с контрольными участками в той же выработке. Шахтные наблюдения посредством электроемкостной интроскопии массива зафиксировали снижение трещинной пустотности в 2,3-4,5 раза. Таким образом, в сложных горно-геологических условиях было обеспечено безремонтное поддержание выработки.

Как показали исследования [5.28], распределение усилий от распора над прямолинейным верхняком отличается большой неравномерностью: над распорными стойками происходит их чрезмерная концентрация, а на большей части пролета верхняка формируется область их пониженных значений. Для повышения усилий распора в центре пролета верхняка его следует изготавливать с ригирующими консолями по краям. Самым эффективным способом выравнивания усилий на кровлю следует считать дополнительное применение распорной стойки в центре пролета или установку на этот участок анкерного крепления.

Что касается настройки узлов податливости на предельное усилие срабатывания в крепи с начальным распором, то следует по-прежнему руководствоваться правилом обеспечения работоспособности самого слабого элемента рамы — верхняка. При чрезмерном затягивании узлов податливости в стремлении удержать как можно большее усилие распора возникает опасность преждевременной деформации верхняка до начала податливости.

Благодаря введению начальных усилий, позволяющих более выгодно, чем в ненапряженной системе, распределить материал и практически исключить недонапряженные элементы, конструкция может быть спроектирована как система наименьшей массы или стоимости.

Проф. Трофимович В. В.

## 6. Управление усилиями в рамной крепи

### 6.1. Закономерности распределения нагрузки на крепь

Опыт применения рамных крепей свидетельствует, что даже при использовании эффективных средств обеспечения контактного взаимодействия крепи с массивом (тампонаж закрепного пространства, рукава «Буллфлекс», предварительный распор и др.) обеспечить равномерно распределенную нагрузку на крепь не удастся из-за различия смещений пород по контуру выработки. Это приводит к возникновению неравномерных усилий в элементах рамы по ее периметру [6.1].

В процессе развития горного давления в выработке породное обнажение, смещаясь, как правило, по нормали к напластованию, начинает контактировать через забутовку и затяжку с ближайшим участком рамы. Поэтому на первом этапе нагрузка на крепь формируется лишь на достаточно узком ее отрезке. Затем, по мере сжатия забутовки и прогиба верхняка, этот участок контакта заметно расширяется. На части периметра рамы, которая смещается в сторону массива, контактируя с породным обнажением, возникает пассивный отпор пород.

Участок крепи (рис. 6.1), подверженный активному нагружению и смещающийся внутрь выработки, называют зоной «отлипания», а его размер зависит от свойств пород, забутовки закрепного пространства и деформационных показателей верхняка рамы. За меру контакта может быть принят угол  $\beta$  ( $-\pi/4 < \beta < \pi/4$ ), показывающий угловую координату двух его границ (в радианах) от нормали из центра выработки к напластованию пород в кровле:

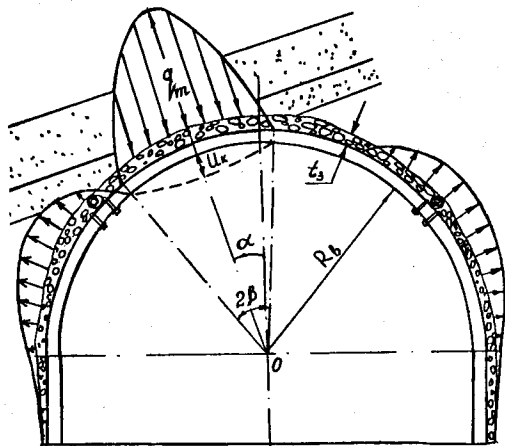


Рис. 6.1. Формирование нагрузки на раму крепи

$$\beta = 0,5 \ln \left( \frac{U_0 + U_k + U_s}{R_0} \right), \quad (6.1)$$

где  $U_0$  — деформации смятия пород на участке контакта с крепью, м;  $U_k$  — прогиб верхняка под нагрузкой, м;  $U_s$  — податливость забутовки на участке контакта «рама — кровля», м;  $R_0$  — радиус верхняка крепи, м.

Деформация смятия пород  $U_0$  на участке контакта с верхняком зависит от их прочности, показателя деформативности и пластичности, степени развития трещин разрыва сплошности (расслоения) вдоль напластования пород, что особенно характерно для коэффициента разрыхления. Чем больше прочность и жесткость породы, тем меньше влияние этого показателя на деформацию смятия  $U_0$ . Коэффициент разрыхления пород при их сжатии в выработку изменяется в зависимости от напряжений, действующих в породе, и на последних стадиях ее разрушения — от реакции (отпора) крепи. Если крепь работает в режиме линейно возрастающего сопротивления, то трещины расслоения, концентрация которых максимальна у контура по нормали к напластованию пород, начинают смыкаться, создавая эффект смятия и снижения коэффициента разрыхления. При этом происходит уменьшение прогиба пород в выработку по нормали к напластованию и снижение неравномерности нагружения крепи. Хотя на практике реальные крепи отклоняются от строгого режима линейно возрастающего сопротивления, тем не менее можно считать, что при исчерпании податливости и переходе к жесткому режиму такой эффект еще более проявляется.

Взаимодействие податливой крепи с массивом в режиме заданного нагружения, когда коэффициент жесткости равен или близок к нулю, отличается более плавным изменением параметров разрыхления пород окружающего массива. Если режим работы крепи характеризуется падающим (запредельным) участком, т. е. когда ее отпор при смещениях начинает снижаться (коэффициент жесткости конструкции отрицательный), следует ожидать резкого увеличения раскрытия трещин, повышения коэффициента разрыхления и, соответственно, неравномерности нагрузки на крепь. Учитывая, что в реальных конструкциях податливой крепи при работе угол податливости ее отпор изменяется скачками, можно предположить примерно такой же характер изменения трещиноватости пород в массиве во времени. Шахтные инструментальные наблюдения подтверждают периодическое (скачкообразное) изменение раскрытия трещин в процессе взаимодействия крепи с массивом.

Прогиб  $U_k$  верхняка крепи можно учесть расчетными методами строительной механики, рассматривая его как элемент рамы под действием активной нагрузки на участке контакта  $2\beta$ . При этом следует принять во внимание кинематические ограничения на смещения крепи на участках периметра, где обеспечен контакт с породным контуром и возникает пассивный отпор пород. Естественно, такая постановка задачи приводит к необходимости учета нелинейного характера взаимодействия крепи

и массива, однако при наличии современных ЭВМ она не представляет особой сложности. Основное затруднение при этом — определение исходных показателей по оценке плотности и отпорных характеристик забутовки закрепного пространства.

Главную количественную характеристику забутовки — ее податливость  $U_3$  — можно найти по формуле

$$U_3 = t_3 \varepsilon_0 [q(\xi) / \sigma_0]^n, \quad (6.2)$$

где  $t_3$  — толщина слоя забутовки над верхняком, м;  $\varepsilon_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $n$  — параметры компрессионной характеристики забутовки, которые определяют по результатам испытаний в зависимости от типа слагающих пород и фракционного состава забутовочного материала;  $q(\xi) > 0$  — давление пород на забутовку, кПа;  $\xi$  — угол, отсчитываемый от нормали к напластованию пород ( $-\beta \leq \xi \leq \beta$ ), рад.

Если крепь работает в податливом режиме, то распределение нагрузки на участке контакта «крепь — массив» описывается степенной зависимостью

$$q(\xi) = q_m [1 - (\xi / \beta)^m], \quad (6.3)$$

где  $q_m$  — математическое ожидание максимума нагрузки в центре участка контакта, кПа;  $m$  — параметр, характеризующий степень распределительной способности забутовки и разрушенных пород в кровле: для сыпучих пород  $m = 0$  (равномерно распределенная нагрузка), для монолитных пород  $m \rightarrow \infty$  (сосредоточенная нагрузка), для обычных условий  $m = 1, 5 \dots 3$ .

Значение максимума нагрузки

$$q_m = P_n / \beta R_n [1 - \beta^m / (m + 1)], \quad (6.4)$$

где  $P_n$  — среднее сопротивление замка податливости крепи в направлении нормали к напластованию на единицу длины выработки, кН/м.

Таким образом, для реальных условий взаимодействия крепи с массивом характерна важная закономерность, которая состоит в том, что формирующаяся нагрузка на крепь является неравномерной, концентрируется по нормали к напластованию пород и зависит от степени их расслоения, компрессионных параметров забутовки закрепного пространства и деформационно-силовой характеристики крепи. Существующие рамные крепи предусматривают использование одного и того же спецпрофиля по всему периметру, что противоречит условиям нагружения рамы, создающим различия в распределении усилий на разных участках крепи. Вследствие этого участок крепи, ограниченный пределами действия активной нагрузки, оказывается перегруженным, деформируется и приводит к разрушению всей конструкции, тогда как остальные участки сохраняют невостребованный запас прочности. Отсюда следует вывод о неэффективном использовании материала в рамных конструкциях.

Создавшееся положение можно было объяснить и оправдать на ранних этапах развития горной технологии, когда закономерности формирования нагрузки на крепь были неизвестны и разработчики стремились обеспечить работоспособность конструкции при любом случайном ее нагружении путем равномерного распределения материала по всему периметру. В настоящее время с высокой степенью достоверности установлены основные закономерности взаимодействия системы «крепь — массив», которые подтверждены практикой эксплуатации рамных крепей в разнообразных горнотехнических условиях и позволяют оптимизировать их конструкцию.

## 6.2. Предварительное напряжение рамных конструкций

Из (6.1) следует, что участок крепи, ограниченный углом  $2\beta$ , является самым нагруженным и опасным, поэтому его следует усиливать, уходя от практики использования в крепи элементов одинаковой прочности. Основопологающий принцип оптимального проектирования конструкций заключается в обеспечении равного запаса прочности для всех ее составных частей и элементов при действии заданного закона распределения внешней нагрузки.

Одним из наиболее эффективных средств оптимизации конструкции следует считать создание в ней предварительных напряжений, обратных по знаку напряжениям, возникающим от эксплуатационных нагрузок. Таким образом, предварительное напряжение частично или полностью компенсирует действующие эксплуатационные усилия и неравномерности нагружения конструкции. В ДГМИ разработан ряд конструктивно-технологических решений, реализующих это направление в проектировании крепи.

В условиях преобладающих нагрузок со стороны кровли положительно зарекомендовал себя способ усиления арки канатной стяжкой из стальных (отработанных) канатов, закрепленных по концам верхняка с помощью серийно выпускаемых метизов [6.2]. Стяжка 1 (рис. 6.2) состоит из двух канатных ветвей, закрепленных с помощью скоб 2 по обе стороны верхняка крепи, распорки 3 и зажимного устройства 4. Необходимое натяжение в стяжке создается гидродомкратом и поддерживается распоркой, в результате чего формируется предварительное напряжение верхняка и улучшаются условия его работы. Стяжка нагружена постоянным усилием, заданным ей в процессе натяжения, так как в случае его превышения ветви стяжки проскальзывают в зажимном устройстве, что предотвращает ее разрыв. К недостаткам конструкции следует отнести некоторое загромождение стяжкой сечения выработки, сложность создания натяжения гидродомкратом, недостаточно эффективное повышение несущей способности крепи из-за возможного падения натяжения в стяжке в процессе ее эксплуатации.

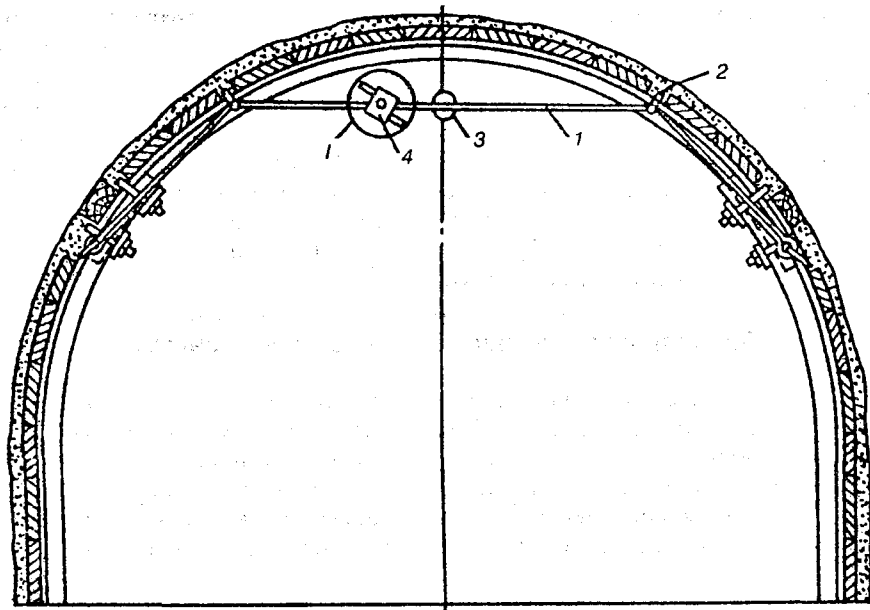


Рис. 6.2. Преднапрягающая стяжка стальной арочной крепи

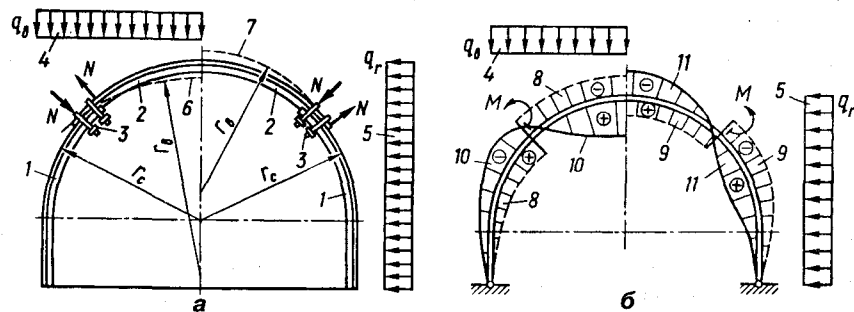


Рис. 6.3. Способ предварительного напряжения путем «заневоливания» элементов в узлах:  
а — процесс создания преднапрягающих моментов; б — их распределение по периметру рамы

В целях повышения эффективности и упрощения предварительного напряжения крепи разработан способ, основанный на создании преднапрягающих моментов в крепи при монтаже соединительных узлов [6.3]. Для этого стойки 1 (рис. 6.3, а) и верхняк 2 (или входящие в нахлестку их участки) изготавливают с разными радиусами кривизны и при закреплении верхняка на стойках эту разницу выбирают в процессе натяжения со-

единительных узлов 3 (производят «заневоливание»). Последние выполняют тем самым функции натягающего устройства. Чтобы обеспечить достижение поставленной цели управления усилиями в крепи, требуемый радиус кривизны верхняка определяют по формуле

$$R_v = R_c \left[ 1 + K_M MR_c / (EI) \right]^{-1}, \quad (6.5)$$

где  $R_v$ ,  $R_c$  — радиусы кривизны соответственно верхняка и стойки, м;  $M$  — момент предварительного напряжения, Н·м;  $K_M$  — коэффициент перераспределения разгружающего момента между верхняком и стойкой;  $E$  — модуль упругости материала крепи, Па;  $I$  — момент инерции профиля, м<sup>4</sup>.

Знак «-» в формуле используют для случая нагружения крепи преобладающей нагрузкой с кровли, а знак «+» — с боков выработки.

Эпюры разгружающих моментов, которые создают предварительное напряжение, показаны штриховой линией на рис. 6.3, б. Для случая преобладающей вертикальной нагрузки 4 имеем распределение по закону 8, а для боковой нагрузки 5 — по линии 9. В обоих случаях эпюры разгружающих моментов претерпевают скачок на величину  $M$  в районе соединительных узлов 3. Таким образом, стойки 1 и верхняк 2 подвержены действию разгружающих моментов разных знаков. В процессе взаимодействия крепи с массивом пород возникает грузовые (показаны сплошной линией) изгибающие моменты: от вертикальной нагрузки — эпюра 10, а от горизонтальной — эпюра 11. При этом грузовые моменты частично компенсируются разгружающими моментами от преднапряжения, что позволяет значительно (на 30–40%) увеличить грузонесущую способность крепи без дополнительного расхода спецпрофиля.

