

П.В.Шведовский, А.А.Омелько

Содержание и ремонт транспортных сооружений

(курс лекций)

Допущено Ученым Советом Брестского государственного
технического университета в качестве учебного пособия для
студентов дневной и заочной формы обучения по специальности
Т.19.03.00 «Строительство дорог и транспортных объектов»

Брест 2001

УДК 656.627+624.21.012.35:378.244

Содержание и ремонт транспортных сооружений (курс лекций).
Шведовский П.В., Омелько А.А. – Брест.: БГТУ, 2001, 237с.

Содержание учебного пособия полностью соответствует рабочей программе и образовательному стандарту РД РБ 02100.5.99 специальности Г.19.03.00 – «Строительство дорог и транспортных объектов».

Предназначено студентам вузов, техникумов и специалистам в области строительства, эксплуатации и реконструкции транспортных магистралей.

Таблиц 11, илл. 139, библи. 16 названий.

Рецензент: начальник сектора подготовки производства работ Брестоблдор-
строя **О.Р.Чумичев**

ISBN 985-6584-32-9

© Брестский государственный технический университет 2001
© П.В. Шведовский
© А.А. Омелько

Оглавление

стр.

1 Проблемы эксплуатации транспортных объектов	5
1.1 Общие проблемы содержания и восстановления мостового парка страны	5
1.2 Общие вопросы эксплуатации транспортных сооружений	7
1.3 Организация и содержание работ по эксплуатации	10
1.4 Обеспечение безопасности движения и противопожарные мероприятия	13
1.5 Обеспечение доступа к конструкциям моста	14
1.6 Теоретические основы оценки долговечности и надежности транспортных сооружений	16
2 Содержание, осмотр и ремонт железобетонных мостов	23
2.1 Содержание железобетонных, бетонных и каменных мостов	23
2.2 Особенности осмотров железобетонных пролетных строений	30
2.3 Принципы ремонта железобетонных и пролетных строений	33
2.4 Осмотр и ремонт мостового полотна	38
3 Содержание, осмотр и ремонт мостовых опор	47
3.1 Содержание опор	47
3.2 Особенности осмотра опор	51
3.3 Ремонт опор	53
3.4 Особенности осмотра и ремонта опорных частей	60
4 Содержание, осмотр и ремонт металлических мостов	66
4.1 Общие сведения о содержании металлических мостов	66
4.2 Классификация повреждений и особенности их проявления	70
4.3 Осмотр стальных и сталежелезобетонных пролетных строений	80
4.4 Ремонт стальных пролетных строений	82
4.4.1 Исправление погнутостей и местных деформаций	82
4.4.2 Заделка трещин и пробоин	83
4.4.3 Смена заклепок	87
4.4.4 Исправление дефектов в опорных частях	88
4.4.5 Капитальный ремонт пролетных строений	89
4.5 Защита металлических пролетных строений от коррозии	92
5 Содержание, осмотр и ремонт деревянных мостов	98
5.1 Общие сведения о содержании и ремонте деревянных мостов	98
5.2 Механические повреждения и их устранение	98
5.3 Ремонт деревянных мостов	102
5.4 Осмотр деревянных мостов	105
5.5 Защита мостов от гниения	107
6 Содержание, осмотр и ремонт водопропускных труб	113
6.1 Общие сведения о содержании водопропускных труб	113
6.2 Распространенные повреждения труб	114
6.3 Осмотр водопропускных труб	115
6.4 Ремонт водопропускных труб	116

7 Содержание, осмотр и ремонт регуляционных сооружений	121
7.1 Содержание подходов к мостам и регуляционных сооружений.....	121
7.2 Осмотр русла и поймы реки.....	126
7.3 Осмотр подходов и регуляционных сооружений	127
7.4 Подготовительные работы к пропуску ледохода и высоких вод.....	128
7.5 Пропуск льда и высокой воды	133
7.6 Особенности контрольно-инструментальных измерений при осмотре мостов,133 путепроводов и эстакад.....	135
7.7 Охрана труда и техника безопасности.....	136
8 Исследования эксплуатируемых сооружений	136
8.1 Задачи и методы исследования эксплуатируемых сооружений.....	136
8.2 Обследование сооружений.....	137
8.3 Определение механических характеристик и качества материала сооружения.....	141
8.4 Методы выявления скрытых дефектов и повреждений	148
8.5 Учет влияния повреждений элементов на их несущую способность.....	153
9 Испытание мостов	155
9.1 Общие сведения об испытании мостов.....	155
9.2 Методика проведения динамических испытаний.....	157
9.3 Измерение перемещений и прогибов при динамических испытаниях.....	159
9.4 Методы измерения напряжений	164
9.5 Измерение напряжений механическими, струнными и электрическими тензометрами.....	171
9.6 Тарировка приборов. Выбор и размещение их при испытаниях	181
9.7 Обработка, оценка и анализ результатов испытаний	185
9.8 Анализ динамических испытаний	191
9.9 Методика проведения статических испытаний	193
9.10 Измерение перемещений и приборов при статических испытаниях.....	198
9.11 Анализ статических испытаний.....	203
10 Моделирование сооружений и конструкций	208
10.1 Краткие сведения о моделировании сооружений и конструкций.....	208
10.2 Исследования на плоских моделях.....	216
10.3 Оптический метод исследования напряжений.....	219
10.4 Исследования на объемных моделях	223
10.5 Приборы для измерения деформаций.....	227
10.6 Аналоговое моделирование	231
Рекомендуемая литература	237

1 Проблемы эксплуатации транспортных объектов

1.1 Общие проблемы содержания и восстановления мостового парка страны

С 1991 года по настоящее время в оперативный банк данных по искусственным сооружениям на дорогах общего пользования Республики Беларусь занесена информация диагностики всех 5200 мостов (вместе с городскими и железнодорожными), общая длина которых составляет около 254 км.

Обобщение и анализ информации по занесенным в базу данных мостам на автомобильных дорогах позволили выявить следующее: не соответствуют требованиям нормативов по грузоподъемности или габаритам 2133 сооружения (45%), а по общим параметрам одновременно – 466 сооружений, или около 10% от всего мостового парка. Картина будет не полная, если не сказать о мостах на республиканских автомобильных дорогах, по которым перевозится сегодня до 80% всех грузов. Из 2200 сооружений (около 159 км) не соответствуют нормативам по одному из параметров 1164, а по обеим – 330.

Все мосты в базе данных, в соответствии с ВСН 44-93 «Инструкция по проведению осмотров мостов и труб на автомобильных дорогах», имеют параметры их технического состояния, а также общую оценку состояния: хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно и аварийные. Кроме того, для каждого моста дана максимальная категория неисправности по безопасности и долговечности, согласно которой можно определить параметры необходимого ремонта (ремонт перильных ограждений, ограждений безопасности или ремонт пролетных строений, опор или других конструкций) или этапы усиления и реконструкции.

Оценка состояния мостов, находящихся в республиканской базе данных, приведена в таблице 1.1

Таблица 1.1

Оценка состояния	Количество мостов, шт.	Процент, от общего числа
Хорошо	486	10
Удовлетворительно	2473	51
Неудовлетворительно	1768	36
Аварийные	132	3

Количество мостов, имеющих оценку неудовлетворительно (включая аварийные мосты), составляет 1900, или 39% от общего количества.

Одна из главных причин плачевного состояния дел – многократно возрастающие транспортные нагрузки, к восприятию которых мосты, построенные по старым нормам, оказались совершенно не готовы. Причем это касается не только объектов послевоенной постройки, но и более современных, построенных 10-15 лет назад. Наглядный пример – объекты Минской кольцевой дороги, реконструкция которой начата 20 лет назад. Последнее мостовое сооружение на ней было построено 10 лет назад. Но и оно уже успело морально устареть, поскольку было рассчитано на двухполосное движение.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что моральный износ сооружений значительно опережает их физический износ.

Анализируя причины, которые приводят к быстрому моральному и физическому износу мостов, не следует забывать также о качестве и технологии строительства. Как считают специалисты, самым слабым местом у мостов является бетон, во всяком случае, в том виде, в котором он попадает на стройплощадки и закладывается в несущие конструкции. Он плохо переносит циклы замораживания и размораживания, число которых за одну только белорусскую зиму может достигать 80, неустойчив к воздействию солей, образующихся под воздействием углекислого газа, выделяемого автотранспортом, имеет низкую трещиностойкость, не достаточно твердую поверхность и т.д. Плюс к этому прибавляется масса технических мелочей, связанных с низким качеством строительных работ и нарушений требований при транспортировке.

И, наконец, третий блок проблем, способствующих ухудшению состояния мостового парка, – это его эксплуатация, неудовлетворительный уход, а то и вовсе отсутствие регулярных служб по обеспечению ухода, низкий уровень диагностических и профилактических работ и т.д.

Отсюда содержание мостового парка на высоком техническом уровне возможно только в соответствии со специально разработанной системой управления мостами на основе автоматизированного банка данных, постоянно обновляемого и достоверного.

Существующая сегодня компьютерная версия программы банка данных позволяет не только автоматизировать и значительно ускорить поиск интересующей информации по всей базе; по дороге (по титулу, всей дороге, участку); по автодору; по объекту и т.д., но и оперативно решать следующие проблемы:

- выполнять учет искусственных сооружений (картотека);
- производить оценку технического состояния парка мостов;
- определять необходимость специализированных обследований;
- находить мосты, требующие определенных видов ремонта для устранения однотипных дефектов;
- планировать ремонтные работы;
- предварительно определять возможность пропуска сверхнормативной нагрузки;
- в случае возникновения аварийных ситуаций определять была эта авария случайной или ожидаемой.

Следует отметить, что достоверность банка данных гарантируется регулярно проводимой диагностикой искусственных сооружений,

Предлагаемая периодичность диагностики (не реже 1 раза в 5 лет) вполне обоснованна, так как этот срок дает возможность вести постоянный контроль за ликвидацией аварийных ситуаций, а также проводить комплекс профилактических мероприятий, позволяющих со значительно меньшими затратами обеспечить более длительный срок их службы. Одновременно при такой периодичности обновляется информация банка данных, обеспечивая его достоверность. Кроме того, это позволяет снизить затраты на специализированные обследования, так как в случае регулярного и достаточно частого проведения диагностики потребность в них уменьшается примерно в 4 раза.

На основании данных диагностики имеется возможность повышения эксплуатационных качеств всей трассы путем последовательной реконструкции сооружений. При этом оптимизируется и очередность капиталовложений.

1.2 Общие вопросы эксплуатации транспортных сооружений

Все транспортные сооружения подвержены различным воздействиям, постепенно снижающим их прочность и эксплуатационную надежность. К ним, прежде всего, относятся переменные во времени температура и влажность воздуха, атмосферные осадки, воздействие речной воды и льда, а также другие природные факторы, интенсивность воздействия которых в большой степени зависит от географического места расположения сооружения. В этом отношении в наиболее тяжелых условиях находятся мосты и трубы в северных районах с суровым климатом, а также в районах, подверженных землетрясениям.

Нагрузки, которые воспринимают сооружения от проходящего транспорта, также весьма разнообразны по своим характеристикам и видам воздействия. Отдельные машины могут занимать по длине и ширине моста различное положение, двигаться с разной скоростью, иметь различные весовые и габаритные характеристики. Кроме того, со временем вес транспортных средств, скорость и интенсивность их движения по дороге возрастают, создавая более тяжелый режим работы искусственных сооружений.

Со временем под влиянием внешних воздействий несущая способность строительных материалов и конструкций снижается, а в сооружениях возникают и постепенно накапливаются различные дефекты и повреждения.

Неизбежное накапливание повреждений и дефектов, снижающих эксплуатационную надежность сооружений и срок их службы, – результат совокупности случайных причин, так как нагрузки и другие аналогичные воздействия воспринимаются сооружением в различных, случайно возникающих, сочетаниях. Кроме этого, прочностные показатели конструкций, вследствие неоднородности строительных материалов, тоже различны и в известных пределах случайны.

Надежность сооружений оценивается с учетом вида, количества и величины дефектов и повреждений. Мерой надежности служит вероятность нормальной эксплуатации сооружений в течение установленного срока их службы.

Нормальная работа сооружений в течение предусмотренного срока службы обеспечивается его проектом, постройкой и эксплуатацией. В настоящее время качество проектов достаточно высокое. Аварийные случаи из-за проектных ошибок встречаются очень редко. Однако новые материалы и конструкции всегда требуют тщательной проверки на реальных сооружениях. Примером могут служить предварительно напряженные пролетные строения, которые в первые годы применения, не всегда оказывались достаточно надежными в эксплуатации и требовали исправления возникших в них серьезных дефектов. Особо важное значение для долговечности мостов и труб имеет качество постройки. Возведение сооружений – сложный процесс, требующий от его исполнителей высокой культуры. В процессе строительства должны обеспечиваться прочность и долговечность материалов конструкций, необходимые для нормальной работы сооружения на весь период его службы.

Не менее ответственна роль эксплуатации сооружений. В процессе эксплуатации необходимо своевременно предупреждать возникновение дефектов и повреждений, выявлять их и ликвидировать, если они все же возникли.

Отсюда основными факторами, вызывающими появление дефектов в конструкциях являются:

- ошибки при проектировании;
- неудовлетворительное качество строительства и изготовления сборных конструкций (брак);
- воздействие погодных-климатических факторов (водоток, температурные перепады, солнце, атмосферные осадки, агрессивная среда);
- воздействие временных нагрузок;
- механические повреждения;
- недостатки эксплуатации;
- моральный и физический износ.

Если исполнительная документация отсутствует, то составляют новые технические документы на основе детального обследования и обмера сооружений в натуре, а также определяют их грузоподъемность соответствующими расчетами и испытаниями временной нагрузкой.

В процессе эксплуатации состояние сооружений отражают в технической документации установленной формы – Книгах искусственных сооружений и журналах, а также составляемых по мере надобности отчетах по обследованию, испытанию и т.д. Эта документация должна содержать исчерпывающие сведения о состоянии каждого сооружения, быть четкой и наглядной, с достаточным количеством поясняющих схем, рисунков, графиков.

Рассмотрим для примера содержание Книги искусственного сооружения (форма ЭМ-3):

1. Данные о грузоподъемности;
2. Ограничения движения (длительные);
3. Происшествия на мосту;
4. Текущие осмотры и ремонты мостового полотна;
5. Текущие осмотры и ремонты главных несущих элементов пролетных строений;
6. Текущие осмотры и ремонты опор;
7. Текущие осмотры и ремонты конусов, откосов, регулиционных сооружений и русла;
8. Капитальные ремонты, произведенные на мосту;
9. Специальные наблюдения за элементами моста;
10. Окраска металлических пролетных строений;
11. Окраска и антисептирование деревянных пролетных строений;
12. Наблюдение за режимом реки;
13. Профили промеров русла реки;
14. Замечания и распоряжения по надзору, содержанию и ремонту.

Любой технический отчет должен включать следующие основные разделы:

- общие сведения;
- данные по сооружению с учетом результатов освидетельствования;

- ведомость дефектов;
- расчет грузоподъемности сооружения;
- испытания сооружения;
- заключение (рекомендации по режиму пропуска нагрузок, содержанию и ремонту моста).

Надзор и уход за сооружениями делится на постоянный надзор и уход и текущие, периодические и специальные осмотры.

В постоянный надзор и уход входят: регулярный осмотр сооружений, выявление и исправление мелких повреждений, очистка от грязи, мусора, льда и снега проезжей части, тротуаров и других элементов конструкций пролетных строений и опор. Кроме того, на постоянный надзор возлагается наблюдение за соблюдением установленного режима движения, содержание в исправности противопожарного инвентаря, навигационных и дорожных знаков, освещения и другие повседневные работы. Постоянный надзор – обязанность ремонтера, линейного или мостового мастера.

Задачами текущих осмотров, проводимых мостовыми (дорожными) мастерами, является подробный осмотр сооружения, выявление дефектов, назначение мер для их устранения, а также контроль постоянного надзора. Текущие осмотры деревянных мостов проводят не реже одного раза в квартал, а стальных, каменных, бетонных и железобетонных одного раза в полугодие. Кроме того, мосты осматривают перед пропуском ледохода и весенних вод и после их прохода. Малые мосты и трубы дополнительно осматривают после прохода ливней. Для сооружений, имеющих крупные дефекты, текущие осмотры проводят чаще.

Все выявленные дефекты по степени воздействия на сооружение классифицируются:

- дефекты, влияющие на грузоподъемность (разломы, трещины раскрытием выше допустимого, интенсивная коррозия металла, повреждения конструктивных элементов основных несущих конструкций, просадки и крены опор, изменение расчетной схемы и т.п.);

- дефекты, влияющие на безопасность движения, – неровность, ямочность, колеиность покрытия проезжей части, недостаточная высота и разрушение железобетонного парапета или металлического барьерного ограждения, отсутствие барьерного ограждения на подходах, просадка насыпи на сопряжении моста с подходами, отсутствие или ложная информация на знаках ограничения вертикального габарита, проломы тротуарных плит, отсутствие перильных элементов, несоответствие габарита проезда установившейся интенсивности движения. Перечисленные дефекты относятся к категории критических и требуют принятия незамедлительных мер по предотвращению возможности возникновения аварийной ситуации (устройство ограждающих барьеров, заборов, установка соответствующих дорожных знаков и т.д.) с последующими ремонтными работами в максимально сжатые сроки:

- дефекты, влияющие на долговечность (дефекты гидроизоляции, недостаточность защитного слоя железобетонных конструкций, коррозия металла и бетона и т.п.). Эта группа дефектов со временем переходит в группу дефектов, влияющих на грузоподъемность;

- дефекты, влияющие на эстетическое восприятие сооружения (потеки при атмосферных осадках по фасадным элементам, неудовлетворительная окраска, мусор и т.п.).

Дефекты и повреждения первого предельного состояния, нарушающие эксплуатацию сооружения, относятся к опасным, подлежащим исправлению в первую очередь. Примерами

их могут служить подмыв опор моста, разрушение рабочих элементов пролетных строений и другие повреждения, ведущие к потере несущей способности сооружения.

Дефекты и повреждения второго предельного состояния, затрудняющие эксплуатацию, а также сокращающие срок службы сооружения, не столь опасны, и их исправление может быть отнесено на более дальний срок. К ним относятся: чрезмерное раскрытие трещин в растянутой зоне железобетонных и бетонных пролетных строений и опорах, коррозия стальных мостов и. т. п.

От качества эксплуатации во многом зависят надежная работа и срок службы сооружения. Так, деревянные мосты обычно служат не более 15-20 лет. Однако многие пролетные строения с фермами Гау-Журавского эксплуатируются уже более 70 лет.

Велика роль эксплуатации и в народнохозяйственном отношении. Мосты и трубы представляют собой сооружения большой стоимости, постройка их требует значительных материальных затрат. Хорошо организованная эксплуатация увеличивает срок службы сооружений и снижает затраты на ремонт.

Отсюда основная задача эксплуатации мостов и труб – обеспечение удобного и безопасного по ним движения, для чего необходимы повседневный уход и наблюдение за их состоянием, и своевременное исправление возникающих повреждений и дефектов.

1.3 Организация и содержание работ по эксплуатации

Основной хозяйственной и производственной единицей службы эксплуатации на дорогах являются дорожные участки (ДУ). Дорожный участок делится на дорожные дистанции (ДД) во главе с дорожными мастерами (ДМ), а дорожные дистанции – на ремонтерские обходы (Р). На магистральных автомобильных дорогах дорожные участки делят на дорожно-ремонтные пункты (ДРП), которым подчинены линейные мастера (ЛМ).

Линейный надзор и уход за дорогой, надзор за соблюдением правил пользования ею, а также охрана дорожных сооружений обеспечиваются ремонтерами или линейными мастерами. Ремонтные работы выполняются силами дорожно-ремонтных пунктов или дорожных дистанций.

Общее руководство дорожными службами осуществляется соответствующими министерствами и управлениями.

Содержание и ремонт искусственных сооружений обычно выполняется тем же персоналом, что и содержание и ремонт дороги, и только на особо сложных по содержанию и ремонту мостах создаются специальные мостовые дистанции (МД) во главе с мостовыми мастерами.

Городские дороги (улицы) и сооружения на них находятся в ведении соответствующих отделов горисполкомов с общим подчинением министерству коммунального хозяйства республики. В больших городах эксплуатация мостов сосредоточена в специальных трестах или управлениях.

В комплекс эксплуатируемого искусственного сооружения входят все элементы его конструкции, подходы к нему в пределах затопления пойм высокими водами, регуляционные и берегоукрепительные сооружения, а также прилегающие участки русел рек и водотоков.

В обязанности служб, ведающих искусственными сооружениями, входят: технический учет и ведение технической документации, надзор и уход за сооружениями, и их ремонт.

Технический учет сооружений необходим для определения состояния и степени износа каждого сооружения и для планирования его ремонта, усиления или переустройства.

Первичным материалом, характеризующим сооружение, является исполнительная документация, составляемая при постройке сооружения. В состав исполнительной документации входят акты приемки в эксплуатацию сооружения, исполнительные чертежи, акты на скрытые работы, документы, характеризующие качество строительных материалов и конструкций заводского изготовления, а также данные о проектной несущей и пропускной способности сооружения. Вся исполнительная документация передается эксплуатирующим органам строительными организациями при сдаче сооружения в эксплуатацию.

Периодические осмотры при нормальном состоянии сооружения проводят ежегодно после пропуски весенних вод и окончания ремонтных работ. При периодических осмотрах детально осматривают все элементы сооружения с инструментальной съемкой плана и профиля главных ферм пролетных строений, промеряют глубины русел рек, измеряют размывы у опор, выявляют дефекты конструкций и назначают меры для их устранения, проверяют качество выполненных ремонтных работ, контролируют работу постоянного надзора. Эти осмотры проводят начальник или главный инженер дорожного участка вместе с мостовым или дорожным мастером.

Специальные осмотры проводят с целью проверки состояния сооружения и его грузоподъемности. При этом, кроме подробного осмотра всех конструкций сооружения и инструментальной съемки, обычно производят статические и динамические испытания, привлекая для этой цели мостоиспытательные станции или научно-исследовательские организации. Специальные осмотры обязательны при сдаче-приемке сооружения в эксплуатацию после постройки, капитального ремонта, усиления или реконструкции, а в дальнейшем через следующие промежутки времени: деревянных мостов – через 3-4 года, стальных – через 6-8 и массивных – через 10-12 лет. При плохом или аварийном состоянии сооружения промежутки времени между специальными осмотрами сокращают. Результаты специальных осмотров оформляют отчетами и актами, в которых подробно отражают состояние сооружения и устанавливают режим его эксплуатации.

Осмотр сооружений, независимо от вида осмотра, проводят по жесткой схеме, т.е. строго придерживаясь приведенного ниже порядка.

Порядок осмотра мостового перехода:

- русло реки, поймы, подмостовая зона (для путепроводов);
- регуляционные сооружения (струенаправляющие дамбы, траверсы, набережные);
- стационарные смотровые приспособления (ходы, лестницы, люльки);
- опоры;
- опорные части;
- пролетные строения;
- мостовое полотно (перила, тротуары, колесоотбой, покрытие ездового полотна, гидроизоляция, деформационные швы, водоотвод, мачты освещения, коммуникации);

– подходы (насыпи, выемки, конуса, бермы, откосы, упорные призмы, лестницы, насаждения, ограждения, лотки и пр.) в пределах границ подтопления при расчетном уровне высоких вод (РУВВ).

Порядок осмотра, водопропускных, труб:

– входной и выходной оголовки (высотное положение по оси относительно дна лога водотока);

– тело трубы (просадки, швы между звеньями, состояние конструкций, заиливание);

– верховое русло (засорение);

– низовое русло (засорение, укрепление);

– верховой и низовой откосы земляного полотна в зоне трубы (размывы, укрепление);

– земляное полотно и дорожная конструкция над трубой (просадка, высота засыпки).

Для сохранения и продления срока службы эксплуатируемого сооружения его периодически ремонтируют. В зависимости от объема работ ремонты делят на капитальные, средние и текущие. К капитальным ремонтам относят: перестройку временных деревянных мостов на постоянные; усиление и реконструкцию мостов с доведением габаритов и грузоподъемности до норм, соответствующих категории дороги; замену паромных переправ, бродов, железнодорожных переездов мостами и путепроводами и другие аналогичные сложные работы.

К средним ремонтам относят: перестройку деревянных средних (длиной до 42 м) и малых мостов и труб; смену настилов, отдельных элементов главных ферм и балочной клетки; сплошную окраску и антисептирование и т. д. При текущих ремонтах, устраняют мелкие дефекты и повреждения, заменяют доски настилов, меняют отдельные элементы деревянных мостов, исправляют водоотводные средства и деформационные швы и т. д.

Средние сроки службы мостов и труб после ремонта (межремонтные сроки) могут быть приняты следующими (в годах):

Смена верхнего деревянного настила	1,5
То же, нижнего	6
Смена асфальтобетонного покрытия	18
То же, цементобетонного	30
Смена изоляции массивных пролетных строений	30-40
Замена конструкций (до 25%) деревянных мостов	4-8
Замена элементов металлических пролетных строений и заклепок (до 5%).....	30-40
Торкретирование поверхности массивных конструкций	40-50
Цементация массивных конструкции, устройство железобетонных оболочек, поясов и пр.....	50
Перекладка массивных конструкций.....	40-50
Смена мощений регуляционных сооружений.....	10-20

Во время ремонтных работ стремятся к минимальным ограничениям движения. В необходимых случаях движение переводят на объезд. На суходолах и небольших ручьях объезды делают непосредственно по грунту и вброд; на переходах через средние и большие реки и при заболоченных поймах для объезда устраивают временные мосты, а зимой – ледяные переправы. Устройство объездов значительно удорожает ремонт. Для безопасности движения

места ремонтных работ ограждают соответствующими знаками, а в сложных случаях, например при одностороннем движении, ставят регулировщиков.

Мосты и трубы, выполненные из различных материалов, в эксплуатационном отношении неравноценны. Наиболее усиленный надзор и частный ремонт необходимы на деревянных мостах, так как эти сооружения быстро изнашиваются, загнивают, часто повреждаются ледоходом. Стальные мосты требуют меньшего ухода и надзора. Однако сталь со временем теряет прочность, главным образом вследствие коррозии, с которой приходится вести постоянную борьбу. Наиболее долговечны каменные, бетонные и железобетонные мосты и трубы.

Годовые затраты на эксплуатацию автодорожных искусственных сооружений (в % от их строительной стоимости) в среднем составляют:

Деревянные мосты	3–5
Стальные мосты	0,8–1,5
Железобетонные мосты и трубы	0,3–0,5

1.4 Обеспечение безопасности движения и противопожарные мероприятия

Одна из основных задач линейного надзора – обеспечение безопасности движения, т. е. соблюдения правил движения и своевременного выполнения ряда предупредительных мероприятий.

Проезд по мостам разрешается только по проезжей части и на ширине, отведенной для каждого направления движения. Не разрешается перегрузка или выгрузка грузов, разворот автомобилей, их стоянка, ремонт и заправка. Вес и габаритные размеры транспортных единиц, а также скорость их движения должны соответствовать режиму, установленному для каждого сооружения. При ограничении движения у въезда на мост устанавливаются указатели наибольшей скорости и допускаемого веса машин. На мостах с ездой понизу, а также на путепроводах через автомобильные дороги следует указывать высоту габарита проезда.

Для безопасности движения большое значение имеет состояние поверхности проезжей части и тротуаров. Проезжую часть и тротуары следует содержать чистыми, зимой своевременно удалять снег и скалывать лед, в особенности весной, в начале таяния. Мусор, снег и лед лучше убирать уборочными машинами, и сбрасывая с моста, нужно следить, чтобы конструкции пролетных строений и опор не загрязнились.

При гололеде необходимо устанавливать в опасных местах предупредительные знаки, а на проезжую часть рассыпать песок. Применять для этой цели соли хлористого кальция или натрия не рекомендуется, так как соли вызывают интенсивную коррозию металла.

Неровная, волнистая поверхность покрытия, выбоины, колеи и другие аналогичные дефекты повышают динамическое воздействие на мост временных нагрузок, увеличивают износ автомобилей, снижают скорость и безопасность движения. Мелкие дефекты и повреждения покрытия нужно удалять в кратчайшие сроки силами линейного надзора, а при большом износе покрытие заменяют новым.

Тротуарные бордюры на мостах должны иметь достаточную высоту и надежно препятствовать наезду автомобилей на тротуары. Следует регулярно проверять состояние перил – их вертикальность, прочность прикрепления, надежность заполнения перильных решеток.

На подходах к мостам, кроме обычного ухода за проезжей частью дороги, необходимо содержать в исправном состоянии надолбы, направляющие брусья и другие ограждающие устройства, в особенности на участках, непосредственно прилегающих к мосту. Ограждающие устройства должны быть хорошо видны водителями автомобилей не только днем, но и в ночное время. Для этого ограждения окрашивают светоотражающими рефлектирующими красками и снабжают светоотражающими элементами (катафотами). Аналогичными мерами нужно выделять порталы мостов с ездой понизу, а также конструкции путепроводов.

При пропуске случайных тяжелых грузов необходимо проверить грузоподъемность моста и, если она окажется недостаточной, усилить его. Перед пропуском этих грузов следует осмотреть мост и при наличии дефектов устранить их. В ряде случаев пропуск грузов возможен и без усиления, если установить соответствующий режим движения: ограничить скорость, выделить полосу движения по ширине проезда и т. д. Иногда перевозимый груз удается распределить на большее число осей, перегружая его на сцепы из трейлеров. Во всех случаях прохода тяжелых грузов все остальное движение по мосту, включая пешеходное, запрещается. После пропуска грузов конструкция моста также должна быть тщательно осмотрена.

Проход толпы в ногу по мостам не разрешается, так как могут возникнуть недопустимые колебания пролетных строений.

Для борьбы с пожарами деревянные мосты и мосты из огнестойких материалов, но с деревянной проезжей частью, обеспечивают противопожарным инвентарем: кадками с водой, ящиками с песком, огнетушителями, ведрами, баграми и пр. Противопожарный инвентарь, располагают в уровне проезжей части за перильными ограждениями на специальных площадках.

В противопожарные обязанности линейного персонала входит:

- содержание в полной исправности инвентарь;
- недопущение разведения огня на расстоянии ближе 100 м от моста или трубы, а также прохода плотов под деревянными мостами с разведенными на них кострами;
- наблюдение за уборкой щепы и стружек при ремонтных работах;
- выкашивание сухой травы под пойменными пролетами мостов;
- принятие мер к тушению пожара при его возникновении.

На мостах через судоходные реки должны быть установлены навигационные знаки согласно указаниям управлений речного флота. Содержание навигационных знаков в исправном состоянии обеспечивает линейный персонал, ведущий постоянный надзор.

Для оказания помощи утопающим полагается иметь на мостах спасательные средства: лодки, а также спасательные круги и пояса, подвешенные к перилам на крючках у середины тех пролетов, где глубина воды превышает 1,2-1,5 м. Персонал постоянного надзора обязан оказывать первую помощь пострадавшему.

1.5 Обеспечение доступа к конструкциям моста

Для осмотра, текущего содержания и ремонта мостов необходимы приспособления и устройства, обеспечивающие безопасный доступ к элементам пролетных строений и опор. Эти устройства носят название смотровых приспособлений. Постоянные смотровые приспособ-

собления являются неотъемлемой частью сооружения и осуществляются при строительстве моста. К ним относятся постоянные лестницы, проходы вдоль поясов главных ферм, смотровые тележки и пр. Временные приспособления делают в виде съемных настилов, приставных лестниц, люлек и т. д. Ими пользуются по мере надобности, в остальное же время их хранят как инвентарь.

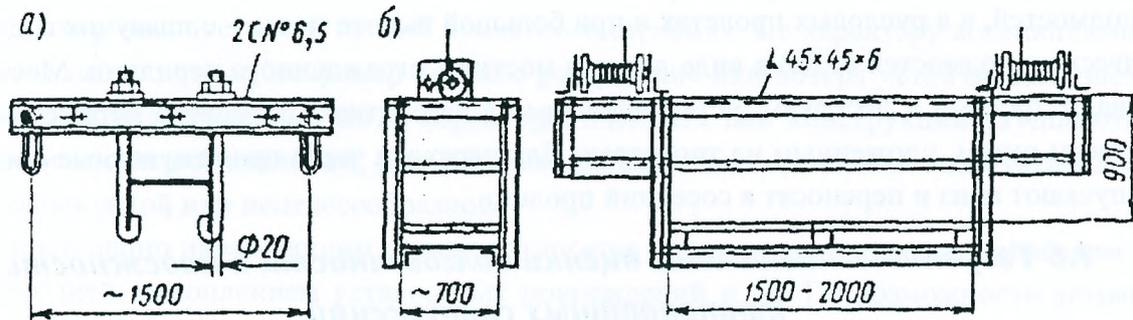


Рисунок 1.1 Приспособление для осмотра стальных ферм.

Опоры обычно осматривают с приставных лестниц, с лодок или других плавучих средств, на которые устанавливают вышки с площадками; осматривать и ремонтировать опоры удобно с люлек, подвешенных к пролетному строению.