«Слабым местом» данного способа является напрягающая скоба узла податливости, на которую дополнительно действуют преднапрягающие нагрузки. Придание элементам крепи строго заданных радиусов кривизны требует изменения параметров изгиба профилей и соответствующей оснастки.

Как ранее отмечалось (см. раздел 3.4), основной причиной, сдерживающей эффективное использование стальных трапецевидных крепей, является низкая несущая способность верхняка, приводящая к его деформации даже при действии невысоких нагрузок. Для уменьшения действующих моментов в прямолинейном верхняке было предложено выполнять его с разгружающими консолями, которые создают постоянные разгружающие моменты в его пролетной части [6.4]. Этот способ, широко известный в строительной практике, требует увеличения ширины выработки в кровле. Установка стоек со смещением внутрь выработки на длину консоли приводит к загромождению сечения. Кроме того, разгружающие моменты прямо пропорционально зависят от длины консолей, что конструктивно ограничивает возможности разгрузки.

В ДГМИ разработан способ усиления верхняка [6.5], предусматривающий создание в нем предварительного напряжения, противо-



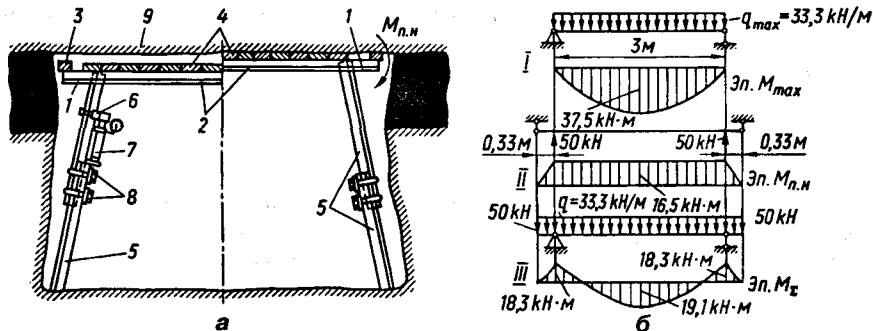


Рис. 6.4. Создание предварительного напряжения в верхняке трапециевидной крепи: а — конструктивно-технологическое решение; б — эпюры изгибающих моментов

положного по знаку напряжениям от нагрузки, путем передачи усилий от распора рамы на концы разгружающих консолей 1 (рис. 6.4, а). Для этого верхняк необходимо увеличить на длину консолей, сохраняя проектное положение стоек и площадь поперечного сечения выработки. На концах консолей 1 устанавливают опоры 3, которые несколько превышают толщину затяжки 4. Распор рамы создают при помощи гидродомкратов 7 с дальнейшей фиксацией его податливыми узлами 8 (подробнее см. раздел 5.3), что позволяет устранить монтажный зазор между затяжкой и породой над верхняком. При этом консоли 1 через опоры 3 входят в контакт с породным обнажением 9, воспринимают часть нагрузки от распора и создают предварительное напряжение в верхняке.

Оптимальную длину консолей и значения преднапрягающих усилий (давление домкратов) принимали из условия равенства изгибающих моментов в консоли и центре верхняка. На рис. 6.4, б показаны схема нагружения и эпюры изгибающих моментов от предельной для СВП-22 равномерно распределенной нагрузки  $q = 33,3$  кН/м для обычной крепи (I), для преднапряженной — без внешней нагрузки (II) и под действием внешней нагрузки (III). За счет управления усилиями было достигнуто снижение результирующего момента с 37,5 кН·м до 19,1 кН·м, т. е. почти в 2 раза. Дальнейшее увеличение размеров консолей и сил распора ограничено возрастанием моментов на опорах верхняка под стойками, поэтому следует усилить эти участки отрезками из спецпрофиля, что может еще более повысить несущую способность конструкции. Для эффективной работы крепи следует обеспечить повышенное сопротивление узлов податливости на стойках. Разработанные конструктивно-технологические решения достаточно универсальны и могут быть применены практически в любой конструкции стальной трапециевидной крепи. Увеличение массы крепи (за счет консолей) не превышает 8—10%, а трудоемкость распора рамы составляет всего 0,5 чел.-ч. При этом верхняк сможет вос-

принимать нагрузку почти удвоенной интенсивности, что обеспечит опор рамы в податливом режиме порядка 200 кН без образования пластических шарниров в верхняке.

Исследованиями [6.1, 6.6, 6.7] выявлены существенные различия в запасе прочности на различных участках периметра рамной крепи, что свидетельствует о ее неравнопрочности. Следовательно, грузонесущая способность крепи predetermined работоспособностью лишь одного, наиболее нагруженного, участка, что связано с нерациональным использованием материала крепи.

С целью снижения материалоемкости крепи в ДГМИ разработана стальная арочная усиленная крепь, равнопрочность которой повышается целенаправленным изменением напряженного состояния и жесткости наиболее нагруженного участка путем установки элемента усиления и создания предварительного напряжения арки [6.8]. Крепь представляет собой обычную арку (типа КМП-А3), верхняк которой усилен на наиболее опасном участке (рис. 6.5), размер и место расположения которого можно определить по формуле (6.1). Усиленный верхняк состоит из серийного верхняка 2 и элемента усиления 4, представляющего собой отрезок спецпрофиля того же радиуса кривизны, что и верхняк. Элемент 4 сочленен с верхняком 2 соединительными скобами 5 и двумя стальными вкладышами 9, установленными между днищами спецпрофилями. Вкладыши 9 разделяют элемент усиления на три равные части. В качестве податливых соединений рекомендуются замки типа ЗПК, позволяющие в 1,5 раза увеличить нагрузки на крепь. После монтажа арки и ее расклинки элемент усиления прикрепляют к верхняку скобами, затем производят предварительное напряжение крепи — динамометрическим ключом затягивают гайки на скобах усиливающего элемента. Возможно использование пружинных шайб 8, проложенных между планками и натяжными гайками. В этом случае затяжку гаек производят до полного сжатия пружинных шайб, отгитарированных на усилие

$$N = 3WR / L, \quad (6.6)$$

где  $N$  — предельное усилие натяжения скоб элемента усиления, кН;  $W$  — осевой момент сопротивления сечения верхняка, м<sup>3</sup>;  $R$  — расчетное сопротивление материала верхняка на изгиб, Па;  $L$  — длина элемента усиления, м.

Аналитические исследования параметров арочной усиленной крепи [6.9] проведены с учетом наиболее неблагоприятной расчетной схемы, когда нагрузка приложена к арке в виде сосредоточенной силы, в частности, в центре ее пролета. В расчетной схеме (рис. 6.6) приняты следующие обозначения:  $P$  — сосредоточенная сила, Н;  $M$  — момент предварительного напряжения, Н·м;  $EI$  — изгибная жесткость участка крепи, Н·м<sup>2</sup>;  $X_1$  — лишняя неизвестная основной системы, Н;  $Y_1, Y_2$  — реакции в опорах арки, Н;  $r$  — радиус крепи, м;  $h$  — длина прямолинейного участка стойки, м;  $c$  — половина центрального угла элемента усиления.

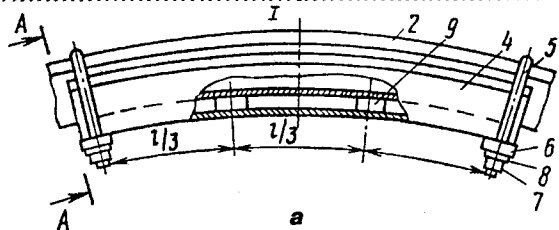
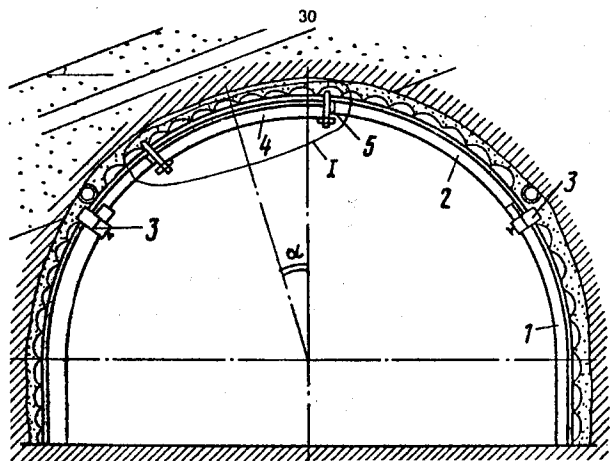


Рис. 6.5. Арочная усиленная крепь:  
 а — конструкция; б — приемочные испытания в условиях шахты им. 50-летия СССР ПО «Краснодонголь»



б

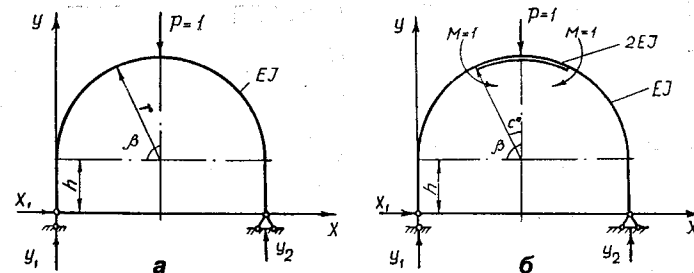


Рис. 6.6. Основная система для расчета сравнимых вариантов:  
 а — обычная крепь; б — усиленная предварительно напряженная крепь

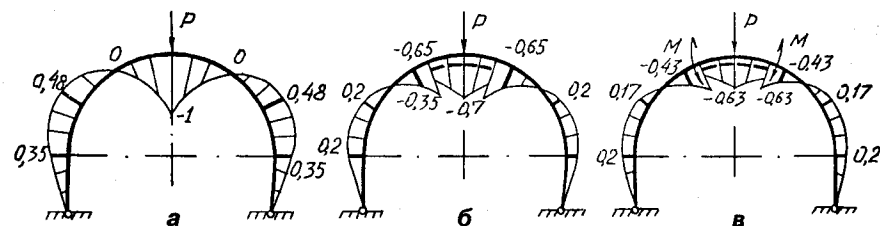


Рис. 6.7. Относительные напряжения в арочной крепи:  
 а — обычная крепь; б — усиленная; в — усиленная и предварительно напряженная

Таким образом, основными параметрами расчетной схемы являются центральный угол элемента усиления (предопределяющий его длину), изгибная жесткость  $EI$  и момент предварительно напряжения  $M$ .

Принято, что совместная работа верхняка и элемента усиления происходит без трения и передачи касательных напряжений на контакте профилей (что идет в запас прочности), поэтому изгибная жесткость на участке усиления не менее, чем в 2 раза превышает жесткость крепи. Исследовались напряжения и деформации в обычной, усиленной и предварительно напряженной крепи, основные эпюры которых представлены на рис. 6.7.

Оптимальное значение напрягающего момента зависит от размера элемента усиления, причем критерием оптимальности принято равенство напряжений в центре и на концах усиленного участка, что обеспечивает равнопрочность крепи в ее наиболее напряженных сечениях. Оптимальный момент предварительно напряжения можно определить по формуле

$$M = \frac{2M_{рк} - M_{рц}}{2M_{мц} - 2M_{мк} + 1}, \quad (6.7)$$

где  $M_{рц}$ ,  $M_{рк}$  — соответственно изгибающие моменты от силы  $P = 1$  в центре и на концах элемента усиления;  $M_{мц}$ ,  $M_{мк}$  — изгибающие моменты от предварительно напрягающего момента  $M = 1$  в центре и на концах элемента усиления.

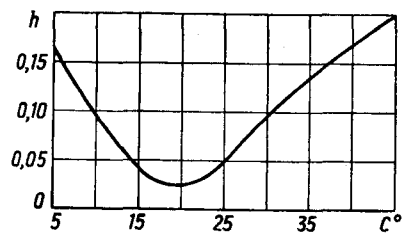


Рис. 6.8. Оптимальные моменты преднапряжения в зависимости от размеров элемента усиления

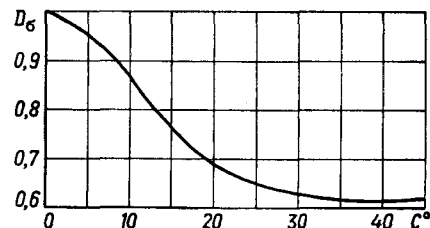


Рис. 6.9. Значения силового критерия при оптимальных моментах преднапряжения

Оптимальный момент преднапряжения  $M$  в зависимости от значения  $c$  (половины центрального угла элемента усиления) можно определить из расчетного графика (рис. 6.8).

Для суждения об эффективности усиления был принят силовой критерий усиления, показывающий относительное изменение напряжений в отдельно взятой точке усиленной крепи по сравнению с обычной:

$$D_{\sigma} = \sigma_{(i)yc} / \sigma_{max}, \quad (6.8)$$

где  $\sigma_{(i)yc}$  — напряжения в  $i$ -й точке усиленной крепи;  $\sigma_{max}$  — максимальные напряжения в обычной крепи.

Значения силового критерия при оптимальных моментах преднапряжения в зависимости от размера элемента усиления показаны на рис. 6.9. Как видно из графика, наибольшее увеличение несущей способности крепи обеспечивают элементы усиления при  $c = 25...45^{\circ}$ , когда  $P_{yc} = (1,54...1,61)P_{об}$  ( $P_{yc}$ ,  $P_{об}$  — соответственно несущая способность усиленной и обычной крепи).

Однако увеличение размера элемента усиления ведет к повышению расхода стального проката (приблизительно 4% на каждые  $10^{\circ}$  центрального угла  $2c$ ). Для определения оптимального размера элемента усиления с учетом массы усиливающей конструкции был введен весовой критерий  $D_m$ , показывающий, во сколько раз масса усиленной крепи больше массы обычной:

$$D_m = 1 + m_{э.у} / m_{кр}, \quad (6.9)$$

где  $m_{э.у}$ ,  $m_{кр}$  — массы элемента усиления и крепи соответственно.

За эффективность усиления  $\mathcal{E}_y$  принимаем отношение удельной несущей способности  $P_{yc}$  к весовому критерию  $D_m$  усиленной крепи:

$$\mathcal{E}_y = P_{yc} / D_m = D_m D_{\sigma}. \quad (6.10)$$

Изменение эффективности усиления и преднапряжения крепи в зависимости от размеров элемента усиления показано на рис. 6.10. Как

видно из графика, наиболее эффективно используется металлопрокат, когда половина центрального угла элемента усиления ( $c$ ) находится в пределах  $20-30^{\circ}$ . Дальнейшее его увеличение нецелесообразно, так как при стабилизации силового критерия возрастает масса крепи, что резко снижает эффективность усиления.

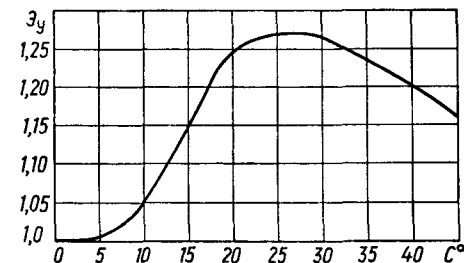


Рис. 6.10. Эффективность усиления и преднапряжения крепи

Таким образом, из аналитических расчетов следует, что даже при отсутствии забутовки усиливающий элемент с центральным углом  $40-60^{\circ}$  и напрягающим моментом  $M = 0,02...0,1$  позволяет увеличить несущую способность крепи в  $1,5-1,6$  раза при повышении массы крепи в  $1,2-1,25$  раза.

Для учета пассивного отпора пород, создаваемого забутовкой закрепного пространства, выполнены лабораторные исследования работы арочной усиленной крепи на модели. С помощью теории подобия и размерностей [6.10] обоснованы параметры стенда [6.6] для испытаний модели крепи (рис. 6.11).