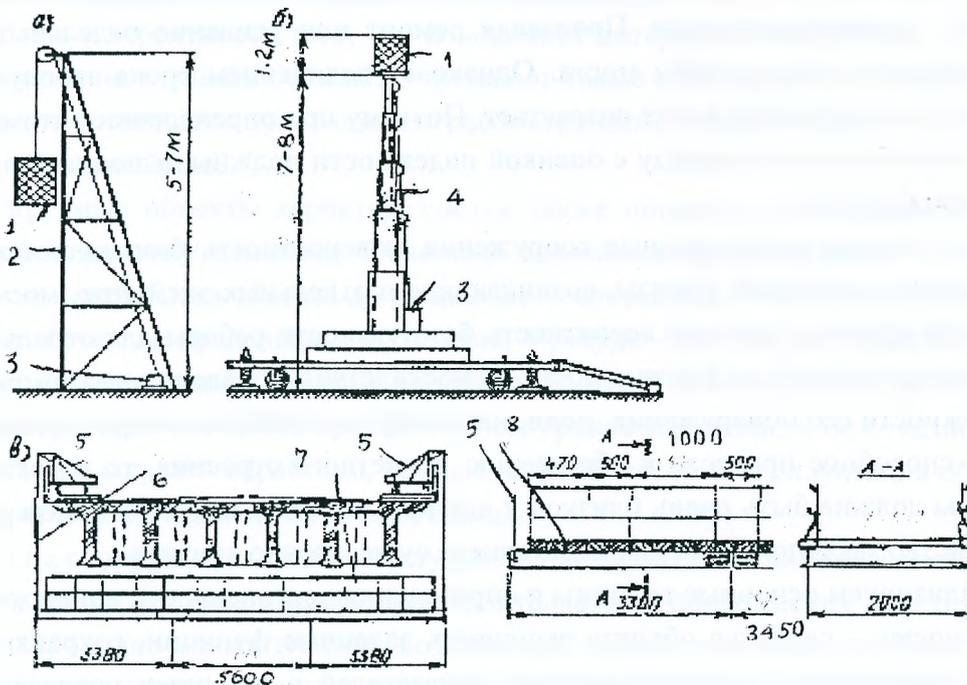


Рисунок 1.2 Передвижные смотровые приспособления: 1 – люлька размером 1,0x0,6x0,7 м; 2 – копер из стальных труб диаметром 50 и 25 мм; 3 – лебедка; 4 – телескопическая вышка; 5 – вагонетка с контргрузом и лебедкой; 6 – тросы; 7 – мостик; 8 – настил.

Простейшим приспособлением для осмотра и ремонта стальных пролетных строений являются люльки (рис. 1.1б), которые подвешивают к переносным балкам (рис. 1.1а) из

швеллеров, закрепляемым за пояс фермы фасонными болтами; для подъема и опускания на люльках устанавливают ручные лебедки грузоподъемностью 0,25-0,5 т. Для работ, производимых с проезжей части мостов, а также со льда в русле рек и с грунта в пойменных пролетах, применяют люльки, закрепленные на легких копрах (рис. 1.2а) и телескопических вышках (рис. 1.2б); такие вышки удобно устанавливать на шасси грузовых автомобилей.

Менее всего приспособлены для осмотра железобетонные и каменные пролетные строения. Их поверхности осматривают с приставных лестниц, телескопических вышек легких подмостей, а в русловых пролетах и при большой высоте моста – с плавучих средств или с подвесных подмостей (1.2в) в виде легкого мостика, огражденного перилами. Мостик подвешивают тросами к лебедкам, установленным на вагонетках. Вагонетки перемещаются по рельсовым путям, уложенным на тротуарах. Для перехода через промежуточные опоры мостик опускают вниз и переносят в соседний пролет.

1.6 Теоретические основы оценки долговечности и надежности транспортных сооружений

Для мостов основной показатель долговечности – срок службы – календарная продолжительность эксплуатации до возникновения предельного состояния. Различают срок службы до первого капитального ремонта (усиления), между капитальными ремонтами, до списания (замены).

Мост представляет собой механическую систему совместно действующих элементов. Эта система – ремонтпригодная. Произведя ремонт или усиление отдельных элементов, можно увеличивать срок службы моста. Однако с увеличением срока эксплуатации стоимость ремонта и содержания также возрастает. Поэтому при определении оптимального срока службы элементов моста наряду с оценкой надежности должны выполняться тщательные экономические расчеты.

Мосты – весьма ответственные сооружения, и вероятность безотказности их работы должна быть очень высокой. Отказы, возникающие в отдельных элементах моста, различны по своим последствиям, поэтому вероятность безотказности работы для отдельных элементов моста должна задаваться в зависимости от последствий появления рассматриваемого отказа и возможности его обнаружения. Если, например, под отказом подразумевается хрупкое разрушение, способное привести к обрушению пролетного строения, то вероятность безотказной работы должна быть очень близкой к единице, а если в качестве отказа рассматривается расстройство заклепок, то ее значение можно существенно снизить.

Проанализируем основные термины и определения долговечности и надежности.

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Надежность объекта обуславливается его безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью. *Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени. *Работоспособность* – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции с установленными параметрами. *Наработка* – продолжительность или объем работы объекта, измеряемый в еди-

ницах времени, циклах, километрах и др. *Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. *Ремонтопригодность* – приспособленность объекта к предупреждению, обнаружению и устранению отказов. Под устранением отказов подразумевается восстановление работоспособности. *Отказ* – событие, в результате которого нарушается работоспособность. Отказом считается не только повреждение или разрушение конструкции или ее элементов, но и недопустимые отклонения параметров от расчетных или заданных значений, например недопустимый прогиб пролетного строения. По характеру возникновения отказы делят на *внезапные*, например хрупкое разрушение или потеря устойчивости элемента, и *постепенно нарастающие*, когда параметры элемента или конструкции ухудшаются постепенно и достигают значений, при которых дальнейшая нормальная эксплуатация становится невозможной или нецелесообразной.

К постепенно нарастающим отказам относятся отказы, вызванные механическим износом, коррозией, накоплением усталостных повреждений и др. По возможности устранения отказы бывают *устраняемые* – можно устранить, произведя ремонт, и *неустраняемые* – ликвидировать путем ремонта невозможно или невыгодно. Различают *полный отказ*, при котором, например, по мосту нельзя пропустить подвижную нагрузку, или *частичный*, при котором можно пропустить нагрузку с определенными ограничениями, например по весу или по скорости движения.

Надежность характеризуется рядом показателей, важнейший из них – вероятность безотказной работы – вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникает отказа. Учитывают также интенсивность отказов, т.е. условную вероятность возникновения отказа для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого отказа не было.

Ремонтируемые объекты характеризуются также показателем *наработка на отказ* – средняя наработка между отказами. Основные показатели долговечности – ресурс и срок службы. *Ресурс* – наработка объекта до предельного состояния. Различают *средний ресурс*, т.е. средняя наработка до предельного состояния; *У-ресурс* – ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число $У$ процентов изделий данного типа. Таким образом, ресурс характеризует долговечность при выбранном уровне вероятности безотказной работы.

Назначенный ресурс – наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его состояния.

Дефект на сооружении – любое отступление от проекта, не согласованное с проектной организацией, несоответствие нормам при строительстве и повреждения конструкций от механических и природно-климатических воздействий, препятствующие нормальной эксплуатации в настоящий момент или в ходе дальнейшей эксплуатации.

Изменение напряжений в элементах пролетных строений при пропуске нагрузок представляет собой широкополосный случайный процесс, характеристики которого зависят не только от типа подвижных нагрузок, которые в течение длительного срока эксплуатации непрерывно меняются, но и от параметров линий влияния элементов. В процессе эксплуатации также могут значительно изменяться и характеристики сопротивления усталости элементов. Все эти изменения носят случайный характер, поэтому оценка усталостной долговечности и

надежности элементов – сложная и трудоемкая задача, для решения которой требуется установление закономерностей изменения различных характеристик, накопление надежных и удобных для расчета статистических данных и т. п.

На основании феноменологической модели условие безотказной работы элемента моста при введении меры повреждения можно представить в виде

$$Y \leq Y_{\text{он}},$$

где Y – расчетное значение меры повреждения; $Y_{\text{он}}$ – величина меры повреждения, при которой обеспечивается заданная надежность.

На основании статистической обработки данных усталостных повреждений (отказов) элементов эксплуатируемых мостов получена зависимость между предельной величиной меры повреждения Y_0 , при которой появлялась усталостная трещина, и вероятностью ее появления $P(Y_0)$. Предельная мера повреждения Y_0 вычислялась по методике, по которой определялось расчетное значение меры повреждения Y . Значения Y_0 и соответствующая им вероятность безотказной работы по выносливости приведены ниже.

Y_0	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
$P(Y_0)$	0,9955	0,9924	0,9845	0,9712	0,9515	0,9236	0,8830	0,8289	0,7636
Y_0	0,65	0,70	0,75						
$P(Y_0)$	0,6844	0,5940	0,5000						

Надежность элемента по выносливости оценивается сравнением расчетной меры повреждения Y с $Y_{\text{он}}$. Учитывая высокие требования к безопасности эксплуатации мостов и характер развития усталостных трещин, вероятность безотказной работы элементов металлических пролетных строений принимается не ниже 0,98, что обеспечивается при $Y \leq 0,3$. Можно определить $Y_{\text{он}}$ для любой вероятности безотказной работы элемента.

Долговечность элементов мостов определяют из условия равенства расчетной меры повреждения Y , полученной от суммарного воздействия нагрузки с начала эксплуатации, и $Y_{\text{он}}$, соответствующей заданной вероятности безотказной работы элемента.

Для оценки надежности элемента необходимо знать вероятность безотказной работы $P(t)$ в пределах заданного периода времени t . Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность появления отказа $Q(t)$ связаны между собой зависимостью.

$$P(t) = 1 - Q(t),$$

где $P(t)$ является функцией надежности.

Вероятность отказов и безотказной работы, имея плотность распределения вероятностей отказов (производную от функции распределения отказов)

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

Тогда

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt,$$

а интенсивность отказов

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)}.$$

Мосты относятся к объектам, в которых могут возникать как внезапные отказы, так и постепенно нарастающие. Функцию надежности для них можно определить через вероятность внезапных отказов $Q_a(t)$ и постепенно нарастающих отказов $Q_n(t)$

$$P(t) = [1 - Q_a(t)][1 - Q_n(t)] = P_a(t)P_n(t).$$

Это позволяет более удобно представлять наработку как случайную величину. Установлено, что $P_a(t)$ с достаточно хорошим приближением соответствует экспоненциальному закону распределения (рис 1.3).

$$P_a(t) = e^{-\lambda t}$$

или распределению Вейбулла

$$P_a(t) = e^{-\lambda t^\alpha},$$

где λ и α – некоторые параметры.

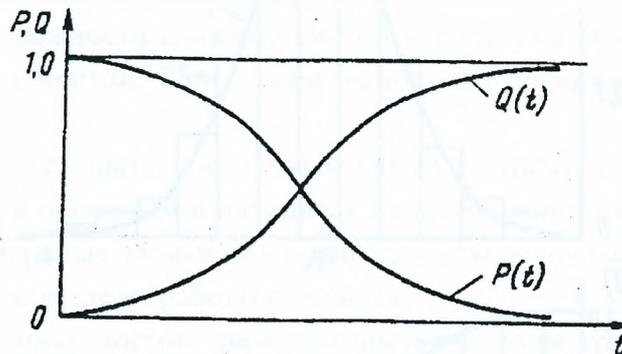


Рисунок 1.3 Графики функций $P(t)$ и $Q(t)$.

Для постепенно нарастающих отказов, например связанных с износом, наиболее часто подходит нормальный закон распределения (рис. 1.4). Плотность распределения вероятностей при нормальном законе имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2}},$$

где m_t , σ_t – математическое ожидание (среднее значение случайной величины) и среднее квадратичное отклонение (стандарт).

Имея распределение $P(t)$ по нормальному закону, легко получить вероятность отказа, используя значения m_t и σ_t . Так, вероятность отказа за период времени до $t = m_t - 3\sigma_t$ равна 0,135%, а до $t = m_t - 2\sigma_t$ она равна 2,175%.

Нередко распределение наработки как случайной величины подчиняется логарифмически нормальному закону. Логарифм случайной величины распределяется по нормальному закону и плотность распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{\lg e}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \lg t_0)^2}{2\sigma_t^2}},$$

где n – число наблюдений (опытов); t_i – наработка до i -го отказа;

$$\lg t_0 = \frac{\sum \lg t_i}{n},$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (\lg t_i - \lg t_0)^2}{n-1}},$$

где $\lg t_0$ и σ_t – несмещенные оценки для математического ожидания и среднего квадратичного отклонения.

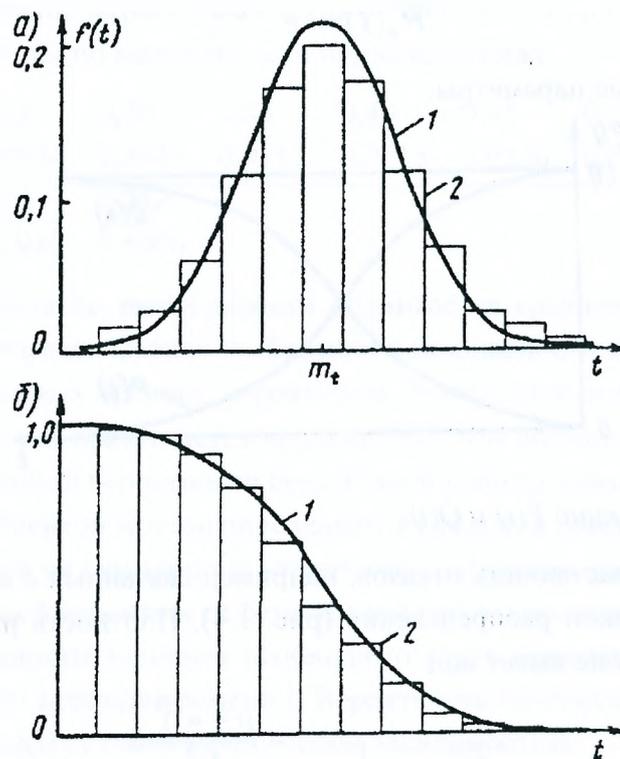


Рисунок 1.4 Распределение по нормальному закону: а – графики плотности распределения; б – графики функции надежности; 1 – теоретические; 2 – по опытным данным.

Логарифмически нормальное распределение обычно лучше чем нормальное описывает результаты усталостных разрушений. В зависимости от природы отказов, характера их возникновения связь между возможными значениями отказов как случайных величин и соответствующими вероятностями может подчиняться и другим законам распределения, например Релея, Пуассона, Коши и др.

Рассмотренные выше способы оценки вероятности безотказной работы можно отнести отдельно к каждому элементу, узлу или к системе в целом, если известны статистические данные об их отказах.

Поэтому на практике оценку надежности системы производят расчетным путем по надежности отдельных ее элементов и узлов. В мостах отказ любого элемента практически может привести к отказу сооружения в целом. С точки зрения надежности такие системы рассматривают как системы из последовательно соединенных элементов.

Вероятность безотказной работы таких систем равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных элементов

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

При одинаковой надежности элементов формула примет вид –

$$P_c(t) = [P_i(t)]^n.$$

Таким образом, надежность системы в значительной степени зависит от числа элементов и надежности входящих в эту систему элементов. Например, если система состоит из 10 элементов, и каждый элемент имеет вероятность безотказной работы 0,99, то вероятность безотказной работы системы будет равна $0,99^{10}=0,9043$.

Для повышения надежности сложных систем используют резервирование путем включения дублирующих элементов. При отказе основного элемента дублирующий элемент выполняет его функции.

Резервирование может быть постоянным (нагруженным), когда резервные элементы постоянно подключены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы, и ненагруженным, когда резервные элементы в период работы основных элементов отключены и включаются только при выходе из работы основных.

В пролетных строениях мостов примером постоянного резервирования может служить усиление, когда элементы с низкой надежностью усиливают с таким расчетом, что после выключения из работы усиленного элемента (например, вследствие развития трещин в сварном элементе) поставленный при усилении элемент будет выполнять функцию разрушенного элемента.

При постоянном резервировании резервные элементы подключают параллельно основным. Вероятность отказа всех (основного и резервных) элементов по теореме умножения вероятностей

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t),$$

а вероятность безотказной работы

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)].$$

где Q_i , P_i – вероятность отказа и вероятность безотказной работы i -го элемента.

Этот способ дает возможность значительно повышать надежность системы, состоящей из недостаточно надежных элементов. Например, если вероятность безотказной работы каждого элемента системы (одного основного и одного резервного) равна 0,9, то вероятность безотказной работы системы из двух элементов $P(t)=1-(0,1)^2=0,99$.

Мера повреждения определяется на основании гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений: повреждение, вызванное рассматриваемым циклом изменения напряжений, предполагается не зависящим от состояния элемента в данный момент и предшествующей истории нагружения, поэтому каждое последующее повреждение суммируется с предыдущим. Согласно этой гипотезе при нагружении, представляющем набор из групп однородных циклов нагружения ($\sigma_{\max i} = \text{const}$; $p_i = \text{const}$), мера повреждения

$$\gamma = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

При непрерывном изменении экстремальных напряжений циклов и постоянном коэффициенте асимметрии циклов r (однопараметрический процесс нагружения) мера повреждения

$$\gamma = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N}$$

где n , n_i – пройденное число циклов с максимальными напряжениями цикла – σ_{\max} и $\sigma_{\max i}$; N , N_i – число циклов до разрушения с максимальными напряжениями σ_{\max} и $\sigma_{\max i}$;

$$dn = n_0 f(\sigma) d\sigma,$$

где n_0 – суммарное число всех циклов нагружения; $f(\sigma)$ – функция плотности распределения вероятностей σ .

В рассматриваемой методике принято, что циклы, у которых максимальные напряжения ниже определенного уровня, не вызывают накопления усталостных повреждений. Число циклов, вызывающих усталостные повреждения,

$$n_c = n_0 \int_{\sigma'}^{\infty} f(\sigma) d\sigma,$$

где σ' – максимальное напряжение цикла, ниже которого не происходит накопления усталостных повреждений.

Отсюда выражение для определения меры повреждения при однопараметрическом режиме нагружения имеет вид –

$$\gamma = \frac{n_0}{N_{оп}} \int_{\sigma'}^{\infty} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{оп}} \right)^m f(\sigma) d\sigma,$$

где m – характеристика наклона кривой усталости в логарифмических координатах к оси $\lg N$.

2 Содержание, осмотр и ремонт железобетонных мостов

2.1 Содержание железобетонных, бетонных и каменных мостов

В настоящее время сборный и предварительно напряженный железобетон является основным для пролетных строений автодорожных мостов. Бетонные и каменные пролетные строения строят редко. Однако арочные мосты, из бетона и камня, а также трубы постройки прошлых лет еще сохранились и успешно эксплуатируются на дорогах и в городах.

Опоры большинства современных мостов выполнены из бетонной монолитной кладки, однако в последние годы и здесь все чаще применяют сборные и сборно-монолитные конструкции. Опоры старых мостов, как правило, возведены из каменной бутовой кладки. Железобетон применяют в надводных частях быков, в устоях, а также в опорах малых, преимущественно свайно-эстакадных мостов.

Железобетонные, бетонные и каменные сооружения наиболее долговечны, и для их содержания требуются небольшие затраты. Однако и эти массивные сооружения с течением времени теряют свою несущую способность. Прочность и долговечность уменьшается, прежде всего, под влиянием атмосферных факторов, а также воды, проникающей в кладку. Разрушение протекает интенсивно, если внешняя среда агрессивна по отношению к бетонной и каменной кладке. В железобетонных конструкциях опасна коррозия арматуры, развивающаяся при действии на арматуру вредных газов и воды, попадающих через трещины или рыхлый и тонкий защитный слой.

Долговечность этих сооружений в первую очередь зависит от качества их постройки. Недостаточная прочность строительных материалов, плохая укладка бетонной смеси, нарушения технологии заводского изготовления сборных элементов и ряд других производственных дефектов приводят к резкому сокращению срока их службы.

Эксплуатация массивных мостов осложняется тем, что дефекты и повреждения, возникающие в них, скрыты и трудно поддаются выявлению, а исправление повреждений и дефектов в большинстве случаев не может быть выполнено силами текущего надзора и требует сложных ремонтных работ. Поэтому при содержании таких сооружений основное внимание следует уделять предупреждению дефектов, своевременному выявлению их и наблюдению за ними.

При содержании массивных пролетных строений необходимо в первую очередь предохранять конструкции от вредного воздействия воды, поддерживая в исправном состоянии покрытия проезжей части, водоотводные устройства и гидроизоляцию. Вода, проникая в толщу кладки, растворяет и вымывает вяжущие компоненты бетонов и растворов, замерзая, увеличивается в объеме и разрывает кладку, создавая среду, благоприятную для интенсивной коррозии арматуры. В результате снижаются прочность и срок службы сооружения.

Для стока воды поверхность проезжей части и тротуаров должна иметь достаточные продольные и поперечные уклоны, быть ровной, без трещин, выбоин и других повреждений. Особенно вредны разрушения покрытия около тротуарных бордюров, водоотводных труб и деформационных швов, где изоляционный слой легко может быть обнажен и порван. Содержанию покрытия следует уделять особое внимание в мостах без оклеечной гидроизоляции, в

которых защита конструкций от увлажнения в большой степени зависит от состояния одежды проезжей части.

Водоотводные трубы должны быть прочно заделаны в кладку, а количество их – достаточным для быстрого отвода воды. Вода из труб не должна попадать на нижележащие конструкции; в необходимых случаях трубы нужно удлинять или устанавливать водоотводные лотки. Трубы и лотки следует систематически прочищать, не допуская скопления в них грязи и льда.

При некачественных строительных работах, проектных ошибках, неудовлетворительном содержании моста часто и деформационные швы находятся в плохом состоянии.

Нередко в швах можно обнаружить доски опалубки, строительный мусор и другие предметы, ограничивающие свободные перемещения пролетных строений. В этих случаях в конструкциях, примыкающих к шву, появляются сколы бетона, неподвижные опорные части сдвигаются со своих мест, в пролетных строениях и опорах возникают дополнительные усилия, не учитываемые в проекте.

Часто закрытые швы бывают заполнены не эластичной битумной мастикой, а асфальтобетоном, и покрытие трескается вдоль швов. При отсутствии или износе компенсаторов мастика вытекает из шва и зазор между пролетными строениями оказывается незаполненным. В открытых швах, перекрытых стальными листами, часто наблюдается неплотное прилегание листов, расположение их не в одном уровне с поверхностью проезжей части и разрушение примыкающего к шву дорожного покрытия. Водоотводные лотки под деформационными швами часто отсутствуют или заполнены мусором и грязью.

Все эти дефекты швов вызывают удары при проезде автомобилей через швы, у швов скапливается вода и грязь. Проникая через шов, вода увлажняет концевые участки пролетных строений, опорные части и подферменные площадки опор.

Для обеспечения нормальной работы пролетных строений из швов удаляют строительный мусор и другие предметы, швы и водоотводные лотки систематически очищают от грязи и мусора, а изношенные части своевременно заменяют новыми. Если мерами текущего содержания не удастся обеспечить исправное состояние швов, то их ремонтируют или переустраивают, применяя более совершенные конструкции.

Основная роль в защите пролетных строений от увлажнения принадлежит изоляционному слою. Даже при небольших повреждениях изоляции вода увлажняет значительные объемы кладки, нанося существенный вред сооружению.

Наиболее часто повреждения изоляционного слоя наблюдаются у тротуарных бордюров, водоотводных труб и деформационных швов. В этих местах изоляция в наибольшей степени подвержена механическому износу и часто бывает уложена некачественно. Повреждения изоляции обнаруживают по появляющимся после дождей мокрым пятнам на нижней поверхности элементов пролетного строения, например плиты проезжей части, а также – по белым потекам извести. Местные небольшие повреждения изоляции необходимо устранять при первой возможности, полную смену изоляции – по мере надобности во время капитального ремонта проезжей части.

Часто в пролетных строениях наблюдаются трещины в бетоне. Трещины, даже с небольшим раскрытием, становятся очагами дальнейшего, более глубокого разрушения клад-

ки; в железобетонных конструкциях через них проникают к арматуре вода и вредные газы, и арматура ржавеет. Особенно опасны трещины в предварительно напряженных конструкциях с арматурой из тонкой высокопрочной проволоки, слабо сопротивляющейся коррозии – площадь сечения проволок быстро уменьшается при ржавлении. Образование трещин, их вид и размеры зависят от многих причин. Неодинаково и влияние трещин эксплуатационные показатели конструкций – несущую способность и долговечность.

Рассмотрим наиболее характерные типы трещин, возникающих в эксплуатируемых балочных пролетных строениях. *Усадочные трещины 1* (рис. 2.1) возникают обычно в поверхностных слоях бетона из-за неравномерности процесса усадки. Появлению этих трещин способствует чрезмерно высокое содержание цемента в бетонной смеси, стесненность усадки, вызванная конструктивной формой, видом армирования и др. Характерный признак усадочных трещин – хаотическое их расположение, небольшая длина и раскрытие. Усадочные трещины могут развиться в силовые трещины. *Наклонные трещины 2* в стенках балок образуются в основном от действия главных растягивающих напряжений. Эти трещины особенно опасны в предварительно напряженных пролетных строениях, так как могут значительно снизить их грузоподъемность. Оценка снижения грузоподъемности определяется расчетом. *Продольные трещины* в местах сопряжения плиты балластного корыта со стенками балок 3 относятся к категории опасных, так как значительно снижают несущую способность пролетного строения. Это нужно учитывать при оценке его грузоподъемности. Одна из главных причин образования этих трещин – нарушения в технологии изготовления пролетных строений. *Поперечные трещины в плите 4* вызываются, главным образом, перетяжкой нижней продольной арматуры и изгибающими моментами, создаваемыми при установке балок кранами. В простых разрезных балках в процессе эксплуатации постоянные и временные нагрузки способствуют закрытию этих трещин.

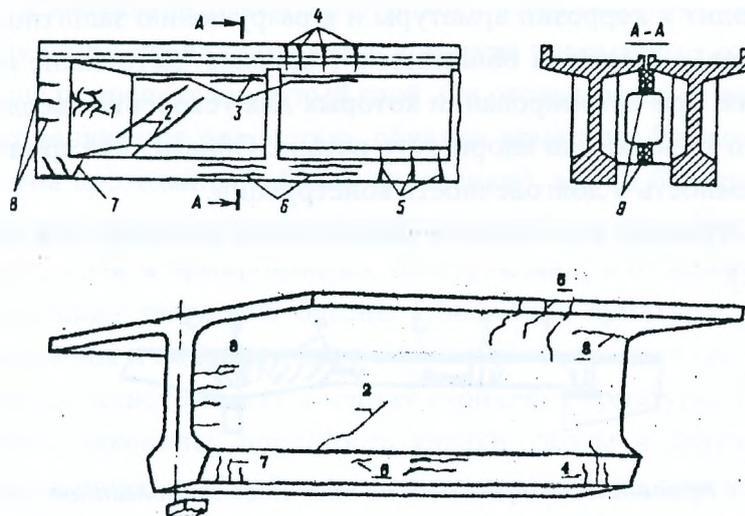


Рисунок 2.1 Типы трещин в балочных пролетных строениях: 1 – усадочные; 2 – наклонные; 3 – продольные в местах сопряжения плиты со стенкой; 4 – поперечные в плите; 5 – поперечные в нижнем поясе; 6 – продольные в нижнем поясе; 7 – в зонах примыкания опорных частей; 8 – горизонтальные на торцовом участке; 9 – в зонах омоноличивания.

Поперечные трещины в нижних растянутых поясах предварительно напряженных пролетных строений 5 обычно свидетельствуют о недостаточном натяжении напрягаемой арматуры, значительных потерях предварительного напряжения из-за усадки, ползучести бетона и нарушения нормальной работы анкерных устройств. Эти трещины не снижают расчетной несущей способности пролетного строения, но могут способствовать развитию коррозии арматуры и тем самым снижать его долговечность. Продольные трещины в предварительно обжатых поясах 6 появляются в течение первых лет эксплуатации. Образование их вызвано поперечными деформациями, возникающими при чрезмерном обжатии бетона, и влиянием стесненной усадки. Опасность таких трещин – возникновение и интенсивное развитие коррозии арматуры. Коррозия арматуры вследствие увеличения объема продуктов коррозии и создания по этой причине внутреннего давления приводит к дальнейшему раскрытию продольных трещин, ускоряя процесс разрушения. Горизонтальные трещины на торцовых участках пролетных строений 8 обычно возникают под действием местных напряжений, вызванных силами предварительного напряжения арматуры. Развитие трещин этого типа наблюдается в начальный период эксплуатации. Трещины в зонах примыкания опорных частей 7 – следствие конструктивных недостатков опорных узлов пролетных строений в сопряжении с опорными частями (сосредоточение анкеров, короткий опорный лист и др.). На развитие этих трещин существенное влияние оказывает работа опорных частей. При нарушении работы подвижных опорных частей возникают дополнительные усилия, способствующие росту этих трещин. Неплотное опирание пролетного строения на опорные части может приводить к значительным динамическим воздействиям, ускоряющим процесс трещинообразования. Нередко в зонах омоноличивания сборных конструкций появляются трещины 9.

При недостаточной толщине защитного слоя и низком качестве бетона влага проникает к арматуре. Это приводит к коррозии арматуры и к разрушению защитного слоя, в результате чего он отслаивается, а арматура обнажается. Наиболее часто такие повреждения встречаются в конструкциях, при бетонировании которых для ускорения твердения бетона вводили добавки хлористого кальция или хлористого натрия. Обнаженная арматура быстро ржавеет, снижая грузоподъемность и долговечность конструкции.

Для пролетных строений из обычного монолитного железобетона характерны следующие дефекты (рис. 2.2).

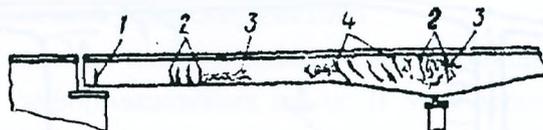


Рисунок 2.2 Дефекты в пролетных строениях из обычного монолитного железобетона.

Помимо рассмотренных видов трещин, в бетонных и железобетонных пролетных строениях часто наблюдаются трещины в швах бетонирования и омоноличивания сборных конструкций

Швы бетонирования располагаются между секциями при секционном бетонировании монолитных балочных, рамных и арочных мостов, а также в местах вынужденных перерывов

укладки бетонной смеси. В результате неодинаковой усадки бетонов разного возраста в этих швах возникают трещины, как правило, не опасные для сооружения.

Сборные конструкции омоноличивают при помощи «мокрых», «сухих» и «клееных» стыков. В «мокрых» стыках (рис 2.3) наблюдаются *сквозные трещины 9* по контакту блоков с бетоном омоноличивания *10*. Наличие таких трещин вызывает коррозию арматуры и нарушает монолитность конструкции. *Трещины 9* можно наблюдать в стыках диафрагм, в продольных стыках плит проезжей части и т.д. В «сухих» стыках *11* конструкций с поперечным членением развиваются трещины *12* в торцах сборных элементов. Эти трещины направлены нормалью к стыкам, достигают ширины 0,15-0,2 мм и со временем растут. Причина появления *трещин 12* – концентрация напряжений вследствие неполного совпадения микрорельефа торцов стыкуемых элементов. Значительное развитие трещин в стыках может стать опасным для сооружения. В «клееных» стыках, примененных на ряде мостов в последние годы, трещины не наблюдаются.

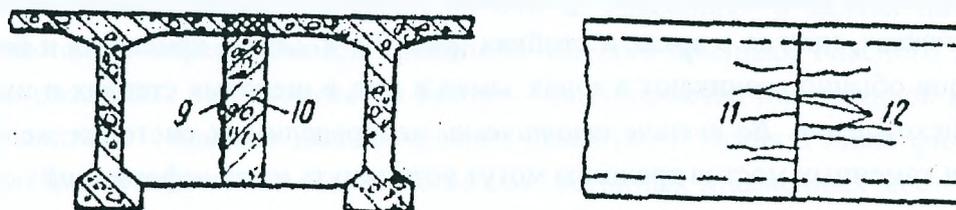


Рисунок 2.3 Дефекты в пролетных строениях.

От коррозии арматура в бетоне защищена защитным слоем, который должен быть плотным и достаточной толщины. Однако часто толщина этого слоя оказывается заниженной в результате смещения арматурного каркаса при укладке бетонной смеси, а при недостаточном вибрировании и вытекании цементного молока через опалубку защитный слой получается рыхлым. В результате проникания влаги арматура покрывается ржавчиной и в процессе коррозии еще больше разрушает защитный слой. Он отслаивается от остальной массы бетона и в конце концов отваливается полностью, обнажая арматуру. Коррозия арматуры и разрушение защитного слоя протекают особенно интенсивно, если в бетонную смесь были введены добавки хлористых солей (хлористого натрия или кальция). Несмотря на запрещение применять хлористые соли в армированных конструкциях, в отдельных случаях их все же применяют для ускорения твердения бетона. Обнажения арматуры снижают прочность и долговечность сооружения и недопустимы в нормальных условиях эксплуатации.

В железобетонных конструкциях в местах скопления арматуры часто наблюдаются наружные и внутренние раковины, пористость кладки, сколы и другие дефекты. Раковины уменьшают рабочую площадь сечений, в них скапливается вода, постепенно разрушая бетон. Пористость кладки – признак низкой ее прочности. *Сколы 13* бетона значительной величины наблюдается под опорными частями в консольных выступах консольно-балочных мостов (рис. 2.4).

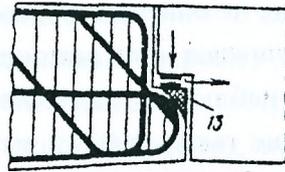


Рисунок 2.4 Дефекты консольных опорных выступов.