При проведении эксперимента модель крепи 4 устанавливалась на основание 1 стенда и фиксировалась зажимами 3, которые, не ограничивая перемещения арки в ее плоскости, выполняли роль межрамной стяжки. Поскольку взаимозаменяемый спецпрофиль имеет равные моменты сопротивления по вертикальной и горизонтальной осям, допустимо моделировать его сечение круглым прутком. Нагружение производили через гибкую связь (тросик) 6, прикрепленную к вершине арки и пропущенную через направляющие ролики 7. Нагрузку на арку повышали ступенями по 20 Н, верхний предел нагрузки соответствовал 100 Н (40 кН в натуре), что гарантировало упругий режим работы крепи. Для каждой ступени нагрузки с помощью индикаторов часового типа 5 определяли смещения контура модели крепи с точностью 0,01 мм. Для учета пассивного отпора пород на панель 2 прикрепляли опорные элементы 10, плотно прилегающие к модели крепи 4 и моделирующие жесткую забутовку закрепного пространства. Предварительное напряжение создавалось с помощью моментов от сил, приложенных на концах элемента усиления 8 путем их заневоливания зажимами 9.

Исследовались следующие схемы нагружения сосредоточенной силой  $P$ :

1) в центре пролета верхняка с учетом и без учета пассивного отпора пород;

2) внецентренное нагружение крепи при пассивном отпоре пород.

При каждом нагружении испытывались три модели: обычная, усиленная и усиленная преднапряженная. Сравнение смещений крепи, полученных расчетным путем и по результатам моделирования, показало их

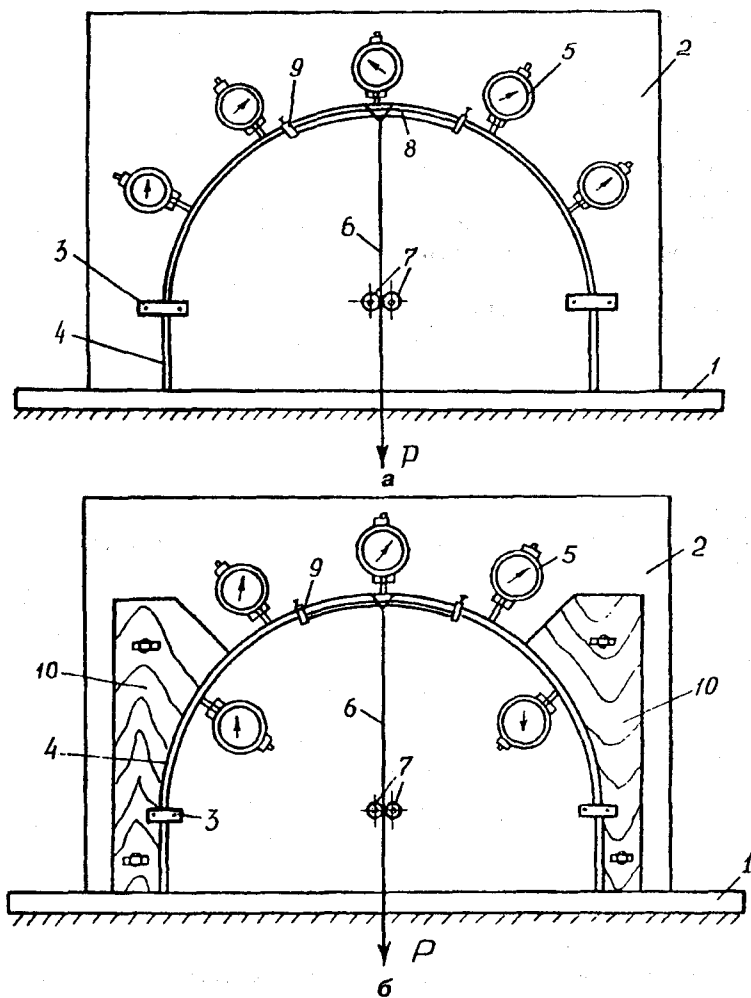


Рис. 6.11. Схема стенда для моделирования работы арочной крепи:  
*а* – без учета; *б* – с учетом пассивного отпора пород

высокую сходимости (расхождение в пределах 10–17%), что позволило обоснованно использовать модель для исследования работы крепи с учетом пассивного отпора пород. Установлено, что эффективность усиления и преднапряжения крепи увеличивается в условиях пассивного отпора пород в 1,3 раза и, в целом, позволяет повысить грузонесущую способность конструкции в 1,9–2,1 раза. Внецентренное нагружение

крепи, вызванное смещениями пород по нормали и напластованию, в выработках, пройденных по простиранию, увеличивает радиальное смещение в наиболее опасных ее сечениях на 15–20%. Исследования показали, что элемент усиления целесообразно располагать со смещением от нормали к напластованию к центру верхняка под углом, вдвое меньшим угла залегания пород, что обеспечивает более равномерное распределение смещений по периметру арки.

Шахтные испытания арочной усиленной крепи были проведены в полевом откаточном штреке гор. 717 м шахты им. 50-летия СССР ПО «Краснодонуголь» [6.11]. При внедрении разработки получена экономия 27 т металлопроката на каждые 100 м выработки за счет снижения в 2 раза плотности установки усиленных рам без ухудшения эксплуатационного состояния штрека.

Эффективность разработанной конструкции в сравнении с крепью КМП-А3 представлена в табл. 6.1 (трудоемкость монтажа принята пропорциональной массе устанавливаемой крепи).

Таблица 6.1. Эффективность усиления арочной крепи

Расстояние между рамами, см		Эффективность по сравнению с КМП-А3, %		
Обычная крепь КМП-А3	Усиленная крепь	Увеличение грузонесущей способности	Экономия металла	Снижение трудоемкости монтажа
33	70	0	43	43
50	100	0	40	40
70	100	40	16	16
70	120	16	30	30
80	100	60	4	4
80	120	33	20	20
100	100	100	-20	-20

Наряду с переходом на большее межрамное расстояние, одним из возможных путей экономии металла при использовании усиленной крепи может служить применение более легких спецпрофилей усиленной рамы. Таким образом, рациональное распределение усилий и материала по периметру крепи позволяет в значительной степени выравнять напряжения в элементах рамы, приблизив их к расчетному сопротивлению, а следовательно, достичь существенного ресурсосбережения при креплении горных выработок.

### 6.3. Комбинированная рамно-анкерная крепь

Одним из перспективных способов повышения работоспособности стальных рамных крепей является комбинирование их с анкерами. Такая крепь получила название рамно-анкерной. Принцип ее работы основан

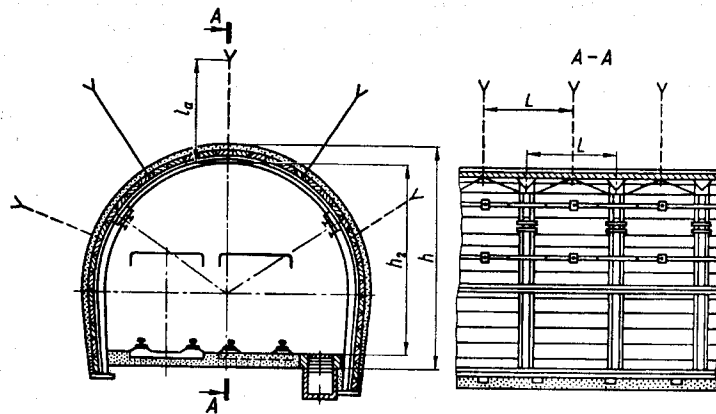


Рис. 6.12. Комбинированная рамно-анкерная крепь АМК

на более полном использовании несущей способности вмещающих пород и совместном противодействии рамы и анкеров смещения массива. Такие крепи эффективны при интенсивных проявлениях горного давления в выработках, проводимых по слабоустойчивым породам, особенно на больших глубинах, в зонах влияния очистных работ и вблизи тектонических нарушений. В среднеустойчивых породах они могут применяться с целью снижения материалоемкости рамной крепи (переход на меньший спецпрофиль, увеличение межрамного расстояния и др.).

Центрогипрошахтом совместно с КузНИИшахтострем разработан типовой проект сечений горных выработок с комбинированной рамно-анкерной крепью АМК [6.12]. Крепь АМК (рис. 6.12) состоит из обычных арок стальной рамной крепи, между которыми устанавливаются анкеры. Здесь реализована идея создания комбинированных конструкций с механической связью между анкерами и арками. Расстояние между арками  $L = 0,8 \dots 1,2$  м. С помощью продольных межрамных подхватов упрочненный анкерами массив и рамы соединяют в одну грузонесущую систему. В качестве межрамного подхвата используется полосовая сталь толщиной 4—8 мм с отверстиями для анкеров. Такое решение должно обеспечивать надежную совместную работу комбинированной крепи. Роль анкерных подхватов может выполнять верхняя часть рамной крепи с отверстиями для трех анкеров [6.13].

Крепь АМК рекомендуется применять в выработках с площадью поперечного сечения  $8 \dots 22$  м<sup>2</sup> с числом анкеров от 2 до 7 длиной  $l_a = 1,6 \dots 2,5$  м. Крепь АМК впервые была использована на шахте Бирюлинская ПО «Северкузбассуголь» при усилении арочной крепи из спецпрофиля СП-18, установленной с шагом 0,8 м в штреке площадью 13,5 м<sup>2</sup>. Штрек был пройден по породам с углом падения 25—30° и крепостью  $f = 3 \dots 4$  по

шкале М.М. Протодяконова. Крепь усилилась анкерами с самозаклинивающимися распорными замками типа АК-8 длиной 1,8 м с натяжением 43—67 кН. Межрамные подхваты были выполнены из стальной полосы размерами 6×60×800. Испытания показали, что обычная рамная крепь до надработки получила смещения около 200 мм, а после надработки лавой была деформирована, тогда как на экспериментальном участке первоначальные смещения составили около 60 мм, а после надработки крепь осталась в удовлетворительном состоянии.

Всего на шахтах Кузбасса крепью АМК закреплено свыше 18 км горных выработок, причем даже в зоне влияния очистных работ не наблюдалось случаев ее отказа. Как показали шахтные испытания, смещения породного контура на участках, закрепленных комбинированной крепью, оказались в 3—4 раза ниже по сравнению с обычной арочной. Общая экономия спецпрофиля составила 5 тыс. т [1.26].

Следует обратить внимание на то, что совместная работа анкерной и рамной крепи не достигается, если между рамой и породным контуром с анкерами остается зазор, соизмеримый с предельной податливостью анкеров. В такой комбинированной крепи силам горного давления противостоит не суммарная несущая способность, а отдельные мало влияющие друг на друга конструкции. В этой связи представляет интерес разработанный в ДГМИ способ возведения рамно-анкерной крепи с предварительным обжатием кровли приконтурного массива гидравлическими стойками, устанавливаемыми под подхват анкеров, с последующим распором рамы, чем указанный недостаток устраняется [6.14]. В этом способе использована идея распора гидростойками пород кровли в подготовительных выработках, выдвинутая проф. Черняком И.Л. [5.9].

Шахтные испытания способа проведены в 4-м западном бремсберге шахты «Перевальская» ГХК «Луганскуголь». Первоначально выработка крепилась трапециевидной податливой крепью из спецпрофиля КПС. Так как крепь в момент установки не оказывает сопротивления перемещению пород и их расслоению (из-за наличия пустот в закрепном пространстве), то, как показали инструментальные наблюдения, в кровле выработки сразу же после ее проведения возникала зона разрушенных пород в виде отдельных пачек, отслоившихся от массива и разбитых трещинами на крупные блоки. Смещения породного контура составили до 190 мм. Для анкерования пород устанавливались три металлических замковых анкера АД-5 конструкции ДонУГИ под подхваты из СВП-22 между рамами крепи КПС, возведенными через 0,8 м. Обжатие пород кровли производилось тремя стойками ГСУ, установленными между подхватом и почвой выработки, суммарным усилием 210 кН, что вызывало поднятие кровли на 40—70 мм (рис. 6.13). После обжатия натяжные гайки анкеров завинчивались до упора, обеспечивая натяжение стержня порядка 12 кН. После демонтажа гидростоек усилие распора перераспределялось на анкеры. Раму податливой крепи также вводили в контакт с породами кровли за счет распора стоек между кровлей и почвой, чем обеспечивали сов-

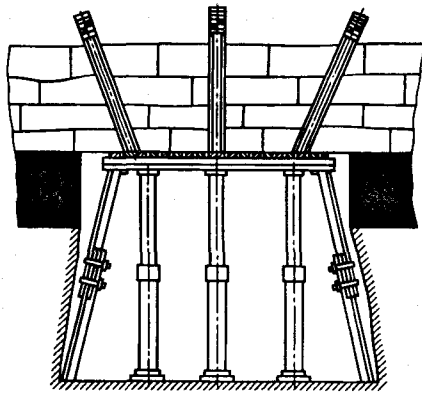


Рис. 6.13. Рамно-анкерная крепь с предварительным распором

местную работу рамной крепи с анкерами. Примененный способ позволил обеспечить безремонтное поддержание экспериментального участка, в то время как остальная часть выработки была деформирована.

Необходимо иметь в виду, что режим работы применяемых анкерной и рамной крепи различен. Так, если рамная крепь работает в режиме заданной нагрузки и представляет собой податливую конструкцию, то используемые в отечественной практике анкеры обладают жестким режимом работы (режим заданных деформаций).

Поэтому при смещениях породного контура происходит перераспределение нагрузок на раму и систему анкеров пропорционально жесткости каждой из противодействующих горному давлению систем. Поскольку коэффициент жесткости рамы близок к нулевому значению, то весь прирост смещений приводит к увеличению нагрузки на анкеры до тех пор, пока смещения полностью не будут остановлены созданным отпором рамы (постоянным) и анкеров (возрастающим). В противном случае произойдет разрыв анкеров, скачкообразное повышение нагрузки на раму, которая окажется под угрозой внезапного разрушения. Чем больше жесткость анкерной системы, тем менее согласованно работают компоненты рамно-анкерной крепи. Поэтому необходимо использовать податливые конструкции анкеров, что заметно увеличит надежность и работоспособность комбинированной конструкции.

Известны и другие способы повышения работоспособности рамной крепи с использованием анкеров. В работе [6.15] изложен способ снижения неравномерности нагружения рамной крепи анкерными связями. Конструкция рамно-анкерной крепи представляет собой (рис. 6.14) обычную податливую арку КМП-А3, которую на наиболее нагруженном участке усиливают анкерной парой. Для обеспечения совместной работы арок 1 и анкеров 2, последними производилась «подшивка» спецпрофиля к породному контуру. Податливость анкеров достигалась установкой деревянных брусков 4 между планкой 3 и спецпрофилем крепи 1. Шахтные испытания показали, что общая нагрузка на крепь снизилась по сравнению с типовой более чем на 30%, а максимальный изгибающий момент — приблизительно на 50%. Таким образом, была подтверждена возможность более равномерного распределения нагрузки на арку со стороны пород при ее несимметричном нагружении.