Густое армирование консоли затрудняет качественную укладку бетонной смеси. Кроме этого, на консолях часто устанавливают тангенциальные опорные части, и при больших вертикальных давлениях создаются значительные силы трения, препятствующие температурным перемещениям пролетного строения. В результате бетон скалывается полностью, разрушая опорные площадки.

В арочных железобетонных пролетных строениях трещины часто образуются в подвесках и затяжках, иногда в арках и стойках (рис. 2.5 и 2.6). В каменных и бетонных арочных мостах они обычно возникают в зонах замка и пят, в щечковых стенках и имеют температурное происхождение. Во внешне статически неопределимых системах железобетонных, бетонных и каменных мостов трещины могут возникнуть из-за деформаций оснований опор.

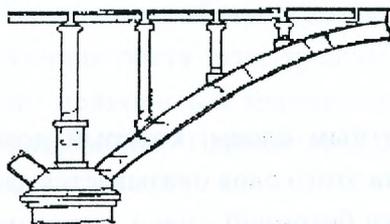


Рисунок 2.5 Трещины в сборных арочных пролетных строениях.

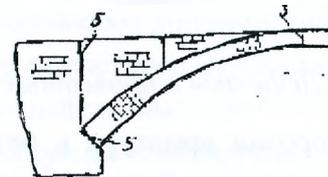


Рисунок 2.6 Трещины в массивных арочных пролетных строениях.

К дефектам пролетных строений следует отнести и отклонения от проектных размеров и проектного положения конструкций. В диафрагменных пролетных строениях, преимущественно построенных в начальный период применения сборного железобетона, часто можно наблюдать несовпадение в плане полудиафрагм смежных балок. Не всегда строго выдерживается высота балок, что заставляет утолщать выравнивающий слой бетона покрытия проезжей части. Иногда не соблюдается толщина стенок балок и другие размеры поперечного сечения. В результате ошибок при монтаже некоторые балки могут оказаться не в проектном положении, например сближены или смещены вдоль пролета. Все эти дефекты обнаруживают при приемке моста в эксплуатацию и оценивают влияние их на качество сооружения.

Для оценки влияния трещин на грузоподъемность и долговечность конструкции, выявления причин их появления и развития нужно иметь данные о размере их раскрытия, характере расположения, интенсивности роста и общем состоянии сооружения. Трещины выявляют при детальном осмотре конструкции. Мелкие и скрытые трещины, не выходящие на поверхность, можно обнаружить различными способами дефектоскопии, например с использованием ультразвука. Концы обнаруженных трещин фиксируют на поверхности конструкции

краской с указанием даты, зарисовывают в специальных журналах или фотографируют. Раскрытие трещин определяют по измерительной шкале микроскопа Бриннеля или при помощи лупы. Места измерения раскрытия трещин фиксируют.

Динамика роста трещин оценивается на основании наблюдений за конструкциями: их периодически обследуют, регистрируют характеристики обнаруженных трещин. Данные наблюдений записывают в специальный журнал или в Книгу искусственного сооружения; отметки о развитии трещин делают на конструкциях и указывают об этом в журналах; в журналах также приводят сведения о температуре, погоде и нагрузке, при которых регистрировались трещины.

Для наблюдения за раскрытием трещин и периодического их измерения, кроме микроскопа Бриннеля, можно использовать съемные деформометры. Этими же приборами измеряют и раскрытие трещин («дыхание») при нагружении конструкции. Для качественной оценки роста трещины поперек их наносят маяки – крупные мазки гипсовым или цементным раствором. При увеличении раскрытия трещины или ее «дыхания» в маяках появляются трещины, совпадающие с перекрываемой трещиной. Внешне признаки опасного развития трещин – подтеки ржавчины на поверхности бетона – свидетельство интенсивной коррозии арматуры. Белые подтеки – признак выщелачивания цементного камня в зонах фильтрации воды через бетон. При обследовании железобетонных, бетонных и каменных мостов нужно обращать внимание на качество изготовления конструкции.

Существуют различные неразрушающие методы контроля, позволяющие определять прочность и плотность бетона в сооружении без разрушения элемента конструкции. Невидимые дефекты (пустоты, раковины, отслоение защитного слоя бетона и др.) часто выявляют простейшим способом – остукиванием бетона молотком. При ударах по плотному и прочному бетону издается звонкий звук, а по бетону с раковинами, пустотами, отслоениями – глухой. Поверхностные раковины, сколы, поры выявляют наружным осмотром.

Надежный отвод воды и хорошее качество гидроизоляции имеют большое значение для обеспечения высокой долговечности железобетонных и каменных пролетных строений. При плохом отводе воды и неисправной гидроизоляции вода проникает в кладку, выщелачивает цементный камень и вызывает ржавление арматуры. Участки с поврежденной гидроизоляцией и неисправным водоотводом можно обнаружить по мокрым пятнам, белым подтекам продуктов выщелачивания цементного камня и другим признакам просачивания воды. В местах, где просачивается вода, необходимо проверить состояние гидроизоляции и водоотводных устройств.

В железобетонных пролетных строениях, особенно предварительно напряженных, происходят процессы, связанные с усадкой и ползучестью бетона, следствием которых является деформирование пролетных строений. На деформирование железобетонных конструкций могут влиять также развитие трещин в бетоне, расстройство анкеров арматуры и т. п. Для качественной оценки интенсивности развития этих процессов периодически нивелируют пролетные строения. Сравнивая результаты нивелировок и периодических обследований, можно получить важную информацию об изменениях в работе конструкции для оценки ее долговечности и надежности.

2.2 Особенности осмотров железобетонных пролетных строений

При осмотре железобетонных пролетных строений следует проверять состояние несущих конструкций, правильность сопряжения сборных элементов и опирания пролетных строений на опорные части, выявлять места увлажнения и загрязнения несущих элементов, повреждения бетона и арматуры, а также видимые невооруженным взглядом общие деформации – провисание главных балок, смещения и выгибы из вертикальной плоскости несущих элементов.

В элементах конструкций следует выявлять места фильтрации воды и выщелачивания бетона, пятна ржавчины на бетонной поверхности, трещины, раковины и сколы в бетоне, разрушение стыков, места обнажения и коррозии арматуры и закладных деталей, нарушения и повреждения в местах сопряжений сборных элементов, отслоения защитного слоя бетона и наружных покровных слоев (штукатурки, торкретбетона, лещадок раствора и т.п.), остатки дерева опалубки в бетоне и участки разрушения бетона и арматуры, вызванные ударами проходящего транспорта и другими механическими воздействиями.

По виду повреждения дефекты следует подразделять на следующие группы:

- дефекты, приводящие к изменению расчетной схемы сооружения;
- разломы элементов пролетных строений;
- трещины;
- раковины;
- сколы защитного слоя;
- размораживание бетона;
- коррозионные повреждения арматуры.

По принадлежности к определенным частям пролетного строения различают дефекты:

- главных балок пролетных строений;
- плит проезжей части;
- диафрагм.

По положению относительно продольной оси балок пролетных строений трещины могут быть:

- горизонтальные продольные;
- горизонтальные поперечные;
- вертикальные;
- наклонные;
- беспорядочные.

По происхождению трещины следует классифицировать на:

- силовые;
- технологические (усадочные, трещины между ребром и плитой проезжей части и др.);
- коррозионные.

К характерным местам образования силовых трещин следует относить:

- плиту проезжей части – продольные горизонтальные трещины;
- приопорные зоны балок – наклонные трещины;

- середину пролета разрезных балок – вертикальные;
- опорные зоны в середине пролета неразрезных балок – вертикальные, горизонтальные поперечные в плите.

К характерным местам образования технологических трещин следует относить:

- плиту проезжей части разрезных балок – продольные вертикальные трещины;
- стыки плиты проезжей части и ребра – продольные горизонтальные трещины;
- грушевидное уширение предварительно напряженных балок – продольные горизонтальные трещины;
- середину преднапряженных балок – наклонные и вертикальные трещины;
- в любом месте конструкции – осадочные трещины.

Коррозионные трещины образуются при недостаточном защитном слое вследствие коррозии арматуры и снижают долговечность конструкций. Характерный признак коррозионных трещин – имеют регулярный характер, шаг и положение трещин соответствует схеме армирования элементов конструкции. Для удостоверения образования коррозионной трещины следует, как исключение, вскрыть защитный слой бетона у 3-4-х трещин. Если обнаружена арматура в местах трещин – появление трещин связано, как правило, с коррозией.

В зоне опирания и в торцах балок возникают трещины от концентрации местных напряжений (под анкерами преднапряженной арматуры, при перекосе опорных частей, неполное опирание балок). Развитие трещин прогрессирует при потере подвижности подвижных опорных частей.

При выявлении трещин в конструкции их характер следует определять с учетом общего состояния сооружений, с привлечением данных о пропуске крупногабаритных и тяжеловесных грузов, а также исполнительной производственно-технической документации.

Класс нагрузки на сооружение следует определять с учетом обнаруженных трещин и их влияния на долговечность сооружения. Скорость коррозии арматуры при наличии сухих трещин следует определять по графику (рис. 2.7). При фильтрации воды через трещины скорость коррозии следует увеличить в 3 раза.

При необходимости следует установить знаки ограничения (массы, давления на ось, габарита и др.).

Наблюдения за обнаруженными трещинами следует вести регулярно, установив на них маяки с указанием даты установки.

Нельзя забывать и следующие принципы.

Образование трещин в конструкциях предварительно напряженного бетона не допускается.

Ширина же раскрытия трещин в конструкциях из обычного железобетона не должно превышать 0,3 мм. Трещины в конструкциях из обычного железобетона шириной раскрытия более 0,3 мм следует считать разломами. Они свидетельствуют об исчерпании несущей способности конструкции и переходе ее в предаварийное состояние.

Трещины в конструкциях из предварительно напряженного бетона свидетельствуют о снижении, либо исчерпании несущей способности элементов конструкций и достижении предельного состояния.

Особенностью осмотра стыков является то, что их разрушение происходит в 2 стадии. На 1-й стадии происходит разрыв стыка нижних закладных деталей. Признаки разрыва – вертикальные трещины в растворе омоноличивания стыка и между полудиафрагмами. Дефект на 1-й стадии следует учитывать введением в расчетную схему пролетного строения шарниров в местах разрывов стыка.

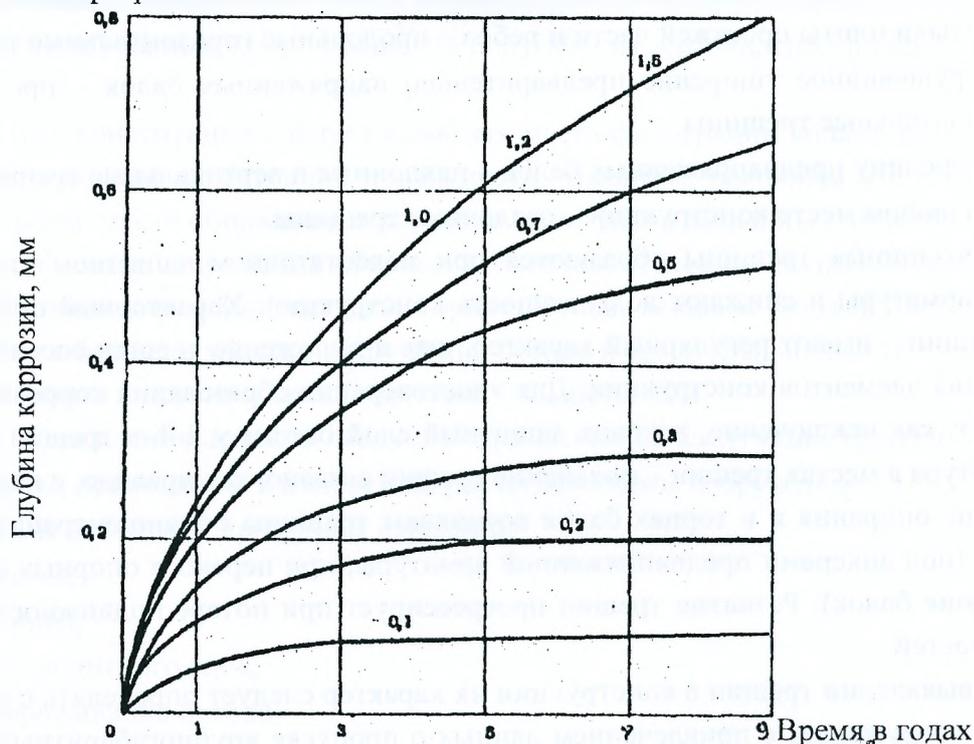


Рисунок 2.7 Развитие коррозии арматуры в трещинах железобетона. Цифры на кривых – раскрытие трещин, мм.

На 2-й стадии происходит разрыв стыка верхних закладных деталей. Признаки дефекта – вертикальные трещины в растворе омоноличивания стыка и между полудиафрагмами и продольные трещины в покрытии проезжей части в местах стыка балок. Дефект приводит к расчленению пролетного строения на группы балок и отдельно стоящие балки. Возможно обрушение крайних балок пролетных строений вместе с тротуаром без временной нагрузки.

Дефект на 2-й стадии следует учитывать при расчете пролетного строения, рассматривая балки пролетного строения как отдельно стоящие. Срок развития дефекта до 2-й стадии – 15-25 лет и менее.

При выявлении дефекта следует определить класс нагрузки на сооружение и, при необходимости, установить знаки ограничения (веса, габарита, давление на ось и т.п.).

Выключение из работы главных балок пролетных строений вследствие потери несущей способности следует учитывать как дополнительную нагрузку на соседние балки, рассматривая несущие конструкции как два или более независимо работающих пролетных строения.

При выявлении дефекта следует ограничить движение по выключенным из работы балкам. Максимальную массу транспортных средств следует определять с учетом дефектов сооружения.

И всегда нужно помнить, что все дефекты железобетонных пролетных строений, за исключением ошибок и промахов проектов, постепенно приводят конструкцию к опасной стадии (предаварийному состоянию). На опасной стадии разрушение конструкций с каркасной арматурой происходит, как правило, постепенно, с преднапряженной – мгновенно как под временной нагрузкой, так и без нее.

2.3 Принципы ремонта железобетонных пролетных строений

Общие сведения. Существующие методы ремонта, материалы и оборудование для ремонта железобетонных пролетных строений можно разделить на два вида: обеспечивающие повышение долговечности конструкций и восстанавливающие несущую способность элементов. Ранее при ремонте пролетных строений с такими повреждениями, как трещины, сколы бетона, раковины и отслоения защитного слоя, их заделывали цементными, цементно-песчаными растворами и бетонами на мелком щебне. Трещины в зависимости от величины раскрытия, мелкие сколы и неглубокие раковины затирали раствором, а значительные сколы, глубокие раковины, защитный слой восстанавливали цементно-песчаным раствором или бетоном. От усадки и недостаточного сцепления со старым бетоном восстановленные таким способом участки конструкций часто оказывались недолговечными. В последующем при герметизации мелких трещин стали применять краски, лаки, а крупные трещины перед затиркой цементным раствором подвергали разделке. Разделка трещин перед затиркой цементным раствором в определенной мере повышала эффективность герметизации, но не настолько, чтобы исключить повторные ремонты.

Выбор способа ремонта (технология, материал) зависит от характера повреждений, которые по влиянию на основные элементы конструкции могут быть разделены на три группы:

– I группа – практически не снижающие прочность и долговечность конструкции (мелкие поверхностные раковины, трещины раскрытием не свыше 0,2 мм, сколы бетона без оголения арматуры и т. п.);

– II группа – снижающие долговечность конструкции (трещины раскрытием более 0,2 мм, раковины и сколы с оголением арматуры, поверхностная и глубинная коррозия бетона и т. п.);

– III группа – снижающие несущую способность конструкции (наклонные трещины в стенках балок, горизонтальные трещины в сопряжении плиты и стенки пролетных строений, раковины и пустоты в бетоне сжатой зоны и т. п.).

Повреждения I группы не требуют принятия срочных мер, но их рекомендуется устранять при текущем содержании в профилактических целях. При повреждениях II группы ремонтом обеспечивается повышение долговечности сооружения, поэтому ремонтные материалы должны обладать качественными защитными характеристиками. При повреждениях III группы восстанавливается несущая способность конструкции по конкретному признаку, а применяемые материалы и технология должны обеспечивать прочностные характеристики. По действующим нормативам рецептура материалов и технология ремонтных работ ориентированы в основном на устранение повреждений I и II группы, так как для ликвидации повреждений III группы в большинстве случаев нужно разрабатывать индивидуальный проект.

Рекомендуемые для ремонта материалы делятся на две категории. К категории I относятся составы, которые после нанесения на бетон образуют жесткие покрытия, по свойствам близкие к цементному камню. Их применяют для ремонта повреждений на участках конструкций с небольшими деформациями, в том числе трещин, изменяющих раскрытие от действия временной нагрузки до 0,1 мм, а также трещин в предварительно напряженных пролетных строениях вдоль ненапрягаемой стержневой арматуры и усадочных. Из материалов этой категории для ремонта мостов и труб рекомендуются цементно-песчаные растворы, полимерцементные составы (тесто, раствор, краска), составы на основе синтетических смол.