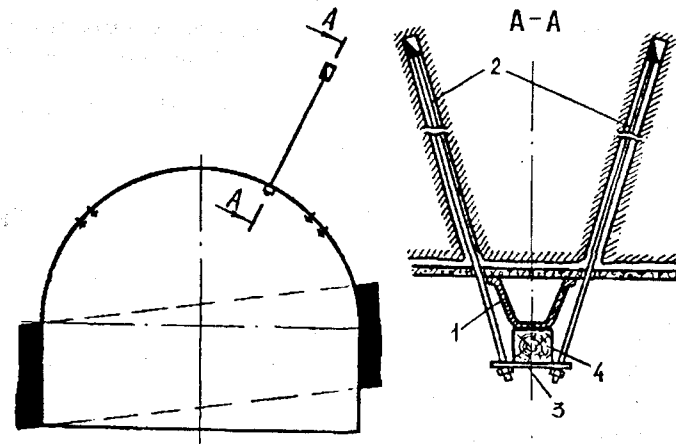


Рис. 6.14. Анкерная пара при несимметричной нагрузке на раму

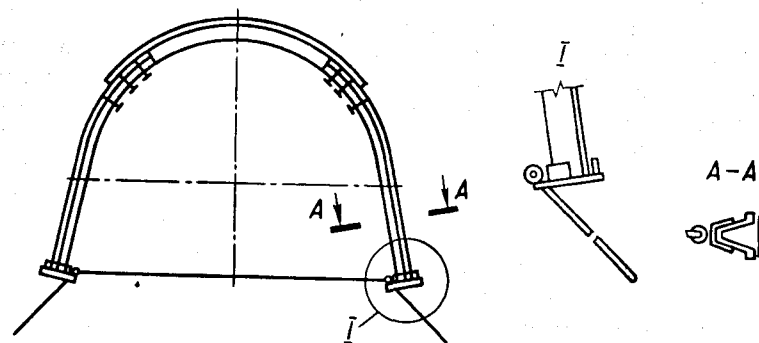


Рис. 6.15. Конструкция рамно-анкерной крепи для условий слабых боковых пород

На шахтах Западного Донбасса для повышения устойчивости горных выработок, сооружаемых в условиях значительных нагрузок со стороны боков и почвы выработки, предложена [6.16] комбинированная рамно-анкерная крепь из спецпрофиля, наклонные стойки которой установлены на опорные плиты, усиленные анкерами с наклоном в почву выработки. Анкеры (рис. 6.15) под стойками рамы предназначены для сопротивления боковым нагрузкам и пучению почвы. Чем больше доля этих нагрузок в общем балансе сил, тем эффективнее управление устойчивостью крепи с помощью натяжения анкера. В этой крепи следует обратить внимание на надежность закрепления замка анкера в породах почвы выработки, которые должны быть неразмокающими.

Возведение крепи продолжает оставаться наиболее дорогостоящим и трудоемким процессом проходческого цикла.

Проф. Смирняков В. В.

## 7. Изготовление, возведение и ремонт рамной крепи

### 7.1. Производство деталей крепи

Применение специальных профилей проката для рамной крепи обусловило, с точки зрения массового производства ее деталей, лишь незначительные конструктивные различия между ними. Большинство деталей крепи унифицировано и отличается друг от друга типом спецпрофиля, длиной и радиусами кривизны элементов

Основной технологической операцией при изготовлении крепи является изгиб прямолинейной заготовки из спецпрофиля в криволинейный верхняк или стойку. В отечественной промышленности такой изгиб осуществляют в холодном состоянии на серийном или специально приспособленном оборудовании. Ранее изготовление крепи было крупносерийным производством, а в последнее время, ввиду экономического кризиса, выполняется относительно мелкими партиями, зачастую на плохо приспособленном и изношенном оборудовании.

В работе [3.1] выделены следующие основные схемы изготовления крепи.

1. Изгиб профиля в инструментальных штампах на кривошипных и гидравлических прессах общего назначения (рис. 7.1, а, б). Форма инструмента имеет сопрягаемые поверхности как в сечении, так и в плоскости изгиба. Такой способ прост и относительно дешев, однако изгиб требует многократного повторения цикла формовки детали. Технология отличается низкой производительностью, малой степенью механизации и невысоким классом точности.

2. Изгиб профиля прокаткой на роликовых и копирующе-гибочных станах (рис. 7.1, в, г, д). Гибка-прокатка профилей относится к моноциклическим процессам, что позволяет применять ее на автоматизированных технологических линиях. Элемент крепи формируется в результате поперечного изгиба с одновременным перемещением заготовок между деформирующими роликами, форма ручья которых согласуется с формой профиля заготовки. В таких станах автоматически меняются параметры настройки, благодаря чему возможно получение элементов крепи переменной кривизны. Величина кривизны детали зависит от параметров настройки роликов. Недостатки этого способа — нестабильность размеров и сложность получения элемента переменной кривизны.

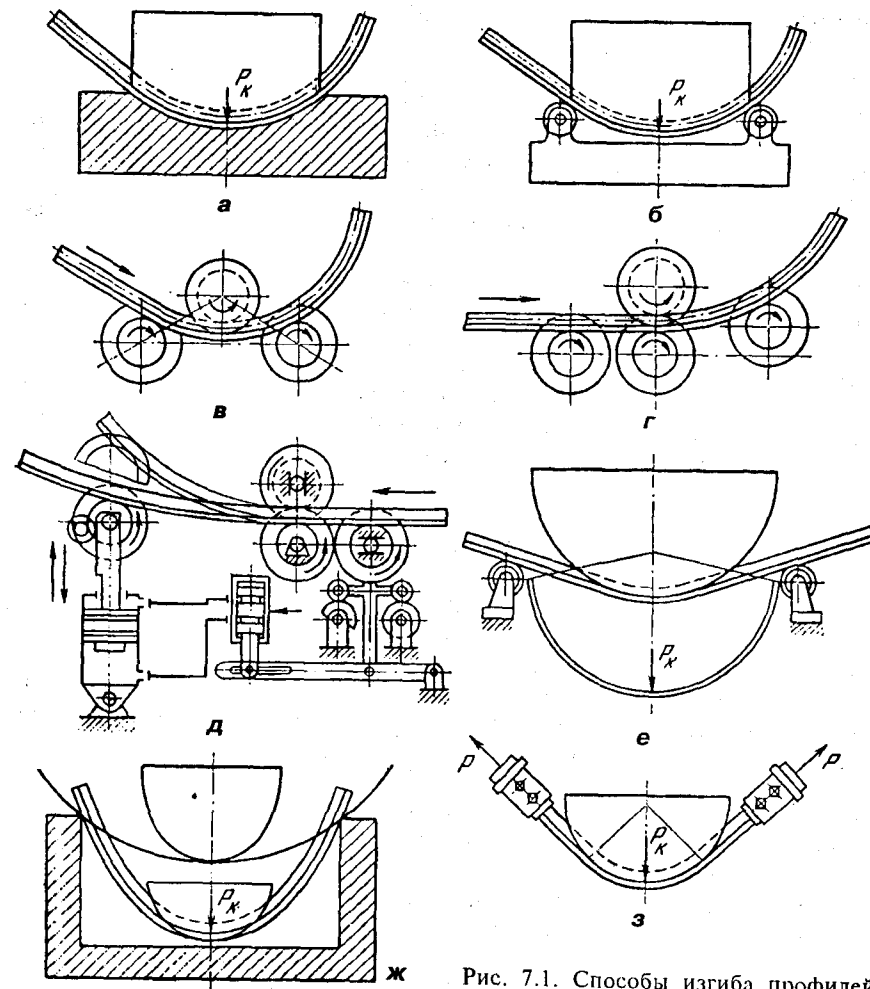


Рис. 7.1. Способы изгиба профилей при изготовлении стальной крепи

3. Изгиб профиля в инструментальном штампе за один ход его рабочего органа (рис. 7.1, е). Благодаря применению контурного пуансона и штампов с большим ходом рабочего органа обеспечивается высокая производительность и точность изгиба. К недостаткам следует отнести громоздкость оборудования, сложность изготовления пуансонов для различных типов спецпрофиля и кривизны.

4. Свободный изгиб профиля (рис. 7.1, ж). Также моноциклический процесс, при котором деталь формируется за счет выбора определенной

схемы нагружения, причем кривизна пуансона всегда больше кривизны детали. Существенный недостаток способа — зависимость точности гибки от постоянства механических свойств материала, поэтому он не нашел широкого применения при изготовлении шахтной крепи.

5. Изгиб с растяжением (рис. 7.1, з). Отличается высокой точностью, но требует довольно сложного оборудования и для изгиба крепи в настоящее время не применяется.

При производстве крепи наибольшее распространение нашли первые три схемы.

Следует отметить, что в процессе пластических деформаций механические свойства стали меняются: значительно снижаются ее пластичность (в частности, относительное удлинение) и ударная вязкость; увеличивается склонность к механическому старению, обусловливающему переход к хрупкому разрушению и интенсификации коррозии. Поэтому с повышением кривизны изгиба эксплуатационная характеристика крепи снижается, а уменьшение пластичности стали затрудняет восстановление крепи для ее повторного использования [7.1].

Не менее важным при изготовлении крепи является производство крепежных деталей. Наиболее распространенным (но далеко не лучшим) видом соединения элементов крепи из спецпрофиля является П-образная скоба с резьбовыми концами под гайки М24, М20 и с планками, одеваемыми на скобу. Процесс их массового изготовления состоит из трех основных операций: получения из прутка нужной по длине заготовки; нарезки резьбы; гибки. Высокопроизводительный метод накатки резьбы требует предварительной калибровки прутка, что значительно снижает его пластические свойства (в частности, относительное удлинение — на 25...35%), что является причиной преждевременного разрыва резьбы с эффектом «стреляющей» гайки. Поэтому лучше отказаться от накатки резьбы и применять ее нарезку тангенциальными плашками на болторезных станках.

Таким образом, рамная стальная крепь может быть изготовлена индустриальными методами на высокопроизводительном оборудовании крупных специализированных заводов, что дает возможность достигнуть ее массового изготовления при сравнительно низкой стоимости.

## 7.2. Технология возведения крепи

Технология возведения рамной крепи определяется ее конструктивными особенностями и условиями применения, которые излагаются в технических условиях, соответствующих руководствах и инструкциях. Крепь устанавливают в забое вслед за проведением выработки с некоторым отставанием, как правило, не превышающим длину заходки, что регламентировано паспортом крепления. Постоянная крепь возводится обычно под защитой временной выдвижной крепи. Рамы устанавливают

перпендикулярно к продольной оси выработки на одинаковом расстоянии друг от друга. Общие правила возведения крепи состоят в следующем [7.2].

Перед установкой крепи в выработке необходимо произвести оборку отслоившейся породы и удаление выступающих кусков с кровли и стенок, приготовить лунки под стойки или канавки под лежни.

Стойки устанавливают поочередно в отдельные лунки, а при наличии слабых пород в почве — на лежни или подкладки. Стойки скрепляют двумя межрамными стяжками (постоянными или монтажными) с ранее установленной аркой. При этом боковые стяжки, как правило, изготавливают из уголкового профиля с высечками на концах под фланцы спецпрофиля рамы и располагают на 0,8 м ниже соединительных узлов. Стяжку закрепляют скобой одним концом на фланце спецпрофиля уже установленной рамы, а выступающий ее конец служит для закрепления стойки монтируемой рамы. Последняя фланцем спецпрофиля заводится в высечку стяжки и также закрепляется скобой.

Для выполнения монтажных работ в кровле выработки, которые отличаются повышенной трудоемкостью, монтируют рабочий полук (рис. 7.2). С помощью крепеукладчика или вручную верхняк поднимают под кровлю выработки, фиксируют в заданном положении на стойках и соединяют двумя скобами и планками на каждом податливом узле, соблюдая проектную величину нахлестки спецпрофилей 300—400 мм. Скобы П-образного узла податливости должны отстоять от концов нахлестки спецпрофилей соответственно на 50—100 мм. Гайки затягивают стандартным ключом с рукояткой 0,45 м до начала изгиба планок. Между днищами соединенных внахлестку спецпрофилей забивают деревянные прокладки размером 120×40×25 мм.

После монтажа податливых узлов производят соединение верхняка межрамной стяжкой с верхняком соседней рамы. Правильность установки рамы контролируют лучом света, по отвесам и маркшейдерским отметкам. В случае необходимости производят устранение отклонений от проектного положения. Между рамами на участках податливых узлов устанавливают деревянные распорки. Затем забивают деревянные клинья между рамой и породным контуром, укладывают затяжку в кровле и боках выработки. По мере укладки затяжки крепное пространство заполняют мелкой породой (забутовкой). На участке податливых узлов под выступающими торцами верхняка затяжку не устанавливают, оставляя «окна», чем устраняют опирание торцов на затяжку и ее поломку при податливости.

Процесс возведения стальной арочной крепи — многооперационный и трудоемкий, требующий высокой квалификации рабочих. Арочную крепь, как правило, устанавливают вручную с использованием элементарных приспособлений для частичной механизации некоторых процессов (полки, ковши погрузочных машин, стрелы комбайнов и т. д.). Количественная оценка операций и приемов, выполняемых при возведении трехзвенной арочной крепи в выработке площадью сечения в свету 12,8 м<sup>2</sup>, приведены в табл. 7.1 [7.3].



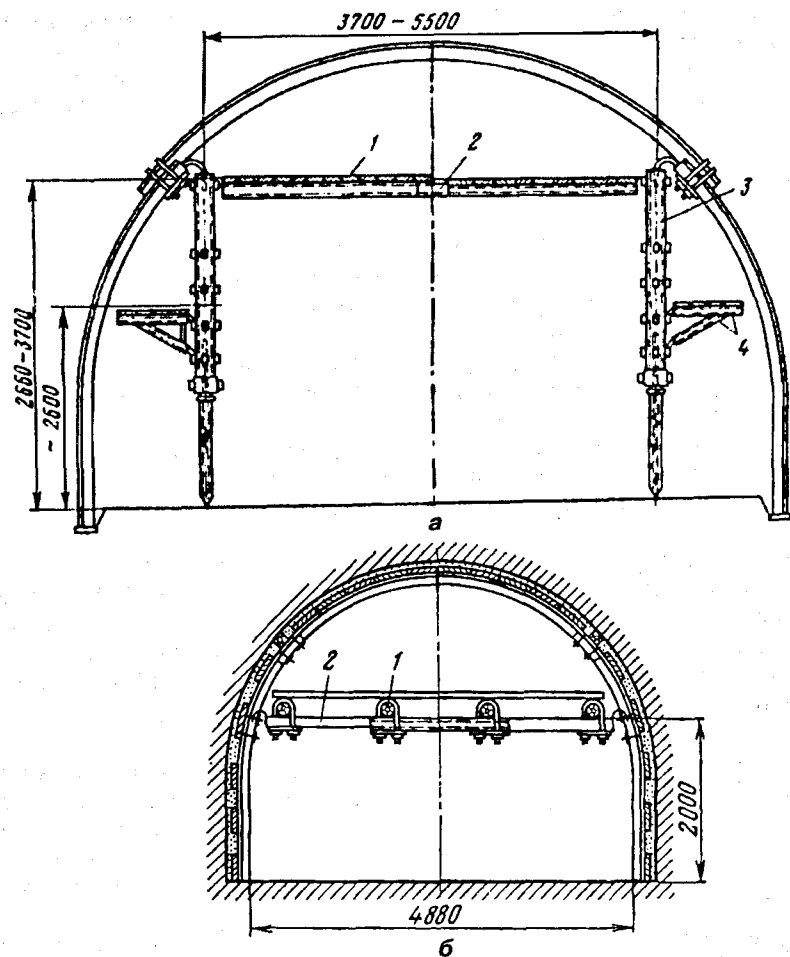


Рис. 7.2. Рабочие полки для возведения арочной крепи:  
 а — подмости на телескопических стойках: 1 — дощатый настил; 2 — поперечные балки; 3 — стойки; 4 — кронштейны; б — подвесные подмости

Традиционная технология возведения рамной крепи имеет существенные недостатки. Большинство работ по монтажу стоек и подъему верхняка рабочие вынуждены выполнять под незакрепленным пространством даже при наличии выдвинутой предохранительной крепи. Поочередная установка стоек требует их закрепления в проектном положении с помощью межрамных стяжек и лунок. Это сопровождается неточностью фиксации стоек, которые могут поворачиваться в точке крепления со стяжкой. Тем самым затрудняется стыковка верхняка со стойками.

Таблица 7.1. Трудоемкость возведения одного комплекта арочной крепи

Операции (приемы)	Трудоемкость		Тяжесть труда
	чел.-мин	%	
<i>Основные</i>			
Возведение двух стоек рамы	71	22	Средняя
Укладка верхняка на стойки и монтаж податливых узлов	33	10	Высокая
<i>Вспомогательные</i>			
Подноска элементов крепи и затяжек (до 20 м)	37	11	Высокая
Подготовка лунок под стойки	23	7	Средняя
Выравнивание боков и кровли выработки	20	6	Высокая
Установка и разборка подмостей	3	1	Средняя
Подготовка скоб, клиньев, стяжек, болтов	6	2	Легкая
Проверка правильности установки рамы	4	1	Легкая
Установка деревянных прокладок и клиньев	13	4	Средняя
Затяжка кровли и боков выработки	79	24	Высокая
Забутовка пустот за рамами	38	12	Высокая
Итого	326	100	

Установка верхняка на ранее возведенные стойки требует избыточной величины монтажного зазора в кровле выработки (не менее 100—150 мм), что приводит к излишку сечения в проходке, увеличению объема забутовки закрепного пространства, снижению эффективности взаимодействия крепи с массивом. Все работы выполняются вручную и плохо поддаются механизации.

При возведении крепи применяют разнообразные устройства и инструменты: лункобуры, гайковерты, лебедки, тали, пилы и др. Основным направлением механизации крепления подготовительных выработок является создание различных типов крепеустановщиков, подъемников, монтажных стрел и других приспособлений. Согласно классификации ИГД им. А.А. Скочинского [7.4], они представлены подвесными, навесными, стоечными, порталными, велосипедными и другими конструкциями. Как показала практика, подвесные крепеукладчики наиболее удобны.

Одним из перспективных *крепеустановщиков* является КПМ-8, разработанный НПО «Углемеханизация» (г. Луганск). Он представляет собой гидроподъемник рычажно-параллелограммного типа и подвешивается на монорельсе в призабойной части выработки (рис. 7.3). Основными узлами являются [3.11]: корпус 1 с закрепленным на нем механизмом передвижения 2, маслостанции 3, перекрытия 4 с оградительными крыльями 5 и механизм подъема, который обеспечивает плоскопараллельное перемещение перекрытия, состоящий из рамы 6, тяг 7 и стабилизатора 8.

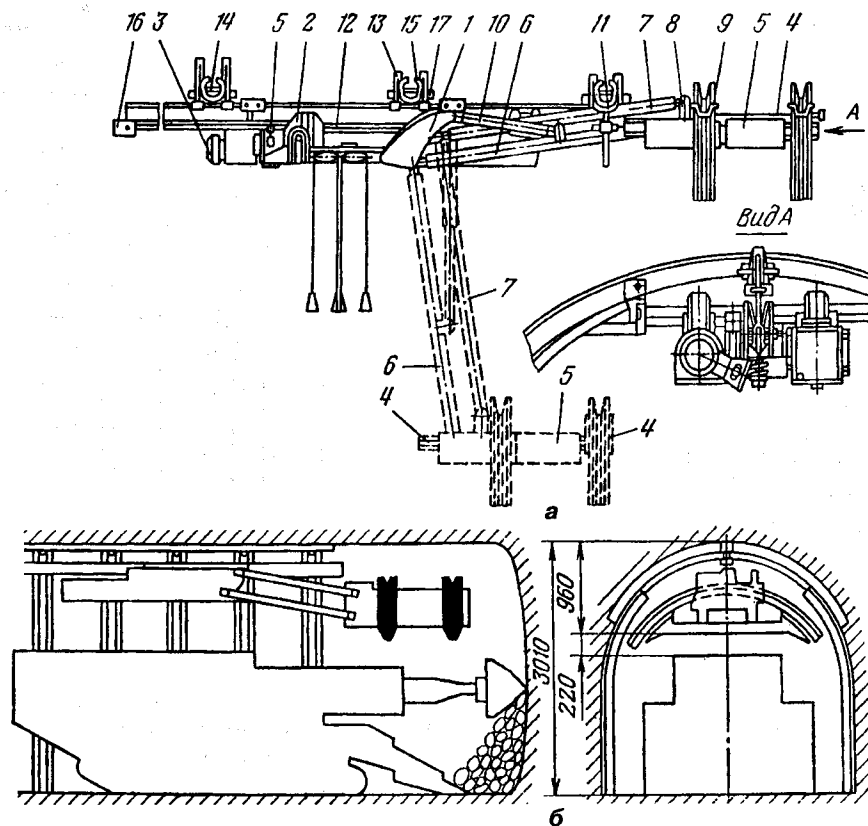


Рис. 7.3. Крепеустановщик КПМ-8:  
а — конструктивная схема; б — общий вид в выработке

Подъем перекрытия производится двумя гидроцилиндрами 10, которые закреплены на раме и корпусе. Монорельс 12, состоящий из 25 секций длиной 2 м и четырех секций длиной 2,5 м, подвешивается вдоль выработки к верхнякам рам с помощью подвесок 13. По мере продвижения забоя последняя секция демонтируется и переносится в забой. Крепь возводится следующим образом. Крепеустановщик по монорельсу отводится к месту сборки перекрытия, где два верхняка устанавливаются в башмаки 9 перекрытия, а четыре стойки — на перекрытие, после чего на верхники укладываются затяжки. Собранным таким образом перекрытие перемещают к забою, поднимают к кровле и присоединяют с помощью захватов клиновидного типа к ранее установленной раме постоянной крепи. Под защитой перекрытия крепеустановщика, выполняющего функции временной призабойной крепи, производят последовательно уборку породы,

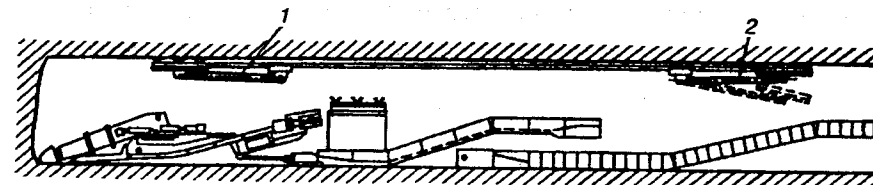


Рис. 7.4. Схема механизации установки верхняков крепи

присоединение стоек к установленным на перекрытии верхнякам, расклинку арок, затяжку и забутовку закрепного пространства.

Таким образом, крепеустановщик обеспечивает защиту рабочих в забое в качестве временной крепи, механизацию трудоемких работ по доставке и подъему элементов крепи и части затяжки, позволяет снизить необходимый при ручной установке верхняка монтажный зазор в кровле выработки. К его недостаткам можно отнести относительно высокую стоимость, некоторое усложнение технологии возведения крепи, появление дополнительных работ по монтажу монорельса, частичное загромождение сечения горной выработки.

Перспективную схему механизации установки верхняков арочной крепи предложили специалисты концерна «Рурколе» [7.5]. В выработке на монорельсе навешены два манипулятора — передний 1 и задний 2 (рис. 7.4). С помощью заднего манипулятора 2 снимают секцию монорельса с быстроразъемными соединениями (полетту). Манипулятор, передвигаясь по монорельсу, укладывает ее на монтажный стол. Затем на полетту укладывают три верхняка и на них решетчатые затяжки. Передний манипулятор 1 подводят к монтажному столу и захватывают им полетту с установленными на ней верхняками и затяжкой, которые подают к месту установки крепи. Верхники прижимают к кровле, при этом полетту присоединяют к переднему концу монорельса. Таким образом, его наращивают одновременно с установкой верхняков. Трудозатраты при возведении крепи сократились на 50%. К преимуществам такой схемы следует отнести упрощение монтажа монорельса, а к ее недостаткам — необходимость двух манипуляторов.

Крепеподъемники являются более простыми, компактными и мобильными конструкциями. Они предназначены лишь для подъема верхняков и стоек стальной, деревянной и железобетонной крепи [3.11].

Рычажный крепеподъемник ППВ-1а (рис. 7.5, а) состоит из двух шарнирно соединенных между собой труб: опорной 1 и подъемной 2, ручного винтового домкрата 3 и подхватов 5 для удержания верхняков. Для устойчивости подъемник имеет откидные упоры 4. Грузоподъемная сила до 2 кН, высота подъема — до 3 м, масса — 95 кг.

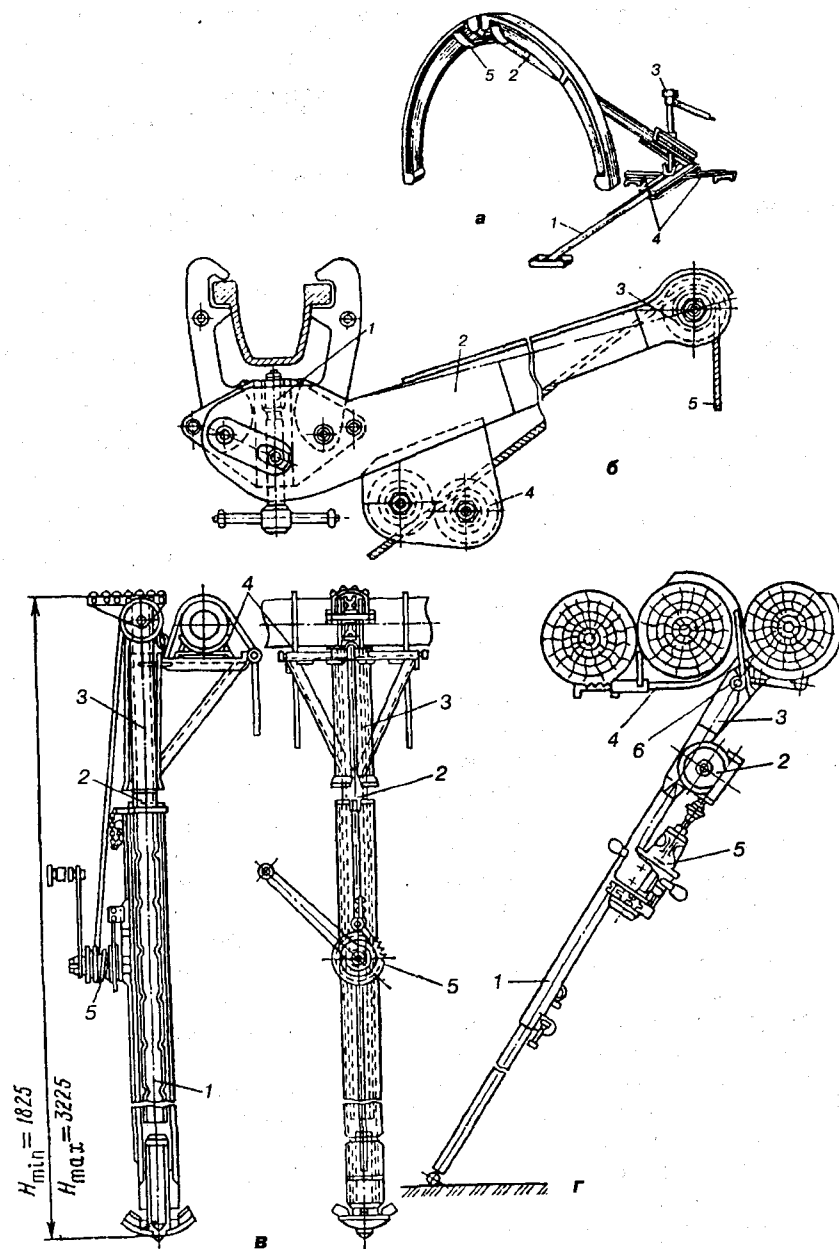


Рис. 7.5. Крепеподъемники:  
 а — рычажный ППВ-1а; б — стоечный ППВ-3; в — монтажная стрела; г — ПТК-1

Подъемник ППВ-3 стоечного типа (рис. 7.5, б) выполнен в виде телескопической раздвижной стойки 1 с распорным винтом 2, перемещающейся по стойке каретки 3 с захватами 4 для верхняка, ручной лебедки 5, смонтированной на корпусе стойки 1, и троса, перекинутого через блок в верхней ее части. Стойка 1 распирается между почвой и кровлей выработки, каретка 3 опускается вниз, на нее укладывается и закрепляется захватами 4 верхняка, который поднимают вращением рукоятки лебедки 5. Подъемник имеет те же технические данные, но его масса меньше (60 кг).

Менее громоздкой конструкцией является монтажная стрела (рис. 7.5, в), состоящая из захвата 1, двух щек 2, опорного блока 3 и направляющих роликов 4. Она закрепляется на верхняке предыдущей рамы захватом 1. Подъемный канат 5 одним концом прикреплен к погрузочной машине, а другим, с помощью зажимного устройства, — к элементу крепи, поднимаемому при движении погрузочной машины. Масса стрелы — 14 кг, грузоподъемная сила — 2 кН.

Крепеподъемник ПТК-1 (рис. 7.5, г) массой 37 кг представляет собой раздвижную стойку 1, на которой укреплены лебедка 2, захват 3 и крюк 4. Приводом лебедки служит электросверло 5, закрепленное на стойке 1. Канат лебедки пропущен через отклоняющий ролик 6 и прикреплен к крюку 4. Перед началом работы крюк укрепляют на предыдущем верхняке крепи, в захват 3 подъемника грузоподъемной силой 4 кН укладывают верхняк, а конец стойки упирают в почву выработки. Высота подъема — до 2,7 м.

Существенным недостатком многих крепеподъемников является невозможность поджатия верхняка под кровлю, что усложняет дальнейший процесс его монтажа. Затраты труда и времени по передвижению и установке на новую позицию крепеподъемников зачастую превышают снижение трудозатрат на возведение крепи. Поэтому такие конструкции не нашли широкого распространения.

Анализ технологии возведения рамной крепи показал, что применение средств механизации эффективно тогда, когда устраняется не менее 70% ручного труда, без усложнения технологии горнопроходческих работ [7.6, 7.7]. Существующие средства механизации этим условиям не удовлетворяют. Более того, типовые конструкции рамной крепи мало поддаются механизации из-за наличия большого числа элементов, узлов и соединений, требующих ручной сборки и регулировки. Разработанные устройства, как правило, являются однофункциональными и слабо связаны с выполнением остальных операций проходческого цикла. Это привело к большому разнообразию механизмов, решающих узконаправленные задачи без их увязки с комплексом работ по сооружению и эксплуатации выработки. Перспективным направлением, позволяющим достичь прогресса в механизации работ по возведению крепи, можно считать разработку *забойных комплексов*, обеспечивающих механизацию ручного труда при выполнении большинства проходческих, монтажных, доставочных и других операций.

В ДГМИ предложена концепция проходческого буро-скреперного комплекса БУСК-1 [7.8], в котором предусмотрена механизация возведения рамной крепи. Он состоит из:

а) скреперного погрузочного модуля, в состав которого входит набор различных скреперов вместимостью от 0,5 до 1 м<sup>3</sup>, модифицированная скреперная лебедка с дистанционным управлением в виде выносного пульта, передвижные концевой и отклоняющие блоки и разгрузочный скреперный полук с механизированным пунктом погрузки на конвейер или в вагонетку;

б) забойного манипулятора на монорельсе, проложенном по своду выработки на длину технологической призабойной зоны (50 – 70 м), выполняющего функции мобильного связующего технологического элемента, механизующего ручные операции и вспомогательные работы с помощью гидрофицированного набора инструментов и приспособлений (доставка материалов и механизмов, возведение крепи, монтаж и демонтаж оборудования, подготовительно-заключительные операции и др.);

в) энергопоезда с маслостанцией, общей для всех механизмов комплекса, устанавливаемой в районе размещения разгрузочного полка с возможностью быстрого подключения различных потребителей (скреперная лебедка, буро-крепельная рама с набором бурильных машин, забойный манипулятор, его движитель, гидрофицированный пункт обмена вагонеток, насосы и др.).

Благодаря своей универсальности комплекс БУСК-1 может применяться для сооружения 70 – 80% всех проходимых на шахте выработок, что значительно снижает затраты на изготовление и обслуживание оборудования, позволяет перейти к его унификации для различных горно-геологических условий, снизить число и установочную мощность призабойных механизмов, сократить до минимума инфраструктуру по ремонту и обслуживанию оборудования. Забойный манипулятор данного комплекса ввиду своей многофункциональности и гибкости позволяет механизировать возведение рамной крепи с минимальными затратами времени и труда, что недостижимо в однофункциональных и узкоспециализированных устройствах.

### 7.3. Ремонт и повторное использование крепи

В результате взаимодействия крепи с массивом, наряду с конструктивно предусмотренной податливостью, происходят деформации отдельных элементов и узлов, которые можно характеризовать как меру потери эксплуатационной пригодности крепи [1.8, 1.23, 7.9].