К категории II относятся резиноподобные эластичные составы, не разрушающиеся при значительных деформациях. Такие составы применяют, главным образом, для герметизации трещин с изменяющимся раскрытием 0,15 мм и более. Из материалов этой группы рекомендуются составы типа «герметик», образуемые на основе жидкого тиокола, найритовые и каучуко-битумные композиции. Пролетные строения, подвергающиеся действию агрессивных факторов, рекомендуется защищать от коррозии составами на основе эпоксидной, перхлорвиниловой смол и кремнийорганических лаков. Для улучшения внешнего вида железобетонных мостов производят сплошную их окраску составами на основе поливинилацетатной эмульсии или синтетического латекса. Эти же составы рекомендуются для герметизации мелких трещин.

Подготовка ремонтируемых участков конструкции. Эффективность ремонта железобетонных пролетных строений в большой мере зависит от качества подготовки ремонтируемых участков: расчистки слабого и трещиноватого бетона, обезжиривания, обработки сжатым воздухом, промывки, разделки трещин, установки инжекторов, просушивания бетона, очистки арматуры от коррозии и др. Поверхность конструкции (участка) перед нанесением покрытия очищают до плотного бетона, особенно тщательно обрабатывают участки с отслоением бетона, шелушением и в зонах коррозии арматуры. Для механической обработки бетонных поверхностей рекомендуется гидropескоструйная очистка с последующей продувкой сжатым воздухом.

Бетон, загрязненный маслами, асфальтом, цементным молоком, подвергают химической обработке 10%-ным раствором каустической соды (щеткой), бензином, ацетоном и другими растворителями. После обработки раствором каустической соды поверхность тщательно промывают сильной струей воды.

Трещины с раскрытием более 1 мм разделяют на клин под углом 45-60° или на прямоугольник на глубину 10-30 мм до арматуры (рис. 2.8). В местах с большими отколами бетона и обнажениями арматуры устанавливают сетки из проволоки диаметром до 6 мм (размер ячеек 2,5-10 см) и прикрепляют их к основной арматуре.

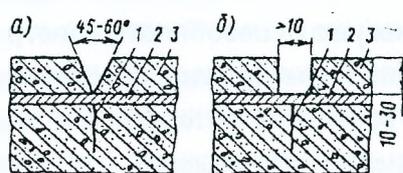


Рисунок 2.8 Схема разделки трещин: а – на клин; б – на прямоугольник; 1 – трещина; 2 – арматура; 3 – защитный слой бетона.

Обнаженную арматуру, особенно если она поражена коррозией, очищают до чистого металла металлическими щетками или пескоструйным способом. Инъецируют раствор через инъекционные трубки.

Конструкция и материал трубок могут быть различными в зависимости от характера дефекта, режима нагнетания. Предпочтительны металлические трубки, но можно использовать из эластичных материалов (резиновые, хлорвиниловые и др.). Число трубок и расстояние между ними зависят от характера трещин (длина, раскрытие) и способа инъецирования (ручной, механический). Их рекомендуют располагать на расстоянии не более 50 см. Трубки вставляют в рассверленные на глубину 5-7 см в бетоне (по трещине) отверстия (лунки) и герметизируют, например эпоксидным составом. Участки трещины между инъекторами герметизируют – промазывают эпоксидным клеем, наклеивают ленту из стекло- или хлопчатобумажной ткани на эпоксидном составе и т. п.

Приготовление и нанесение полимерцементных покрытий. Полимерцементные составы (раствор, тесто, краска) для ремонта пролетных строений мостов готовят на портландцементе высоких марок. Составы полимерцементных растворов, л: поливинилацетатная эмульсия (ПВАЭ) с 50% воды – 2,5-3; цемент – 10; песок – 3,50-16,5; вода (вместе с водой в составе эмульсии) – 4,5-5,0. Полимерцементное тесто и краски – почти такого же состава, как растворы, но в них не содержится песок.

Небольшие повреждения заделывают жирными полимерцементными растворами: на 10 л цемента 3,5-10 л песка; при ремонте больших повреждений более тощие растворы – на 10 л цемента 10-16,5 л песка. В полимерцементную краску для придания покрытию нужного оттенка добавляют пигментные красители в количестве 5-10% объема цемента. В качестве пигментов можно добавлять охра, окись хрома, умбру, ультрамарин, железный сурик и др. Полимерцементные составы нетоксичны, для их приготовления можно использовать любое смесительное оборудование.

Сплошь окрашивать конструкции полимерцементной краской целесообразно механизированным способом, небольшие участки – раковин, сколов, щелей – можно окрашивать раствором вручную. При заделке вручную можно использовать обычный мастерок, шпатель и т. п. Через 1 ч после укладки раствора его смачивают водой, присыпают сухим цементом и заглаживают. При температуре воздуха выше +30 °С и в сухую погоду отремонтированные участки увлажняют 2-3 раза в течение суток.

Механизированные способы ремонта повреждений в бетонных и железобетонных конструкциях мостов основаны на применении торкрет-аппаратов, растворонасосов, шпаклевочных установок, распылителей и т. п. На большие площади ремонтируемых поверхностей, особенно потолочные, эффективно наносить полимерцементный раствор торкретированием – получается прочное покрытие с хорошим сцеплением. Торкрет делается из полимерцементного раствора, содержащего 10-12 % воды. Его можно нанести любым торкрет-аппаратом, цемент-пушкой и т. п. Минимальная толщина торкретного слоя 20 мм.

Для механизированного нанесения полимерцементных растворов рекомендуются растворонасосы (например, С-251 «Малютка») шпаклевочные установки (например, С-562 ВНИИ «Стройдормаша»). Твердеет полимерцементный раствор около 2 ч, после этого на покрытие наносят полимерцементную краску шпаклевочной установкой С-562, насосом «По-

мона», нагнетательными бачками и т. п., которые оборудуют подающим шлангом, «удочкой» и распылительной головкой. Заделку раковин, пустот, отколов бетона и восстановление защитного слоя выполняет бригада из 3-4 человека под руководством мостового мастера.

Материалы на основе синтетических смол. К наиболее стойким и долговечным материалам, применяемым для защитных покрытий и прочностной заделки повреждений (при восстановлении несущей способности элементов конструкции), относятся составы на синтетических смолах (эпоксидные, перхлорвиниловые) и кремнийорганических лаках.

Покрытия на основе эпоксидных смол обычно применяют для защиты мостовых конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды, в районах с суровым климатом и высокой влажностью воздуха. Такие покрытия образуют из одного слоя грунтовки и двух покровных слоев из эпоксидных смол (табл. 2.1.). Для улучшения защитных свойств покровных слоев в их состав вводят порошкообразные наполнители – окись титана, железный сурик, цемент и др. в количестве 1:1 от массы эпоксидной смолы. Покрытия на основе эпоксидных смол наносят кистью и краскораспылителем. Приготавливать эпоксидные составы нужно не раньше чем за 1-2 ч до употребления; в процессе работы их периодически перемешивают. Достаточно стойкие покрытия получают при нанесении грунтовок, эмалей и лаков.

Таблица 2.1

Компонент	Количество в массовых частях
<i>Эпоксидная грунтовка:</i>	
Смола (ЭД-20; ЭД-16)	100
Растворитель (ацетон, Р-4, толуол)	60–100
Пластификатор (дибутилфталат)	5–10
Отвердитель (полиэтиленполиамин)	12
<i>Состав покровного слоя:</i>	
Смола (ЭД-20; ЭД-16)	100
Растворитель (ацетон)	20–25
Пластификатор (дибутилфталат)	5–10
Отвердитель (полиэтиленполиамин)	12
Наполнитель	До 100

Рекомендуется такие покрытия наносить не менее чем из одного слоя «грунта», двух слоев эмали и одного слоя лака.

В умеренных агрессивных условиях для защиты конструкций рекомендуются перхлорвиниловые эмали (ПХВ), сравнительно недорогие и недефицитные. Покрытие с применением перхлорвиниловых эмалей образуют из нескольких слоев: слой «грунта», слой «грунта» или лака с добавлением цемента (1:1), 1-3 слоя эмали. Срок сушки каждого слоя покрытия 0,5-1 ч.

В обычных условиях (неагрессивных) на пролетные строения наносят покрытия из перхлорвиниловых эмалей или силикатных красок в профилактических целях и для придания декоративного вида. Силикатная краска – смесь жидкого калийного стекла, пигмента и наполнителя, растворенных водой.

Для восстановления несущей способности сечений элементов железобетонных пролетных строений, пониженной из-за внутренних раковин, трещин и др., применяют прочност-

ную заделку повреждений: нагнетают в раковину (трещину) составы на основе эпоксидных смол (табл. 2.2), которые не подвержены усадке, обладают хорошей адгезией бетону и проникающей способностью. После отверждения они приобретают достаточную прочность. Продолжительность полимеризации составов на эпоксидной смоле – около суток. Во время полимеризации составов следует избегать воздействия на конструкцию, особенно вибрационных, которые могут привести к расстройству материала заделки.

Таблица 2.2

Компонент	Составы в массовых частях при температуре	
	10–15 °С	20–25 °С
Эпоксидная смола	100	100
Растворитель (полиэфир)	20	20–10
Отвердитель (полиэтиленполиамин)	15	10
Наполнитель (портландцемент М 400–500)	200	100–125

Инъектирование эпоксидных составов в трещины (пустоты) выполняют ручными, пневматическими шприцами, насосами с резиновой емкостью, в которую заливают нагнетаемый состав. В таких установках резиновую емкость (оболочку) помещают в сосуд высокого давления, заполненный водой и присоединенный к ручному насосу. При работе насоса вода выжимает эпоксидный состав из оболочки и подает его по шлангам в инжекторы. В качестве инжекторов применяют прижимные губки, а также трубки из эластичных материалов и металлические, заделываемые в отверстия (лунки) в зоне повреждения.

Эпоксидный состав с полиэтиленполиамином и полиэтиленполиамин ядовиты, поэтому при работе с ними нужно обязательно принимать защитные меры.

Герметизация трещин эластичными герметиками. Герметизацию трещин эластичными герметиками (тиоколовыми, каучуко-битумными, найритовыми) выполняют обмазкой по грунтовке из тех же материалов или нагнетанием. В герметик на основе жидкого тиокола (полисульфидный каучук) вводят вулканизатор, ускоритель твердения и пластификатор. Найритовые покрытия растворяют составом, %: сольвент – 76, скипидар – 19, бутиловый спирт – 5. Отвердителем может служить хлористый цинк (15% от найрита). Каучуко-битумные покрытия растворяют толуолом.

Эластичный герметик наносят на поверхность конструкции (обмазывают кистью, шпателем, а в глубь трещин нагнетают ручными или пневматическими шприцами через инжекторы). Тиоколовые герметики вулканизируются при обычной положительной температуре, обладают хорошей адгезией к бетону, устойчивы к атмосферным воздействиям, сохраняют свои свойства длительное время, даже при значительных изменениях температур. Разработано несколько составов тиоколовых герметиков. В качестве примера (в табл. 2.3) приведены два состава: один для нанесения кистью на защищаемую бетонную поверхность, другой – для инъектирования в глубь трещин.

Тиоколовые герметики затвердевают в течение 2-4 ч, поэтому их приготавливают на месте работ перед употреблением. В металлической таре сначала растворяют (ацетоном, этилацетатом) герметизирующую пасту до получения однородной массы, затем вводят пасту №9 и дифенилгуанидин, предварительно растворенные в ацетоне и этилацетате, взятыми из

основного состава растворителей, и все перемешивают в течение 3-5 мин до получения однородной смеси. Эпоксидную смолу вводят в состав в последнюю очередь.

Таблица 2.3

Компонент	Составы в массовых частях	
	для нанесения кистью	для инъектирования трещин
Герметизирующие пасты У-30, МЭС-5	100	–
УГ-34	–	100
Паста № 9 (вулканизатор)	7–11	10
Дифенилгуанидин (ускоритель твердения)	–	1
Эпоксидная смола (пластификатор)	0,3–1	5–10
<i>Растворители:</i>		
Ацетон	25	5–10
Этилацетат	25	–

Ремонт гидроизоляции и водоотводных устройств. Долговечность железобетонных пролетных строений в большой степени зависит от состояния гидроизоляции и работы водоотводных устройств. На эксплуатируемых мостах приходится ремонтировать гидроизоляцию из-за строительных дефектов, расстройств изоляционного покрытия, вызванных старением материалов, механическими воздействиями и т. п. Капитальный ремонт гидроизоляции должен выполняться примерно через 30 лет. При ремонте и замене гидроизоляции устраивают новый сплошной слой оклеечной изоляции из 4-5 слоев битумной мастики толщиной 2-3 мм, армированных битуминизированной антисептической тканью (битантит) гидроизолом, стеклотканью. В последнее время начали применять пластиковые пленки из перхлорвинила, полиизобутилена и т.п., а вместо битумных мастик – тиоколовые мастики. До наклейки изоляционного ковра исправляют подготовительный слой, а если его не было или он поврежден (раздроблен), наносят слой из бетона на мелком, до 15 мм, щебне или цементно-песчаного раствора (состав 1:3–1:4). Слою придают уклоны к водоотводным трубкам не менее 0,03.

Ремонтировать гидроизоляцию разрешается при температуре не ниже +5 °С; при температуре выше +25 °С. Изолируемая поверхность должна быть защищена от солнечных лучей.

2.4 Осмотр и ремонт мостового полотна

Дефекты мостового полотна оказывают существенное влияние на безопасность движения (недостаточный габарит, дефекты деформационных швов, бордюрных ограждений, сопряжения мостов с подходами и др.) и долговечность сооружения (дефекты гидроизоляции системы водоотвода, деформационных, швов и др.).

При осмотре конструкций мостового полотна моста определяют состояние настила или покрытия, состояние, сопряжения моста с подходами и пролетных строений между собой, водоотвода и гидроизоляции, тротуаров, перил, ограждений; приборов сигнализации, дорожных знаков, линий освещения и других коммуникаций, пропущенных через мост.

Дефекты мостового полотна следует подразделять на следующие группы:

- несоответствие габарита мостового полотна интенсивности движения;
- дефекты покрытия ездового полотна и тротуаров;

- дефекты деформационных швов;
- дефекты гидроизоляции и системы водоотвода;
- дефекты бордюрных ограждений;
- дефекты сопряжения мостов с подходами;
- дефекты мачт освещения;
- дефекты перильных ограждений.

К дефектам покрытия ездового полотна и тротуаров следует относить:

- ямы и выбоины покрытия;
- наплывы асфальтобетона;
- колейность покрытия;
- разрушение тротуарных плит.

К дефектам деформационных швов следует относить:

а) для закрытых деформационных швов:

- разрушение покрытия в зоне деформационных швов;
- отсутствие температурного зазора между торцами блоков пролетных строений;
- фильтрация воды через деформационные швы;
- разрушение лотков-компенсаторов;
- отсутствие лотков-компенсаторов на тротуарах;
- необеспечиваемость лотками-компенсаторами отвода воды за пределы опор;
- засорение швов грязью, остатками строительного мусора, продуктами разрушения покрытия;

б) для швов открытого типа:

- разрушение покрытия проезжей части и тротуаров у окаймления швов;
- фильтрация воды через деформационные швы;
- отсутствие зазора между торцами блоков;
- задир окаймления деформационных швов;
- срыв крепления листов перекрытия шва;
- удары при прохождении автотранспорта по шву;
- засорение швов грязью, продуктами разрушения покрытия;
- выполнение по швам открытого типа асфальтобетонного покрытия.

К дефектам гидроизоляции и системы водоотвода следует относить:

- недостаточную длину водоотводных трубок (трубки должны выходить за нижнюю грань балок пролетных строений не менее 5 см);
- фильтрацию воды в зоне водоотводных трубок;
- отсутствие водоотводных трубок;
- засорение водоотводных трубок;
- отсутствие решеток на трубках;
- фильтрацию воды на лицевую поверхность балок;
- фильтрацию воды через продольные швы между балками пролетных строений;
- отсутствие продольного и (или) поперечного уклонов проезжей части;

- отсутствие слезников на блоках пролетных строений и тротуарные блоках;
- отсутствие гидроизоляции на тротуарах;
- застаивание воды на ездомом полотне и тротуарах.

К дефектам бордюрных ограждений следует относить:

- недостаточную высоту бордюрного ограждения – менее 75(60)см;
- низкую морозостойкость бордюрного камня;
- отсутствие плавного перехода от высоты бордюра на дороге (улице) к высоте бордюра на мосту;
- устройство бордюрных ограждений без расчета на воздействие временных нагрузок в соответствии со СНиП 2.05.03-84;
- повреждения окраски и коррозия металлических элементов ограждения.