Все деформации крепи можно условно разделить на: допустимые, которые существенно не влияют на работу крепи или могут быть устранены текущим ремонтом;

аварийные, ведущие к отказам крепи и требующие замены ее отдельных элементов или полного перекрепления.

К наиболее характерным *допустимым* деформациям можно отнести: перекосы скоб и планок в узлах податливости из плоскости продольного или поперечного сечений спецпрофиля, которые вызваны соответственно различным натяжением гаек на скобах или растяжением скоб при появлении моментов от разнонаправленных усилий под скобами и планками на контакте со спецпрофилями;

непараллельность профилей на участке нахлестки, приводящая к сжатию вплотную на одном конце узла податливости и раскрытию зазора на другом, что вызывается действием моментов от внешней нагрузки, при некачественной расклинке рамы на участке узла податливости;

прогибы верхняка или стоек в пределах 50 – 200 мм, вызванные неравномерным (часто сосредоточенным) приложением сил горного давления на отдельные участки крепи;

деформирование или поломка затяжек в пределах 5...10% на тех участках контура выработки, где не возникает опасность травматизма;

местная пластическая деформация спецпрофиля в виде кручения или раскрытия стенок, не приводящая к потере несущей способности крепи;

отклонения рам на 3...5° от вертикали в горизонтальных выработках, вызванные взрывными работами или горным давлением;

изгиб продольных межрамных связей (стяжек) после взрывных работ или в результате неправильной их установки и закрепления.

Допустимые деформации не нуждаются в устранении, если развитие горного давления прекратилось, что может быть установлено шахтными инструментальными наблюдениями за смещениями породного контура выработки. Решение о проведении текущего ремонта принимают на основании прогноза устойчивости выработки по критериям работоспособности крепи (см. табл. 1.4). Если скорости смещения породного контура не затухают и деформации крепи увеличиваются, упреждающий текущий ремонт становится необходимым. Он заключается в подтягивании ослабевших гаек в узлах податливости, постановке на место смещенных или перекошенных скоб, замене деформированных скоб, стяжек, поломанных затяжек, устранении препятствий для нормального скольжения спецпрофилей на участках нахлестки.

*Аварийные* деформации в большинстве случаев проявляются в развитии допустимых при дальнейшем нагружении крепи горным давлением. Среди них можно выделить:

смещения в узлах податливости, превышающие предельные, особенно когда конец верхняка упирается концом в затяжку или в породу и крепь теряет податливость, что приводит к недопустимому деформированию ее элементов;

заклинивание узлов податливости и переход крепи в жесткий режим работы с разрывом днища спецпрофиля стойки;

прогибы верхняков и стоек более 200 мм с местным раскрытием стенок профилей и их разрывом, что сопровождается потерей несущей способности элемента крепи;

ослабление узлов податливости и падение сопротивления скольжению, приводящее к потере сечения выработки и нарушению габаритных зазоров в результате пластической обтяжки скоб или их разрыва со «стрелянием» гаек;

потеря устойчивости рамы в целом в результате изгибно-крутильных деформаций из ее плоскости как результат действия косонаправленных внешних нагрузок или неправильного монтажа крепи;

внезапное разрушение рам, особенно при ослабленных узлах податливости, в виде «завала» отдельного участка выработки, вызванного незабученными пустотами в кровле и боках выработки, что приводит к динамическим нагрузкам на крепь от обрушения пород;

разрушение и выдавливание межрамных ограждений в кровле выработки, приводящее к вывалами пород и «обыгрыванию» рам (порода не поддерживается рамой).

Для устранения некоторых аварийных деформаций крепи достаточно провести упреждающий ремонт, не прибегая к перекреплению. Так, заклинивание в замке ликвидируют ослаблением натяжения скоб на 1/3 оборота гаек. При отсутствии скольжения спецпрофилей после ослабления производят легкое протукивание узла молотком. Разорванные скобы на узлах податливости следует заменить новыми; если это невозможно, то рама подлежит перекреплению. Если торцы верхняка упираются в затяжку или в выступающую породу, то затяжку следует вырубить, а породу — удалить при помощи лома или отбойного молотка. Поломанные затяжки в кровле поочередно заменяют новыми (производят «перезатяжку»), не допуская при этом выпуска большого количества породы.

В остальных случаях аварийных деформаций следует производить перекрепление участков выработок или отдельных рам. При перекреплении податливой крепи за сутки до начала работ машинным маслом смазывают гайки. Для безопасности работ под верхняки заменяемых и соседних арок (не менее трех с каждой стороны) устанавливают по одной или по две временные стойки («ремонтини»), затем снимают узлы податливости и стяжки. Если открутить гайки не удастся, их рубят зубилом. Чтобы крепежную раму разгрузить от давления, с боков выработки удаляют затяжку и производят частичный выпуск породы. Стойки арки извлекают с помощью лебедки через переносной блочок, укрепляемый на верхняке ближайшей рамы (рис. 7.6). При отсутствии лебедки используют лом и другие рычажные приспособления, избегая опасности от возможной упругой отдачи стойки при ее разгрузке. Убирая поддерживающие стойки («ремонтини»), удаляют верхняк и нависшие куски породы, а на очищенном месте устанавливают новую арку.

Для механизации и повышения безопасности работ предложены машины для извлечения крепи (МИК и др.). Например, машина МИК-3 (рис. 7.7) массой 6,5 т на рельсовом ходу имеет плиту с выступом для упора в извлекаемый верхняк и два блока по бокам, через которые перекинуты

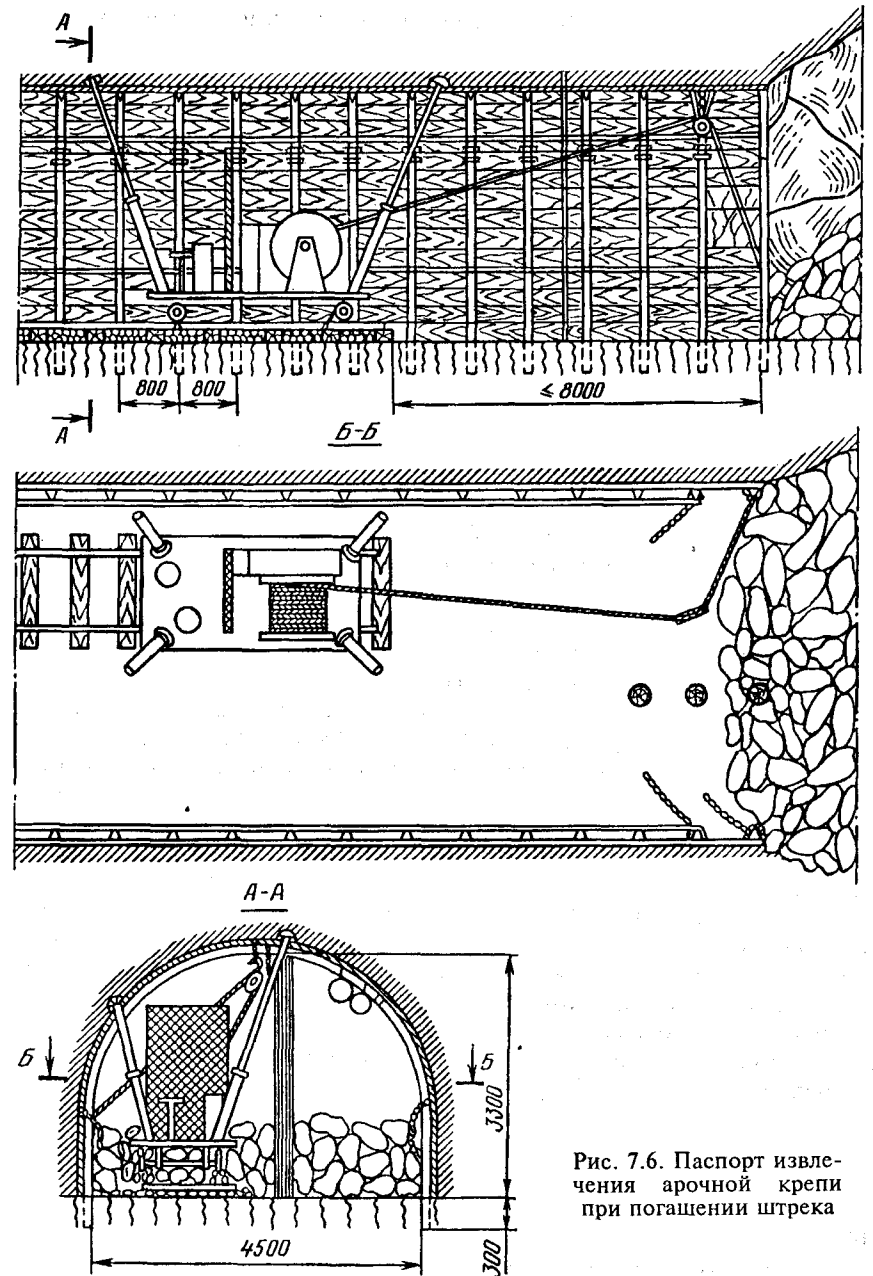


Рис. 7.6. Паспорт извлечения арочной крепи при погашении штрека

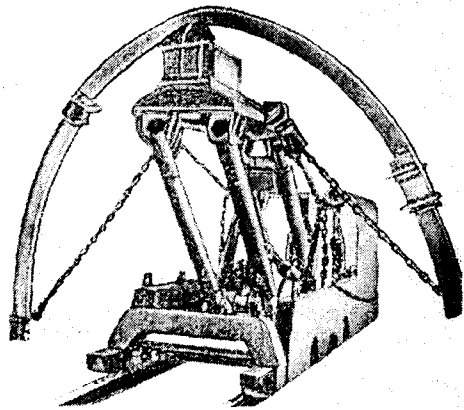


Рис. 7.7. Машина МИК-3

тяговые цепи с захватами для извлечения стоек. Для демонтажа скоб имеются кусачки. Производительность машины — до 20 рам в смену.

Восстановление элементов рамной крепи лучше производить в оборудованной прессами и правильными машинами камере околоствольного двора. Деформированные элементы крепи сортируют и складывают по степени их деформации и типу спецпрофиля. Менее деформированную крепь без разрывов сплошности и предельной местной пластической деформации восстанавливают на прессе

ПАК-150 (рис. 7.8, а), состоящем из литой станины 1, двух колонн 2, служащих направляющими для траверсы 3, закрепленной на поршне цилиндра 4. На траверсе закреплен пуансон штампа, а на столе станины — матрица, с помощью которых выравнивают деформированный профиль крепи.

При значительных деформациях (кручение профиля, изменение радиусов кривизны и др.) крепь восстанавливают на правильно-гибочной машине МПГ (рис. 7.8, б) массой 8,4 т, включающей раму 1, на которой смонтировано оборудование пресса: съемные ведущие ролики 2 и их привод (электродвигатель 3 мощностью 43 кВт, редукторы 4, 5, прижимной ролик 6). Правильное усилие нажимного ролика — 650 кН, ход подачи — 140 мм. Габаритные размеры машины — 3000×1380×1700 мм. Крепь, не поддающаяся восстановлению или ранее восстанавливавшуюся 2 раза, рубят на короткие (200...300 мм) мерные отрезки, которые выравнивают на прессе и используют для изготовления опорных элементов для рам крепи.

Из анализа зарубежного опыта применения рамной крепи следует, что показатель ее извлечения и восстановления относительно невысок. Так, в компании «БАГ Нидеррейн» (ФРГ) этот показатель находится в пределах 6 — 34%, что объясняется удешевлением в последние годы стали для изготовления арок, а также пониженной надежностью и нерентабельностью восстановления крепи с большими деформациями [7.10].

На отечественных шахтах накоплен большой практический опыт по извлечению и восстановлению элементов рамной крепи, разработаны простые и удобные приспособления для механизации работ и использования всех полученных металлических деталей в подземном хозяйстве шахты [7.11]. На ряде шахт удельный вес извлечения стальной рамной крепи составляет более 70%, а после восстановления повторно использу-

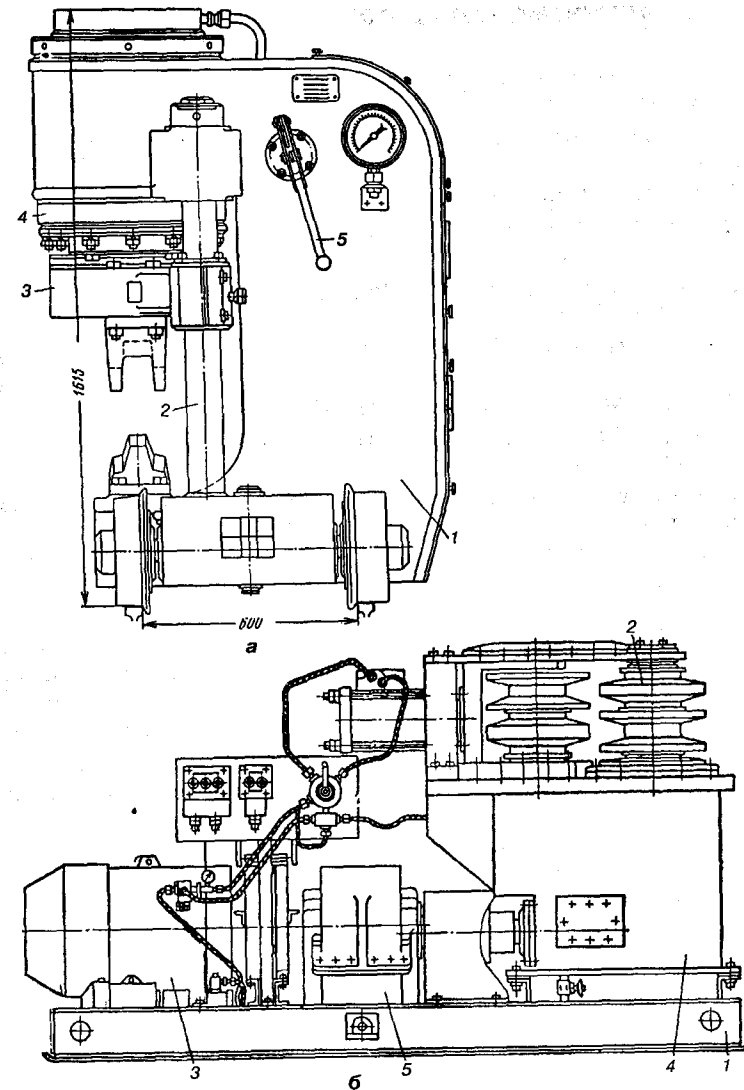


Рис. 7.8. Машины для восстановления стальной крепи:  
а — пресс ПАК-150; б — правильно-гибочная машина МПГ

ется от 65 до 100% элементов крепи. В настоящее время при кризисном состоянии угольной промышленности Украины повторное использование восстановленной крепи оказалось почти единственным источником крепематериалов, извлекаемых при погашении горных выработок.