К дефектам сопряжения мостов с подходами следует относить:

- просадки насыпи с образованием ступеньки при въезде на мост;
- осыпание насыпи в зоне тротуаров с образованием ям и ступенек перед тротуарами;
- вымывание грунта насыпи под насадку и на конусе и провалы проезжей части в образовавшиеся пустоты.

К дефектам мачт освещения следует относить:

- применение в качестве мачт освещения железобетонных столбов (дефекты железобетонных столбов аналогичны ряду дефектов железобетонных пролетных строений);
- нарушение окраски, коррозия металлических мачт освещения;
- деформационные повреждения мачт освещения.

К дефектам перильного ограждения следует относить:

- отсутствие или разрушение секций перильного ограждения;
- разрушение перильного заполнения;
- коррозию и нарушение окраски металлических элементов перильного ограждения;
- недостаточную высоту перильного ограждения (менее 110 см).

В асфальтобетонном и цементобетонном покрытиях следует выявлять: трещины и неровности; места скопления воды на проезжей части; разрушения покрытия с обнажением защитного слоя и его арматурной сетки; нарушения продольных и поперечных уклонов на проезжей части; утолщения покрытия в случае, когда новые его слои уложены без снятия старых и др.

При осмотре тротуаров, перил и ограждающих устройств следует обращать внимание на состояние тротуарных плит, блоков, бордюров (положение в плане, высоту, сколы бетона и пр.) и узлов прикреплений перил и ограждающих устройств к плите проезжей части. В местах заделки перильных стоек и ограждающих устройств, а также в тротуарных плитах необходимо выявлять сколы, трещины и разрушения бетона, а также пробойны в самой плите. Кроме того, следует проверять вертикальность перил, их непрерывность и полноту заполнения решетки, а также обеспеченность отвода воды с покрытия тротуаров и по возможности из тротуарных коробов.

В ограждающих устройствах необходимо проверять прямолинейность ограждений, выявлять места отрыва горизонтальных элементов от стоек, повреждения ограждений в результате механических воздействий.

Большое внимание следует уделять состоянию и функционированию системы водоотвода. При осмотре надо выявлять места скопления дождевой воды на покрытии и нарушения уклонов покрытия, обеспечивающих сток воды и ее сброс, места засорения (разрушения) водоотводных устройств, а также общую загрязненность покрытия проезжей части. Очень важно при этом определить общее количество водоотводных трубок и проверить их достаточность, а также достаточность длины трубки для отвода и сброса воды за пределы конструкции.

В деформационных швах следует проверить общее состояние их конструкции, обеспеченность свободного перемещения концов пролетных строений при изменении температуры и воздействиях временных нагрузок, плавность сопряжения деформационных швов с покрытием проезжей части, работу системы водоотвода в пределах шва.

При осмотре швов необходимо выявлять такие дефекты, как отрыв перекрывающего шов (скользящего) листа, коррозию стальных элементов, загрязнение лотков и механизма шва, разрушение стальных окаймлений, нарушение водоотвода и отсутствие смазки в механизме шва.

В шарнирном сопряжении температурно-неразрезных пролетных строений следует проверять герметичность (вода с проезжей части не должна проникать на подферменную часть опоры) и состояние конструкции проезжей части над опорой. Признаком нарушения нормальной работы этой зоны служат трещины или выкальвание покрытия проезжей части, а признаком нарушения герметизации – увлажнение нижней поверхности плиты проезжей части.

При наличии на мосту коммуникаций (линий связи, теплофикации) или освещения необходимо проверять также состояние этих систем и надежность их крепления к элементам моста, а также выявлять возможные факторы отрицательного влияния коммуникаций на условия эксплуатации моста (повышение влажности, загрязнение, пожарная опасность и др.). При осмотре следует проверять состояние противопожарного оборудования на мосту, элементов заземления, площадок-убежищ, смотровых приспособлений и других эксплуатационных устройств.

Дефекты одежды проезжей части и тротуаров устраняют по общим правилам ремонта покрытий автомобильных дорог. Учитывая, что на мостах покрытие служит еще и защитным слоем дорогостоящих конструкций, ремонтировать его нужно своевременно, не допуская больших износов и повреждений. Работы, связанные с частичным или полным удалением покрытия, следует вести с особой осторожностью, чтобы не повредить гидроизоляционный и защитный слой. Возможность наращивания покрытия дополнительными слоями вместо сплошной смены должно быть подтверждено расчетом несущих конструкций на увеличение постоянной нагрузки.

В зависимости от состояния ремонт изоляции может быть частичный и сплошной. Для ремонта местных повреждений вскрывают одежду проезжей части, вырезают поврежденный участок изоляции и на его место ставят заплату так, чтобы вода не подтекала под изоляцион-

ный слой. При сплошной смене изоляции работы ведут последовательно на каждой половине ширины проезжей части. После удаления изношенного изоляционного слоя осматривают верхнюю поверхность обнаженной кладки затирают трещины цементным раствором, слабый, разрушенный бетон вырубают и заменяют новым, восстанавливают уклоны сточных треугольников и затем укладывают новую гидроизоляцию и покрытие. При смене изоляции желательнее применять новые полимерные материалы, обеспечивающие лучшую водонепроницаемость, например как этиноль, стеклоткань, фольгу из поливинилхлорида и др.

Одновременно с ремонтом изоляции устраняют дефекты водоотводных труб. Поверхности труб, решеток и других деталей, не соприкасающихся с бетоном, очищают от грязи и ржавчины и покрывают битумным лаком; неплотности между трубами и окружающим бетоном заполняют цементным раствором, сопряжение труб с бетоном тщательно изолируют от воды, заводя изоляцию внутрь труб.

Ремонт деформационных швов заключается в их расчистке, заполнении новой битумной мастикой, исправлении прилегающих участков изоляции, замене компенсаторов и других пришедших в негодность деталей. При ремонте деформационных швов обеспечивают надежный отвод воды от них и принимают меры к защите нижележащей конструкции от загрязнения и увлажнения.

Бетонную кладку от разрушения защищают покрытиями из пленкообразующих материалов, из которых наиболее доступны покрытия на основе битума.

Холодные битумные покрытия (краски, лаки) готовят, растворяя битум марок БН-11 или БН-111 в бензине или керосине (количество растворителя от 15 до 25 %), а горячие получают, разогревая битум и добавляя в него от 5 до 20 % солярового масла (пластификатор) и наполнитель из минеральных порошков или коротковолокнистого асбеста. Покрытие наносят на сухие бетонные поверхности в два-три слоя малярными кистями или краскораспылителями. Составы из битума и легковоспламеняющихся нефтяных продуктов огнеопасны, и, применяя их, необходимо соблюдать меры предосторожности.

Битумными эмульсиями, смешанными с эмульсией латекса, рекомендуется покрывать вертикальные поверхности, с которых отделяющаяся при распаде эмульсии вода легко удаляется, что обеспечивает быстрое высыхание и плотность покрытия.

Из битума (50%), воды (40%) и негашеной извести (10%) или глины готовят пасты, а из паст, добавляя известковый порошок (20%) или цемент (8%) и асбест (8%) – холодные битумные мастики. Два-три слоя мастики хорошо предохраняют кладку от агрессивных вод. Мастиками покрывают фундаменты, внутренние поверхности устоев, подпорных стен и т. д.

Кроме битумных покрытий, в последнее время находят большое применение покрытия на основе полимерных материалов, которые хорошо защищают бетонные поверхности от выветривания и придают им красивый внешний вид. Для покрытий применяют преимущественно перхлорвиниловую эмаль серого цвета и составы из водного раствора поливинилацетатной эмульсии (ПВАЭ) или эмульсии латекса в смеси с цементом (в соотношении 2,5-5 л на 10 л цемента). Покрытия наносят краскораспылителями в 1-3 слоя. Большие перспективы имеет газопламенное нанесение полимеров (полиэтилена, полиамида и др.), при котором по-

рошок полимера, поступаая под давлением воздуха в пистолет-распылитель и проходя через ацетиленовое пламя, в расплавленном виде наносится на поверхность конструкции.

Трещины в бетоне конструкций заделывают после того, как устранены причины их образования и развитие трещин закончилось. Если под действием временной нагрузки наблюдается увеличение раскрытия трещин, то их заделывают при наибольшем раскрытии, загружая конструкцию балластом, эквивалентным временной нагрузке. Мелкие усадочные трещины затирают влажным цементом, а глубокие штукатурят или инъецируют.

Штукатурка трещин предохраняет арматуру от коррозии, но не восстанавливает полностью монолитность кладки. Перед нанесением штукатурки трещину расчищают, вырубая борозду шириной 5-10 см, обнаженную арматуру очищают от ржавчины, слабый бетон удаляют, затем, промыв водой, заполняют борозду жестким цементно-песчаным раствором в два слоя: первый (толщиной 5-7 мм) наносят раствором 1:1, последующий – раствором 1:2÷1:3 после схватывания первого. Для повышения плотности и лучшего сцепления со старым бетоном в цементно-песчаный раствор рекомендуется добавлять силикат или алюминат натрия, а также водные дисперсии полимеров (латексную или поливинилацетатную эмульсию и др.).

При наличии глубоких трещин, снижающих несущую способность и срок службы сооружения, прибегают к инъецированию водоцементными растворами или полимерцементными растворами из цемента, песка и ПВАЭ (в количестве 20-30% от веса цемента), а также клеями на основе эпоксидных смол.

Водоцементный раствор готовят из цемента высокой активности. Для повышения подвижности в раствор вводят пластификаторы – сульфитно-спиртовую барду или мылонафт в количестве соответственно 0,25 и 0,10 % от веса цемента. Значительно лучшие результаты достигаются при инъецировании эпоксидным клеем. Эпоксидный клей не подвержен усадке, обладает лучшей адгезией и проникающей способностью; в его состав входят эпоксидная смола ЭД-5 или ЭД-6 (100 в. ч.), пластификатор – дибутилфталат (20 в. ч.) и отвердитель-полиэтиленполиамин (10–15 в. ч.). Количественный состав клея уточняют опытным путем, в зависимости от условий производства ремонтных работ. Инъецируемую трещину расчищают, промывают водой и продувают сжатым воздухом; снаружи промазывают цементным раствором или клеем и через каждые 50-75 см пробуривают отверстия, в которые заделывают инъекторы.

Простейший инъектор (рис. 2.9а) представляет собой отрезок газовой металлической трубы 1. При больших объемах работ предпочтительно применять съемный инъектор с резиновым уплотнителем (рис. 2.9б), состоящий из двух труб. Внутренняя труба 2, служащая для подачи раствора в кладку, на концах снабжена нарезками для упорной гайки 7 и нажимной рукоятки 3. На упорную гайку надето резиновое кольцо – уплотнитель 6. На уплотнитель через шайбу 5 опирается наружная трубка 4. При навинчивании рукоятки наружная трубка давит на резиновое кольцо и раздает его в стороны, прочно прижимая к окружающей кладке.

Для цементации тонких трещин 11 с раскрытием до 0,2-0,3 мм удобен поверхностный инъектор (рис. 2.9в), состоящий из металлической плиты 10 с отверстием в середине и резинового уплотнителя 6. К отверстию подходит металлическая труба, соединенная со шлангом 9, подающим инъекционный раствор. Плита присоединена к винтовому домкрату 8, которым резиновый уплотнитель плотно прижимается к инъецируемой трещине 11; домкрат упирают

в соответствующее распорное крепление или вблизи расположенные конструктивные элементы, например в смежные балки пролетного строения.

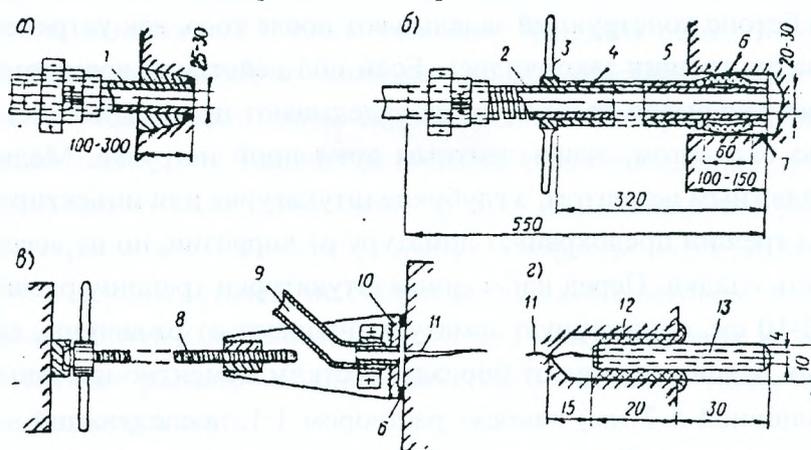


Рисунок 2.9 Конструкция инжекторов.

При инъектировании (рис. 2.9г) эпоксидный клей подают в трещину 11 через шпатели 13, которые заделывают клеем 12 в гнезда, пробуренные в бетоне через 30-100 см. Для закрепления их и промазки трещин снаружи в клей добавляют до 60% цемента от веса смолы.

Трещины заполняют раствором (клеем) под давлением. Цементно-песчаные растворы подают ручными или механическими насосами с давлением до 3-4 атм. Для инъектирования эпоксидными клеями обычные насосы мало пригодны, так как клей загрязняет механизмы и выводит их из работы. Более удобны насосы с резиновой емкостью, в которую заливают клей. Резиновую оболочку с клеем помещают в сосуд высокого давления, заполненный жидкостью и присоединенный к ручному насосу. При работе насоса жидкость выжимает клей из оболочки и подает его по шлангам в инжекторы под большим давлением. Имеются также и другие виды насосов для нагнетания эпоксидного клея.

Инъектирование ведут последовательно, присоединяя шланги к инжекторам, наблюдая за заполнением трещин через свободные, неиспользованные инжекторы.

Раковины, отслоения защитного слоя, сколы и другие дефекты заделывают цементно-песчаным раствором состава от 1:1 до 1:4 или полимерцементным составом из цемента, песка, поливинилацетатной эмульсии и воды. Рецептуру полимерцементного раствора проверяют опытным путем или назначают по соответствующим инструкциям. Раствор заливают за опалубку, которой ограждают ремонтируемый участок. Чтобы заполнение раствором происходило под некоторым давлением, опалубку по возможности выводят выше ремонтируемого участка. После затвердения лишний раствор срубают заподлицо с поверхностью конструкции. Для лучшего соединения раствора с бетоном поверхность дефекта после ее тщательной очистки покрывают тонким слоем поливинилацетатной эмульсии или эпоксидного клея.

Исправление опорных выступов консольно-балочных мостов с подвесными пролетами требует капитального ремонта. В качестве временной меры подвесной пролет можно опереть на стальные балки (рис. 2.10а). Для капитального восстановления опорного выступа подвесной пролет поднимают домкратами (рис. 2.10б) удаляют разрушенный бетон, исправляют погнутую и устанавливают дополнительную арматуру так, чтобы наружные углы опорных выступов были достаточно проармированы (рис. 2.10в). Опорные подушки приваривают к

горизонтальным стержням, надежно заделанным в бетон. Далее выступы заполняют бетонной смесью на мелком щебне, и после набора бетоном проектной прочности подвесной пролет опускают на место. Желательно при этом тангенциальные опорные части заменять на более совершенные, например резиновые или фторопластовые, лучше обеспечивающие подвижность подвесных пролетов. Опорные выступы можно ремонтировать без перерыва движения, устраивая временные въезды на поднятый подвесной пролет. Скорость движения при этом следует ограничить до 5-10 км/ч.

При значительном выветривании, пористой бетонной кладке, наличии большого числа мелких трещин, обнаженной арматуры и других дефектов наиболее радикальным способом ремонта служит торкретирование, т. е. нанесение на поверхность кладки раствора под давлением. Раствор состоит из высокомарочного цемента и песка в пропорции от 1:3 до 1:6. Песок берут чистый, без глинистых и пылеватых частиц, влажностью не более 10%; расход воды составляет 10-15% от веса цемента.

До нанесения торкрета поверхность кладки очищают металлическими щетками или струей песка, удаляют слабый бетон, очищают арматуру от ржавчины. Для лучшего сцепления с кладкой и увеличения прочности торкретного слоя торкретировать рекомендуется по металлической сетке из проволоки диаметром 2-4 мм с ячейками в 5-10 см. Сетку прикрепляют штырями из арматурной стали диаметром 4-6 мм, заделывая их в кладку через 50-60 см на глубину 15-20 см.