## Список использованной литературы

- 1.1. Горная энциклопедия.—М.: Советская энциклопедия. Т. 2. Геосферы — Кеная. 1985.—575 с.
- 1.2. Агрикола Г. О горном деле и металлургии в двенадцати книгах.—М.: Недра, 1986.—294 с.
- 1.3. Гастев А. А. Леонардо да Винчи.—М.: Мол. гвардия, 1982.—400 с.
- 1.4. Шпрут Ф. Металлическая крепь подготовительных выработок.— М.: Углетехиздат, 1958.—233 с.
- 1.5. Шахтная металлическая крепь. Пер. с нем. / Под ред. Г. Е. Сирина.—М.: Госгортехиздат, 1959.—159 с.
- 1.6. Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука.—М.: Сов. радио, 1979.—174 с.
- 1.7. Добров Г. М. Наука о науке.—Киев: Наук. думка, 1989.—210 с.
- 1.8. Кошелев К. В., Петренко Ю. А., Новиков А. О. Охрана и ремонт горных выработок.—М.: Недра, 1990.—218 с.
- 1.9. Быков А. В. Анализ конструкций крепей и пути их совершенствования // Шахтное строительство.—1981.—№ 9.—С. 7—10.
- 1.10. Гаврилов Н. В., Никишичев Б. Г., Лавров С. И. Техничко-экономический анализ рамных крепей подготовительных выработок шахт концерна "Кузнецкуголь" // Уголь.—1991.—№ 4.—С. 40—43.
- 1.11. Лисичкин В. Г., Зислин Ю. А., Берлявский Г. П. Анализ некоторых тенденций применения металлических арочных крепей для подготовительных выработок угольных шахт // Шахтное строительство, — 1984.—№ 1.—С. 8—9.
- 1.12. Компанец В. Ф. Совершенствование сталей для крепей и защита их от коррозии.—Уголь Украины, 1995.—№ 9.—С. 16—18.
- 1.13. Штумпф Г. Г., Егоров П. В., Лебедев А. В. Крепление и поддержание горных выработок.—М.: Недра, 1993.—427 с.
- 1.14. Якоби О. Практика управления горным давлением.—М.: Недра, 1987.—566 с.
- 1.15. Фармер Я. Выработки угольных шахт.—М.: Недра, 1990.—269 с.
- 1.16. Ардашев К. А. и др. Опыт охраны и поддержания капитальных и подготовительных выработок на глубоких шахтах ЧССР. Обзор. — М.: ЦНИЭИуголь, 1981. — 33с.
- 1.17. Перек Я. Новые виды штрековых крепей для особо сложных горно-геологических условий // Wiadomosci Gornicze.—1979.— №6. — S. 137—142.
- 1.18. Найдов М. И., Петров А. И., Широков А. П. Поддержание сопряжений горных выработок.—М.: Прометей, 1990. — 240с.
- 1.19. Селезень А. Л. Состояние подготовительных выработок и пути повышения их устойчивости // Уголь Украины.—1987.— № 5.—С. 25—27.
- 1.20. Казакевич Э. В., Лисковский Н. Г. Эффективная антикоррозионная защита металлов —актуальная задача шахтостроителей // Шахтное строительство. — 1989. — № 2.—С. 5—6.
- 1.21. Тупиков Б. Т., Селезень Н. Л., Зигель Ф. С. Арочная крепь для механизированного крепления выработок при комбайновом проведении // Уголь Украины.—1992.—№ 12.—С. 33—36.
- 1.22. Косков И. Г. Новые материалы и конструкции крепи горных выработок.—М.: Недра, 1987.—196 с.
- 1.23. Литвинский Г. Г., Гайко Г. И. Прогноз устойчивости стальной арочной крепи.—Уголь Украины.—1993.—№ 6.—С. 33—36.
- 1.24. Заславский И. Ю., Компанец В. Ф., Файвищенко А. Г., Клещенков В. М. Повышение устойчивости подготовительных выработок угольных шахт.—М.: Недра, 1991.—235 с.
- 1.25. Заславский Ю. З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна.—М.: Недра, 1966.—160 с.
- 1.26. Ерофеев Л. Н., Мирошникова Л. А. Повышение надежности крепи горных выработок.—М.: Недра, 1988.—245 с.
- 1.27. Рогинский В. М., Лисин М. А. Методика количественной оценки качества крепи // Шахтное строительство.—1989.—№ 4.—С. 14—16.
- 1.28. Смирняков В. В., Огородников Ю. Н. О системе сбора и накопления информации о состоянии крепи горных выработок // Шахтное строительство.—1988.—№ 10.—С. 8—10.
- 1.29. Бушман Г. Контроль за состоянием выемочных штреков // Глюкауф.—1972.— № 22. С. 37—41.
- 1.30. А. с. 1723321 СССР (патент Украины № 947), МКИ Е 21Д 11/14. Прогибомер для измерения усилий в шахтной крепи / Г.Г. Литвинский, Г. И. Гайко, И. И. Бурма, В. И. Кулдыркаев.—Опубл. 30.03.92, бюл. № 12.
- 1.31. Гайко Г. И. Измерение усилий в элементах рамных крепей // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород.—Алчевск: ДГМИ, 1996.—С. 132—135.
- 1.32. Коудец Д. Статистические методы контроля качества.—М.: Физматгиз, 1961.—623 с.
- 1.33. Фрумкин Р. А. Методика прогнозирования процессов со многими параметрами и ее приложение в горном деле // Уголь.—1973.—№ 1.—С. 16—22.
- 1.34. Гайко Г. И. Методика определения ошибок распознавания гипотез при прогнозировании надежности крепи горных выработок // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород.—Алчевск: ДГМИ, 1996.—С. 33—37.
- 2.1. СНИП—94—80. Подземные горные выработки.—М.: Стройиздат, 1982. — 31 с.
- 2.2. Матвеев Б. В., Карташов Ю. М. Рекомендации по комплексу методов определения механических свойств горных пород (для инженерных расчетов горного давления). — Л.: ВНИМИ, 1980. — 104 с.
- 2.3. Литвинский Г. Г. Конспект лекций к изучению курса "Механика подземных сооружений". Модуль 1.—Механические свойства горных пород. — Коммунарск: КГМИ, 1990. — 27 с.
- 2.4. Ягодкин Г. И., Мохначев М. П., Кунтыш М. Ф. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. — М.: Наука, 1971. — 148 с.
- 2.5. Максимов А. П. Горное давление и крепь выработок. — М.: Недра, 1973.—288 с.

- 2.6. **Баклашов И. В., Картозия Б. А.** Механика подземных сооружений и конструкции крепей. — М.: Недра, 1984.—415 с.
- 2.7. **Ямщиков В. С.** Контроль процессов горного производства. — М.: Недра, 1989.—446 с.
- 2.8. **Литвинский Г. Г.** Расчет устойчивости породной поверхности горной выработки // Устойчивость и крепление горных выработок. — Л.: ЛГИ, 1976.—Вып. 2 — С. 35—39.
- 2.9. **Родин И. В.** К вопросу о решении задач гравитационного горного давления горного массива на крепи подземных выработок // Докл. АН СССР.—1951.—73.—№3.
- 2.10. **Литвинский Г. Г.** Научная концепция прогноза горного давления в подземных выработках // Уголь Украины.—1996.—№ 8.—С. 9—12.
- 2.11. **Заславский Ю. З., Зорин А. Н., Черняк И. Л.** Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. — К.: Техника, 1972.—156 с.
- 2.12. **Матвеев Б. В.** О графическом представлении механизма работы крепи в горной выработке // Уголь.—1952.— № 11.—С. 19—22.
- 2.13. **Литвинский Г. Г.** К теории свода естественного равновесия // Сб. науч. труд. НГА Украины № 3. — Днепропетровск: РИК НГАУ, 1998. — С. 90—93.
- 3.1. **Маркович Б. А.** Шахтная металлическая крепь и способы ее массового производства.—М.: Недра, 1974. — 120 с.
- 3.2. **Зигель Ф. С., Вихлевщук В. А., Стороженко А. С.** О применении низколегированной стали для крепи горных выработок // Уголь.—1988.— № 9.— С. 17—19.
- 3.3. **Фосс К. Х.** 35 лет применения штрековой крепи из термически улучшенных желобчатых профилей // Глюкауф, 1990.—№ 9/10.—С. 19—23.
- 3.4. **Жербин М. М., Терентьев Б. В.** Опыт использования сталей повышенной и высокой прочности в крепях горных выработок // Устойчивость и крепление горных выработок.— Л.: ЛГИ, 1976.—Вып. 2.—С. 88—91.
- 3.5. **Щецер М. Г.** Об улучшении состояния горных выработок // Уголь Украины.—1990.—№1.—С. 8.
- 3.6. **Зигель Ф. С., Компанец В. Ф.** Арочные крепи из новых профилей проката.—Уголь Украины.—1992.—№ 10.—С. 59—61.
- 3.7. **Комиссаров М. А., Зигель Ф. С.** Изыскание оптимальных размеров гнутых профилей для крепи горных выработок // Труды ДонУГИ. Сб. №.41. — 1968.— С. 81—89.
- 3.8. **Смирняков В. В.** Рациональный изгиб спецпрофиля металлической арочной крепи // Устойчивость и крепление горных выработок. Экспериментально-аналитические исследования взаимодействия крепи с массивом.—Л.: ЛГИ, 1986.—С. 6—12.
- 3.9. **Пиньковский Г. С.** Резервы повышения эффективности шахтного строительства.—М.: Недра, 1981. — 304 с.
- 3.10. **Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Бреднев В. А.** Автоматизированный расчет и конструирование металлических крепей подготовительных выработок.—М.: Недра, 1984. — 312с.
- 3.11. **Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Нуждихин А. Г.** Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник. —М.: Недра, 1989.—571 с.

- 3.12. **Басовская А. М., Басовский Л. Е.** Повышение прочности подземных сооружений. —М.: Недра, 1982.—176 с.
- 3.13. **Комиссаров М. А.** Исследование работы замковых соединений звеньев арочной податливой крепи из спецпрофиля // Тр. ДонУГИ. Сб. № 41. Вопросы охраны и крепления горных выработок.—М.: Недра, 1968.—С. 205—215.
- 3.14. **Пиньковский Г. С.** Увеличение устойчивости горных выработок в сложных горно-геологических условиях // Уголь.—1984.—№ 7.— С. 24—29.
- 3.15. **Мельников Н. И., Гнеушев П. И.** Рациональное использование металлической крепи.—Уголь.—1987.— № 1.—С. 16—18.
- 3.16. **Баранников П. И., Жариков Е. Д.** Повысить эффективность арочной податливой крепи из профиля СВП // Шахтное строительство.—1979.—№ 9. — С. 6—9.
- 3.17. **Мирошникова Л. А., Ерофеев Л. М., Заирный Ю. А.** Исследование работы металлической арочной крепи из СВП на испытательном стенде // Вопросы ускорения научно-технического прогресса в шахтном строительстве и стройиндустрии.—Кемерово: изд. КузНИИШахтостроя, 1987.—С. 116—127.
- 3.18. **А. с. 875071 СССР, МКИ Е 21Д 11/14.** Соединительный узел металлической рамной податливой крепи / Г. Г. Литвинский, В. Д. Троян.—Опубл. 23.10.81, бюл. № 69.
- 3.19. **А. с. 1782283 СССР, МКИ Е 21Д 11/14.** Узел податливости шахтной металлической крепи / Г. Г. Литвинский, Д. А. Герасимчук, В. И. Кулдыркаев, О. А. Стеценко.—Опубл. 15.12.92, бюл. № 46.
- 3.20. **Лисичкин В. Г., Мининберг В. Я., Суrowsкий Б. Н.** Совершенствование конструкций крепи подготовительных выработок // Уголь.— 1984.— № 1.— С. 17—20.
- 3.21. **Кейрович Е. Н., Трофимов В. П., Силачев В. И.** Металлическая трапециевидная податливая крепь // Уголь.—1981.—№ 10. С. 33—35.
- 3.22. **А. с. 589416 СССР, МКИ Е 21Д 11/15.** Податливое соединение элементов металлической крепи из желобчатого профиля / Г. Г. Литвинский.— Опубл. 25.01.78, бюл. № 3.
- 3.23. **Фридлянд А. М., Бокий В. Б.** Опыт применения и некоторые результаты совершенствования крепи шахт Карагандинского бассейна // Устойчивость и крепление горных выработок.—Л.: ЛГИ, 1976.— Вып. 2. — С. 115—121.
- 3.24. **Смирняков В. В., Подолян В. К.** Совершенствование конструкций металлических крепей горных выработок // Шахтное строительство.—1985.— № 4.—С. 26—28.
- 3.25. **Штефан П.** Несущая способность и деформируемость четырехсегментных податливых арок в выемочных штреках // Глюкауф.— 1990.—№ 13/14. С. 17—28.
- 3.26. **Липкович С. М., Краснов С. В., Каминский Ю. В., Польский Н. Д.** Крепь направленной податливости ЛПК для подготовительных выработок крутых пластов // Уголь Украины.—1979.—№ 3.—С. 4—5.
- 3.27. **Заславский Ю. З., Друшко Е. Б.** Новые виды крепи горных выработок.—М.: Недра, 1989.—256 с.
- 3.28. **Ревнивых Г. А., Сумин И. П., Воробец А. Н.** Эллиптическая металлическая крепь // Уголь.—1980.—№ 12.—С. 21—22.



- 3.29. **Урванцев В. П., Шпиленко Н. В., Егоров А. И.** Усовершенствованная металлическая кольцевая крепь для выработок главных направлений // Уголь Украины.—1979.—№ 3.—С. 6.
- 3.30. **Литвинский Г. Г.** Новый способ сооружения обратного свода крепи // Шахтное строительство.—1986.—№ 2. — С. 24—26.
- 3.31. **Максимов А. П.** Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок. — М.: Госгортехиздат, 1963.—144 с.
- 3.32. **Середенко М. И., Лебедев Б. К., Егоров А. П.** Новые крепи и способы поддержания повторно используемых подготовительных выработок при бесце-ликовой технологии.—М.: ЦНИЭИуголь, 1981.—49 с.
- 3.33. **Морозов Ю. И.** Результаты промышленных испытаний экспериментальной инвентарной податливой крепи ИПК // Механизация и автоматизация производственных процессов при разработке угольных пластов Кузбасса.—Прокопьевск: КузНИИУИ, 1976.—№ 30.—С.18—22.
- 3.34. **Губин Н. И., Потапенко В. А., Суровский Б. М.** Новые конструкции металлической инвентарной крепи для выемочных выработок // Уголь.—1980.—№ 11.—С. 19—22.
- 3.35. **Горбунов И. А., Брайцев А. В., Ольшанский Б. Н., Батурицев В. А.** Металлические крепи повышенной несущей способности и податливости для подготовительных выработок // Уголь Украины.—1984.—№ 1.— С. 13—14.
- 3.36. **Гетце В., Крае Ю.** Крепь горизонтальных выработок // Глюкауф.—1981.—№18.—С. 29—34.
- 3.37. **Гайко Г. И.** Проблемы оптимального проектирования крепи горных выработок // Сб.науч.трудов НГА Украины. — № 3. — Т.3.— Днепропетровск: РНК НГАУ, 1998.—С.122—126.
- 4.1. **Костогрыз В. И. и др.** Промышленная проверка экспериментальных образцов перфорированных затяжек крепи // Уголь Украины.—1995.—№ 5.— С. 32—33.
- 4.2. **Хворостяненко С. Г.** Межрамные ограждения рамной крепи // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород. — Алчевск: ДГМИ, 1996. — С.127—131.
- 4.3. **Симш К. и др.** Новые данные по совершенствованию комбинированной системы крепи горизонтальных горных выработок // Глюкауф.— 1993.—№ 1—2. — С.34—41.
- 4.4. **Компанец В. Ф.** Межрамные ограждения крепей и средства их поточного производства // Уголь Украины.—1995.—№ 7. —С. 20—23.
- 4.5. **Гелескул М. Н., Мельников Н. И. Шестернев Е. М.** Классификация межрамных ограждений горных выработок // Проектирование и строительство угольных предприятий.—1971.—№ 2. — С. 31—32.
- 4.6. **Гаркушин П. Н.** Критерии устойчивости горных выработок // Уголь Украины.—1996.—№ 10—11. —С. 34—36.
- 4.7. **Бурба А. И. и др.** Производство железобетонных кессонных затяжек в тресте “Донецкуглестрой” // Шахтное строительство.— 1986.— № 8.—С. 24—25.
- 4.8. **Патент России № 2023883**, Кл. Е 21 Д 11/15. Шахтная затяжка для рамной крепи/ Г. Г. Литвинский, В. Б. Волошин, Г. И. Гайко, В. И. Кулдыркаев, А. Н. Бушмин. — Опубл. 30.11.94, бюл. № 22.

- 4.9. **Заславский И. Ю. и др.** Применение затяжек из фосфогипса для крепления горных выработок // Шахтное строительство.—1989.— № 5.—С.20—21.
- 4.10. **Василев В. В.** Крепление горных выработок полимерно-композиционными материалами // Уголь.—1998.—№ 4. — С. 33—35.
- 4.11. **Долинский В. А. и др.** Профильные затяжки для крепления горных выработок рамной крепью // Уголь Украины.—1972.—№ 3. — С. 14—16.
- 4.12. **Усан-Подгорнов Б. М.; Шерстнев Е. М.** Параметры взаимодействия затяжек с вмещающими породами // Проектирование и строительство угольных предприятий.—1972.—№ 1. — С. 23—24.
- 4.13. **Щербатюк Г. Я. и др.** Эффективные средства защиты горнорабочих от падающих кусков при проведении и эксплуатации выработок // Горный журнал.—1991.—№ 9. —С. 60—62.
- 4.14. **Маливанов Д. И., Белан Н. А., Тихонюк П. С.** Механизация работ при проведении подготовительных выработок на шахтах ФРГ. — М.: ЦНИЭИуголь, 1982. — 28 с.
- 4.15. **Штефан П.** Анкерная крепь в штреках с высокой конвергенцией // Глюкауф.—1994.—№ 1.—С.25—29.
- 4.16. **Малеев Н. В.** Межрамные ограждения как фактор повышения надежности горных выработок // Сб. науч. трудов НГА Украины № 3, Т.3. — Днепропетровск: РИК НГАУ, 1998. — С. 126—128.
- 4.17. **Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Малеев Н. В.** Оптимизация межрамных ограждений шахтной крепи // Уголь Украины.—1998.— № 10. — С. 9—11.
- 4.18. **Шашенко А. Н., Сургай Н. С., Парчевский Л. Я.** Методы теории вероятности в геомеханике. — К.: Техника, 1994. — 216 с.
- 5.1. **Смирняков В. В.** Расчетные схемы металлической крепи // Исследование взаимодействия массива с крепью выработок. — Л.: ЛГИ, 1988.—С.9—14.
- 5.2. **Киселев Е. С., Лысиков В. В., Зеленский В. Б., Локшин Б. И.** Резервы повышения производительности труда и экономии металла на горно-подготовительных работах // Шахтное строительство.—1981.— № 11. — С. 4—5.
- 5.3. **Комиссаров М. А., Зигель Ф. С.** Исследование несущей способности металлической арочной крепи // Вопросы крепления и охраны горных выработок: Тр. ДонУГИ.— 1968. —№ 41.—С. 90—96.
- 5.4. **Попов В. Л., Каретников В. Н., Еганов В. М.** Расчет крепи подготовительных выработок на ЭВМ. — М.: Недра, 1978. — С. 229.
- 5.5. **Каретников В. Н., Клейменов В. Б.** К расчету крепи из тонкостенных элементов, усиленных бимоментными связями // Строительство предприятий угольной промышленности.—1978.—№ 3.—С. 5—7.
- 5.6. **Клейменов В. Б.** Научное обоснование и разработка методов повышения устойчивости металлических шахтных крепей с учетом их пространственной работы. — Дисс... д-ра техн. наук. — Тула: ТулПИ, 1990. — 504 с.
- 5.7. **Долгун А. И.** Влияние межрамных стяжек на несущую способность металлической арочной крепи // Устойчивость и крепление горных выработок. Л.: ЛГИ, 1980. — Вып.6. —С. 107—109.
- 5.8. **Долгун А. И., Сдобников П. В.** Исследование напряженного состояния металлической арочной крепи пространственной конструкции. // Шахтное строительство.—1990.—№ 11.—С. 23—24.

- 5.9. **Черняк И. Л., Бурчаков Ю. И.** Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт. — М.: Недра, 1984. — 304 с.
- 5.10. **Луганцев Б. Б., Мартыненко И. И., Мартыненко И. А.** О влиянии пустот за крепью на смещения кровли штреков // Уголь Украины.—1994.—№ 10. — С. 11—12.
- 5.11. **Заславский Ю. З., Литвинский Г. Г.** Влияние забутовки на взаимодействие крепи и массива // Проектирование и строительство угольных предприятий.—1966.—№ 6. — С. 27—31.
- 5.12. **Колоколов С. Б.** О влиянии качества установки металлической арочной крепи на условия ее работы // Шахтное строительство.—1987.—№ 5. — С. 14—16.
- 5.13. **Александров А. Н.** О влиянии заполнения закрепного пространства на устойчивость горных выработок // Шахтное строительство.—1986.—№ 8.— С. 7—10.
- 5.14. **Каретников В. Н., Бреднев В. А.** Основные модели контактного взаимодействия крепи с массивом горных пород // Механизация горных работ на угольных шахтах. — Тула: ТулПИ, 1977. — С. 52—59.
- 5.15. **Максимов А. П., Шашенко А. Н., Роечко А. Н.** Влияние качества забутовки на несущую способность металлической арочной крепи // Шахтное строительство.—1987.—№ 3. — С. 21—23.
- 5.16. **Иванчишин С. Я.** Обоснование способов повышения несущей способности металлической арочной крепи выработок угольных шахт. — Дис... канд. техн. наук. — Днепропетровск, 1992. — 159 с.
- 5.17. **Черкасов В. В., Черетянюк В. И.** Применение средств механизации при забутовке закрепного пространства // Уголь Украины.— 1994.—№ 7. — С. 52—54.
- 5.18. **Вальтер Р.** Механизация работ по забутовке при буровзрывной проходке // Бергбау.—1985.—№ 10. — С. 460—463.
- 5.19. **Хансиваров Р. К., Гринько С. Н., Кузьмич О. Ю.** Новая технология заполнения закрепного пространства подготовительных выработок // Уголь Украины.—1989.—№ 12. — С. 8—10.
- 5.20. **Брайт Ф., Крае Ю., Шраер Д.** Заполнение пустот за рамами штрековой крепи методом "Булфлекс" // Глюкауф.—1980.—№ 13. — С. 18—26.
- 5.21. **Кошелев К. В., Игнатович Н. В., Каменец В. И.** Промышленная проверка способа взрывной забутовки закрепного пространства // Подземное и шахтное строительство.—1991.—№ 1. — С.17—19.
- 5.22. **Положительное решение по заявке № 5055968/3, МКИ Е 21 Д 11/00.** Способ забутовки закрепного пространства / Г. Г. Литвинский. — от 20.03.92.
- 5.23. **Талобр Ж.** Механика горных пород. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 429 с.
- 5.24. **Черняк И. Л., Юсов А. Б.** Управление массивом пород вокруг подготовительной выработки с помощью активного распора // Уголь.— 1982.— № 9. — С. 21—23.
- 5.25. **А. с. 887812 СССР, МКИ Е 21 Д 11/00.** Способ крепления подготовительной выработки податливой рамной крепью / М. П. Зборщик, А. Ф. Морозов. — Оpubл. 07.12.81. Бюл. № 45.
- 5.26. **Зборщик М. П., Назимко В. В.** Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки. — К.: Техніка, 1991.—248 с.

- 5.27. **Патент України 10567 А, Е 21 Д 11/14.** Спосіб розпору рамного піддатливого кріплення / Г. В. Бабюк, Г. Г. Литвинський, В. М. Стельмах. — Оpubл. 25.12.96. Бюл. № 4.
- 5.28. **Бабюк Г. В., Гайко Г. И., Стельмах В. М.** Управление процессом деформирования пород при креплении выработок рамной податливой крепью // Изв. вузов. Горный журнал, 1997, № 9—10. — С. 31—36.
- 6.1. **Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Малеев Н. В.** Закономерности формирования нагрузок на рамные крепи // Сб. научн. тр. НГАУ, № 1. — Днепропетровск: РИК НГАУ, 1998.—С. 75—78.
- 6.2. **Литвинский Г. Г., Троян В. Д.** Исследование резервов повышения несущей способности металлической арочной крепи // Технология добычи угля подземным способом.—М.: ЦНИИУголь, 1976.— № 12.— С. 24—28.
- 6.3. **Патент России № 1717834 А1, Е 21Д 11/14.** Способ предварительного напряжения рамной крепи / Г.Г.Литвинский.—Оpubл. 07.03.92. Бюл. № 9.
- 6.4. **Клыков А. Е., Курзанцев О. С., Фадеев П. И.** Выравнивание усилий и повышение грузоподъемности рамной крепи // Уголь.—1992.—№ 9.— С. 51—52.
- 6.5. **Гайко Г. И.** Оптимізація та перспективи застосування сталевих трапецеєвидного кріплення підготовчих виробок // Відомості академії гірничих наук України.—1997.—№ 3.—С. 63—64.
- 6.6. **Литвинский Г. Г., Гайко Г. И.** Исследование работы стальной рамной крепи на модели // Изв. вузов. Горный журнал.—1992.—№ 7.— С. 35—40.
- 6.7. **Симанович Г. А., Симанович И. А.** Метод снижения напряженного состояния материала рамной крепи и оптимизация ее параметров // Изв. вузов. Горный журнал.—1989.—№ 7.—С. 32—35.
- 6.8. **Литвинский Г. Г., Гайко Г. И.** Стальная арочная усиленная крепь // Уголь Украины.—1995.—№ 1.—С. 23—24.
- 6.9. **Гайко Г. И.** Обоснование способа и параметров усиления арочной крепи подготовительных выработок. — Дис... канд. техн. наук. — Донецк, 1995. — 115 с.
- 6.10. **Насонов И. Д.** Моделирование горных процессов. — М.: Недра, 1969.—204 с.
- 6.11. **Гайко Г. И.** Управление надежностью крепи как фактор ресурсосбережения в горных выработках. — Изв. вузов. Горный журнал, 1996, № 7. — С. 46—49.
- 6.12. **Инструкция по применению и проектированию комбинированной анкер-металлической крепи конструкции КузНИИШахтоостроя** // Тр. КузНИИШахтоостроя, Кемерово, 1982. — 21 с.
- 6.13. **Технология и механизация проведения подготовительных выработок:** Справочник // П. В. Егоров, Г. Г. Штумпф, А. И. Петров и др.—М.: Недра, 1994.—368 с.
- 6.14. **Бабюк Г. В., Леонов А. А.** Способ создания армопородных грузонесущих конструкций в кровле подготовительных выработок // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород.—Алчевск: ДГМИ, 1996.—С. 136—144.
- 6.15. **Солодянкин А. В.** Повышение работоспособности арочной крепи в условиях несимметричной внешней нагрузки // Мат. отраслевой науч.-техн. конф. "Прогрессивные решения по креплению и поддержанию горных выработок". — Харьков: НИИОМШС, 1996. — С. 34—35.

6.16. Симанович А. М. Новая конструкция комбинированной рамно-анкерной крепи. — Шахтное строительство.—1987.—№ 5. — С. 8—10.

7.1. Заславский Ю. З., Мостков В. М. Крепление подземных сооружений.—М.: Недра, 1979.—324 с.

7.2. Отраслевая инструкция по применению металлических, сборных железобетонных и анкерных крепей в подготовительных выработках угольных и сланцевых шахт. — М.: ИГД им. А.А.Скочинского, 1973.—48 с.

7.3. Безмен И. Н., Килимник В. Г., Ярошинский И. И. Анализ трудоемкости и средств механизации крепления выработок // Уголь Украины.—1984.—№ 1. — С. 21—22.

7.4. Бечвая Д. И. Анализ и классификация средств механизации возведения крепи // Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского № 70. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1970. — С. 67—74.

7.5. Силин Е. М., Приймак И. М., Дзюбенко Э. Ф. Крепление горизонтальных горных выработок металлической арочной крепью за рубежом. — М.: ЦНИЭИУголь, 1985. — 28 с.

7.6. Гелескул М. Н. Технический прогресс в области крепления горных выработок на угольных шахтах // Шахтное строительство.—1976.—№ 5. — С. 4—6.

7.7. Петров А. И., Штумпф Г. Г., Егоров П. В., Архипов Г. Н. Механизация проведения подготовительных выработок. — М.: Недра, 1988. — 248 с.

7.8. Литвинский Г. Г. Новая стратегия развития техники и технологии горнопроходческих работ // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород. — Алчевск: ДГМИ, 1996.—С. 10—16.

7.9. Гелескул М. Н., Усан-Подгорнов Б. М. Поддержание горных выработок. — М.: Недра, 1982. — 271 с.

7.10. Бауэр М. Работа по восстановлению крепи подготовительных выработок на шахтах компании "БАГ Нидеррейн" // Глюкауф.—1990.— № 5/6. — С. 8—14.

7.11. Шецер М. Г., Дубоделов В. А. Ресурсосбережение при проведении подготовительных выработок на шахтах Украины. — М.: ЦНИЭИУголь, 1989. — 36 с.

## Оглавление

Предисловие . . . . .	3
<b>1. Общие сведения и опыт применения стальных рамных крепей . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Краткий исторический экскурс . . . . .	5
1.2. Опыт использования и анализ состояния основных видов крепи . . . . .	9
1.3. Шахтные наблюдения и прогноз работоспособности . . . . .	17
1.3.1. Оценка работоспособности конструкции . . . . .	17
1.3.2. План контроля состояния рамной крепи . . . . .	23
1.3.3. Результаты обследования крепи и прогноз ее работоспособности . . . . .	26
<b>2. Развитие горного давления и параметры крепи . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. К определению прочностных свойств вмещающих пород . . . . .	39
2.2. Напряженное состояние пород вокруг выработки . . . . .	45
2.3. Оценка устойчивости породных обнажений . . . . .	54
2.4. Основные режимы работы и геомеханические параметры крепи . . . . .	65
<b>3. Конструктивные решения рамных крепей . . . . .</b>	<b>70</b>
3.1. Общие конструктивные признаки . . . . .	70
3.2. Развитие конструкций профиля . . . . .	73
3.3. Соединения элементов крепи и пути их совершенствования . . . . .	84
3.4. Аналитический обзор и область применения рамных крепей . . . . .	100
<b>4. Межрамные ограждения . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>5. Средства обеспечения взаимодействия рамной крепи с массивом пород . . . . .</b>	<b>153</b>
5.1. Расклинки и стяжки . . . . .	153
5.2. Заполнение закрепного пространства . . . . .	159
5.3. Предварительный распор рамных крепей . . . . .	166

<b>6. Управление усилиями в рамной крепи</b> . . . . .	170
6.1. Закономерности распределения нагрузки на крепь . . . . .	170
6.2. Предварительное напряжение рамных конструкций . . . . .	173
6.3. Комбинированная рамно-анкерная крепь . . . . .	183
<b>7. Изготовление, возведение и ремонт рамной крепи</b> . . . . .	188
7.1. Производство деталей крепи . . . . .	188
7.2. Технология возведения крепи. . . . .	190
7.3. Ремонт и повторное использование крепи . . . . .	198
<b>Список литературы</b> . . . . .	204

Наукове видання

*Литвинський Гаррі Григорович*  
*Гайко Геннадій Іванович*  
*Кулдиркаєв Микола Ілліч*

## **Сталеве рамне кріплення гірничих виробок**

Рос. мовою

Редактор *Н. О. Білокриницька*  
Оформлення художника *В. С. Жиборовського*  
Художній редактор *С. В. Анненков*  
Коректор *Н. М. Мірошніченко*  
Комп'ютерна верстка *В. Ф. Зелтиньша*

Підписано до друку 28.10.99 р. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$ . Папір друкарський № 1.  
Гарнітура Таймс. Друк офсетний. Обл. вид. арк. 12,78. Умов. друк.  
арк. 12,55. Тираж 500 прим. Зам. № 0-1

Видавництво "Техніка". 254053 Київ, вул. Обсерваторна, 25.  
Свідоцтво про державну реєстрацію № 02473145 від 22.12.95

ВАТ Білоцерківська книжкова фабрика,  
256400, Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4

**СТАЛЬНЫЕ  
РАМНЫЕ КРЕПИ  
ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТОК**

 «Техніка»

**СТАЛЬНЫЕ РАМНЫЕ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Г. Г. ЛИТВИНСКИЙ, Г. И. ГАЙКО, Н. И. КУЛДЫРКАЕВ

**СТАЛЬНЫЕ  
РАМНЫЕ КРЕПИ  
ГОРНЫХ  
ВЫРАБОТОК**