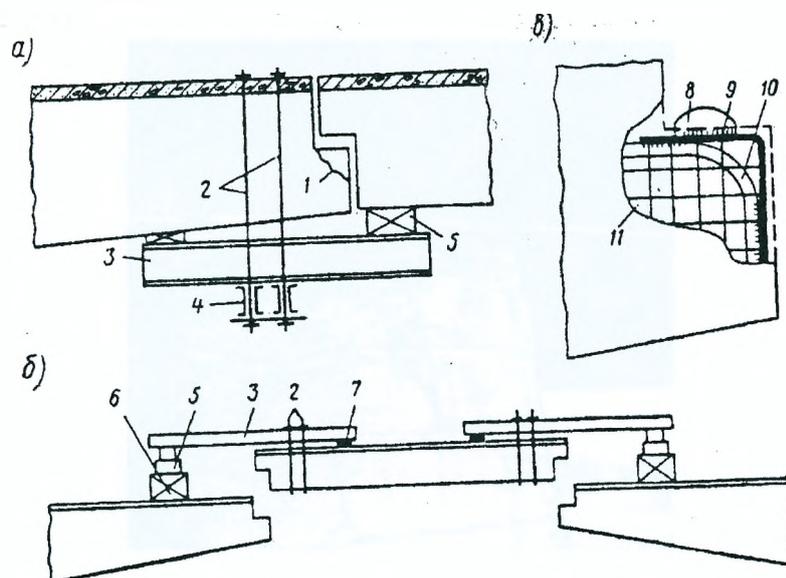


Рисунок 2.10 Ремонт опорных выступов: 1 – трещина; 2 – тяжи; 3 – стальные балки; 4 – поперечные балки; 5 – домкрат; 6 – брусчатая клетка; 7 – опорная подкладка; 8 – опорная подушка; 9 – новая арматура; 10 – существующая арматура; 11 – граница разборки бетона.

Перед нанесением раствора поверхность кладки продувают сжатым воздухом и промывают напорной водой. Торкрет наносят при помощи цемент-пушки или других пневматических аппаратов. Материал подают к обрабатываемой поверхности сжатым воздухом или по шлангам. Цемент-пушку загружают сухой смесью цемента с песком, воду же подают отдельно к выходному соплу, где происходит увлажнение смеси. В других аппаратах к соплу

подается готовый раствор, заранее приготовляемый в растворомешалках. Сжатый воздух обеспечивается компрессорами с давлением 4-7 атм, производительностью до 5 м³/мин. Торкрет общей толщиной 30-40 мм наносят в два-три слоя сверху вниз горизонтальными полосами шириной 1,0-1,5 м. Каждый слой наносят после затвердения предыдущего. Для защиты от быстрого высыхания и усадочных трещин торкретное покрытие из цементно-песчаного раствора обильно смачивают водой и защищают от солнечных лучей до приобретения проектной прочности.

3 Содержание, осмотр и ремонт мостовых опор

3.1 Содержание опор

В опорах наиболее часто наблюдаются следующие дефекты и повреждения: выветривание наружных слоев кладки, плохое состояние водосливных поверхностей (главным образом сливов подферменных площадок), низкая прочность кладки и пустоты в теле опор, трещины, отступления от проектного положения, а также общие деформации – осадки, сдвиги и крены.

Выветривание кладки наиболее интенсивно протекает в зонах переменного уровня воды и ледохода. Признаками выветривания бетонных поверхностей служат их шероховатость, шелушение, отделение тонких лещадок раствора, сетка мелких неглубоких трещин. В уровнях наиболее частых ледоходов могут быть разрушения в виде глубоких борозд, особенно вблизи швов бетонирования. Основные причины этих дефектов – плохое уплотнение бетонной смеси около опалубки, замораживание кладки, температурно-усадочные явления.

В каменной облицовке в первую очередь разрушается раствор в швах. Вода, затекая в швы и замерзая, нарушает связь между облицовкой и кладкой опоры, облицовка выпучивается, отдельные камни вываливаются. Облицовка из камня слабых пород, имеющих микротрещины, а также включения нестойких и легко растворимых минералов выветривается особенно быстро (рис. 3.1).

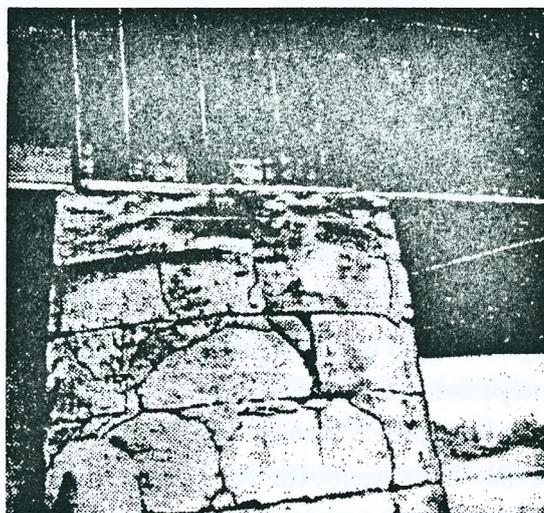


Рисунок 3.1 Выветрившаяся каменная облицовка опоры.

На состояние опор большое влияние оказывает качество водосливных поверхностей подферменных площадок и горизонтальных уступов в местах уширения тела опор. Сливы часто бывают с заниженными уклонами из тонкого слоя неплотного раствора с большим числом усадочных трещин. Такие сливы быстро разрушаются, и вода, просачиваясь, размораживает и выщелачивает кладку. Продукты выщелачивания часто можно наблюдать в виде белых потеков на поверхностях опор.

В некоторых случаях кладка опор оказывается низкой прочности. Этот дефект обнаруживается главным образом в старых опорах из бутовой кладки. С течением времени слабый раствор теряет свою прочность и легко выщелачивается фильтрующейся водой. В результате

кладка становится рыхлой, с пустыми и глубокими большими кавернами. В бетонных опорах эти дефекты встречаются реже, однако и в них недостаточное уплотнение бетонной смеси, замораживание и другие отступления от технологических правил ведения бетонных работ приводят к недопустимому снижению прочности опор.

Серьезный дефект – трещины. Глубокие трещины, особенно сквозные, свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии опор. Чаще трещины возникают в каменных опорах, реже в бетонных и бутобетонных. В сборных и сборно-монолитных опорах также наблюдается растрескивание конструкций, но трещины в них, как правило, мельче.

Трещины по расположению, характеру развития и причинам возникновения весьма разнообразны, могут быть поверхностными, глубокими и сквозными. Причиной возникновения трещин с небольшим раскрытием в бетоне часто являются температурные напряжения, возникающие при резком изменении температуры воздуха, экзотермических процессах при твердении бетона, замерзании воды в пустотах и т. п.

Наиболее характерные виды трещин в массивных опорах показаны на рис. 3.2.

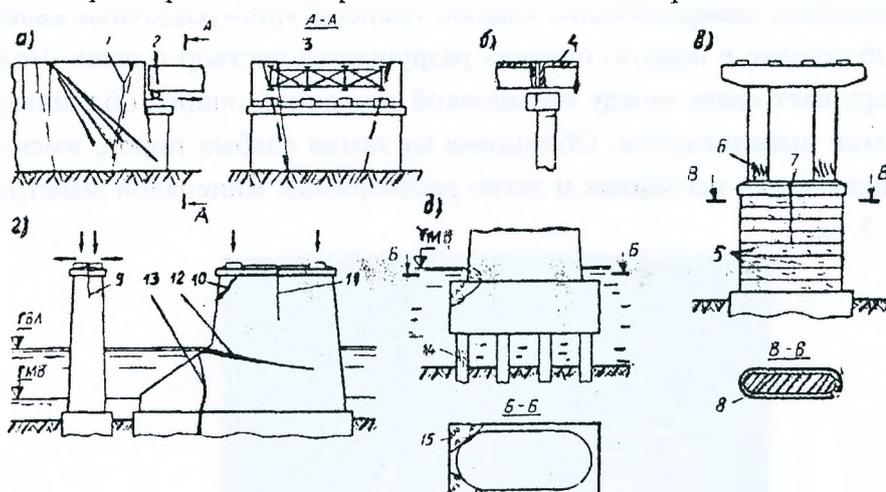


Рисунок 3.2 Дефекты в массивных опорах.

В монолитных опорах (рис. 3.2 а) под подферменными площадками возникают трещины 2, когда температурные перемещения пролетных строений не могут протекать свободно из-за заклинивания подвижных опорных частей. Этим же объясняются вертикальные трещины 9 в верхней части быков. При недостаточном расстоянии опорных частей до грани опоры могут появиться опасные наклонные трещины 10. В устоях с обратными стенками иногда наблюдаются трещины 1 (между передней и обратной стенками), возникающие при увеличении горизонтального давления грунтовой засыпки в результате засорения дренажей и увлажнения насыпи. Подобные трещины, а также трещины 3 по передней стенке устоя могут быть вызваны неравномерной осадкой фундаментов; в этом случае они обычно имеют наибольшее раскрытие вверху (или внизу).

В старых опорах с пологими ледорезами (рис. 3.2 г) вследствие неравномерной осадки фундаментов иногда возникают глубокие вертикальные трещины 13 между ледорезом и основным телом опоры. Результатом значительных давлений ледяных полей, навала судов и других силовых воздействий являются трещины 12. В бетонных опорах эта трещины обычно совпадают со швами бетонирования. В широких мостах больших пролетов с ездой понизу в

верхней части быков иногда наблюдаются вертикальные трещины 11, вызываемые местными растягивающими напряжениями.

Кроме перечисленных видов трещин, в монолитных бетонных опорах часто появляются температурные трещины, которые располагаются вертикально и обычно не проникают глубоко в кладку. Происхождение этого вида трещин объясняется неравномерным распределением температуры при твердении бетонной смеси и более быстром охлаждении наружных, еще не окрепших слоев кладки.

В массивной части и колоннах сборно-монолитных опор также возникает большое число трещин (рис. 3.2 в), причины образования которых разнообразны и не вполне еще выяснены. Короткие, с небольшим раскрытием трещины 5 в наружных монтажных элементах 8 массивной части опор возникают в результате температурных напряжений вследствие резкого понижения температуры воздуха, экзотермии цемента при твердении бетонной смеси внутреннего монолитного ядра опоры, замерзания воды, попадающей между монтажными элементами 8 и кладкой ядра. На образование этих трещин оказывает влияние и качество горизонтальных швов между этими монтажными элементами: швы трудно выполнить постоянной толщины, и деформативность их по периметру опоры неодинакова, что приводит к местным концентрациям напряжений в отдельных сечениях монтажных элементов. Трещины 6 с раскрытием до 0,2 мм и длиной в несколько десятков сантиметров возникают и в колоннах. Замечено, что в колоннах из оболочек, заполненных бетоном, трещинообразование протекает в большей степени, чем в оболочках без заполнения. Это объясняется значительными температурными напряжениями, возникающими в оболочках при твердении бетона заполнения, а также неодинаковыми температурными деформациями оболочки и ядра при резких колебаниях температуры воздуха. В пустотелых колоннах также наблюдается значительный перепад температуры наружной и внутренней поверхности. С уменьшением толщины оболочки температурный перепад уменьшается и трещинообразование снижается. В местах заделки пустотелых колонн в массивную часть опоры температурные деформации колонны стеснены, так как массивная часть прогревается и охлаждается медленнее; в результате внизу колонны появляются вертикальные трещины, число и размеры которых тем больше, чем тоньше стенки колонн и чем больше их протяженность в плане. Трещинообразование в колоннах особенно интенсивно при замерзании в них воды. В массивной части опор иногда наблюдаются вертикальные трещины 7 от местных растягивающих напряжений. Вероятность появления этих трещин тем больше, чем ближе к краю опоры расположены колонны.

Оценка трещин в отношении прочности и долговечности опор главным образом зависит от глубины их распространения. Поверхностные трещины снижают срок службы опор, глубокие, разделяющие кладку на отдельные массивы, опасны и обычно требуют усиления конструкций.

При эксплуатации мостов необходимо систематически следить за состоянием фундаментов русловых опор. Фундаменты обычно выполняют из бетона пониженной марки, кроме того, иногда применяют способ подводного бетонирования. Поэтому в условиях постоянного смывания проточной водой кладка их может оказаться недостаточно долговечной. Вода может быть агрессивной к бетону (в особенности в промышленных районах), что резко ухудшает условия существования фундаментов. В русловых опорах (рис. 3.2 д) лед примерзает к

фундаменту, и при подъеме воды образуются сколы 15 кладки, которые могут захватывать и надфундаментную часть опоры. На многих реках подводная часть опор подвержена истиранию наносами. Дефекты истирания 14 *особенно опасны* для железобетонных свай.

Существуют различные способы выявления повреждений в подводной части опор и наблюдения за их развитием. В теплую погоду при прозрачной воде и небольшой глубине подводную часть опор можно обследовать, пользуясь обычной маской для подводного плавания, а в более сложных условиях для этих целей привлекаются водолазы или используются специальные передвижные телевизионные установки, например «Краб». В опорах часто встречаются и отступления от проектного положения и проектных размеров. Так, в свайно-эстакадных мостах сваи бывают забиты с наклоном, проектное расстояние между сваями не выдержано, насадки уложены не по оси свай (рис. 3.2 б). В результате возникают трещины 4 в насадках и сваях. В сложных геологических условиях опускные колодцы в процессе опускания нередко отклоняются от проектных осей, и тогда надфундаментную часть опоры приходится располагать эксцентрично по отношению к фундаменту. Степень опасности этих и аналогичных им дефектов устанавливают перерасчетом опор с учетом действительного их положения. Такой признак неудовлетворительного состояния кладки, как потеки воды и извести по наружным поверхностям опор, указывает не только на наличие глубоких внутренних трещин, но и на возможность образования внутренних пустот в результате выщелачивания раствора.

Весьма опасны общие деформации мостовых опор – осадки, сдвиги и крены. Причины их возникновения разнообразны: осадки грунта в основании, оползневые явления, уменьшение трения между грунтом и подошвой фундамента, подмыв опор и т. д. В большинстве случаев общие деформации, зависящие от грунтовых условий, возникают в первые годы эксплуатации и со временем затухают. Однако есть случаи появления деформаций опор через несколько десятков лет после постройки.

При текущем содержании опор систематически обеспечивают чистоту подферменных площадок, исправную работу опорных частей; вовремя исправляют сливы, затирая в них трещины цементом и восстанавливая уклоны; регулярно проверяют работу дренажей за устоями. Для выяснения глубины распространения трещин вскрывают облицовку и осматривают внутреннюю кладку опоры. При большом числе трещин, каверн и других дефектов их расположение и величину определяют, нагнетая подкрашенную воду в кладку: по количеству поглощенной воды и местам выхода ее наружу можно судить о состоянии тела опоры.

За общими деформациями опор устанавливают систематическое инструментальное наблюдение. Деформации опор могут быть замечены по положению опорных частей и пролетных строений: перекосы и угон катков, сдвиги опорных подушек и другие дефекты могут произойти не только из-за неудовлетворительной работы опорных устройств, но и в результате смещения самих опор. Для длительного наблюдения за деформациями опор закладывают марки и измерением расстояний между ними, нивелированием, визированием теодолитом, отвесами и другими приемами фиксируют положение опор через определенные промежутки времени. Марки нивелированием привязывают к постоянному реперу.

3.2 Особенности осмотра опор

Порядок осмотра опор следующий:

- основание;
- фундамент;
- тело;
- оголовок (ригель, насадка, карнизный или подферменный ряд);
- подферменники.

Основным источником получения сведений о состоянии оснований и фундаментов является техническая документация, при ознакомлении с которой уделяют внимание правильности производства работ при сложных технологических процессах (погружение свай с подмывом, подводное бетонирование и др.).

Кроме того, данные о состоянии оснований и фундаментов могут быть получены на основании анализа общих деформаций опор, определяемых по их просадкам и наклонам, размерам зазоров в деформационных швах, смещениям подвижных опорных частей, а также на основании анализа результатов съемок русла реки.

Проанализируем наиболее характерные дефекты опор, которые могут быть выявлены при их осмотре.

А) Характерные общие дефекты массивных и гибких опор:

отсутствие стационарных смотровых приспособлений на опорах высотой более 4 м;

- недостаточность защитного слоя бетона на железобетонных элементах опор – арматура "светит", что свидетельствует о ее коррозии;
- сколы, трещины подферменных столиков (подферменников);
- замусоренность оголовка опоры;
- отслоение и разрушение бетонного слива.

Б) Характерные дефекты гибких опор:

– несоответствие схемы секционного моста в натуре проектным предпосылкам (заклинивание шва температурной опоры; сваи опор не в одном створе – имеют беспорядочные наклоны поперек и вдоль моста, что превращает опору из плоской в козловую; нерасчетное защемление свай в грунте в натуре и т.п.);

– просадки и крены опор из-за недостаточной глубины погружения свай или некачественном (замыв) погружении свай на расчетную глубину; просадки также часто наступают из-за размывов при паводках или при проезде по мосту тяжеловесного транспорта;

– просадки и крены опор из-за проломов дна и отвала стенок фундамента стаканного типа сборных опор-стенок (признак возможной просадки – трещины в бетоне стыка омоноличивания блоков тела опоры-стенки);

– размораживание бетона свай, стоек, тела сборных или монолитных опор-стенок в зоне колебания межлетнего уровня вод или в уровне земли;

– продольный эксцентриситет ригеля (насадки) относительно тела опоры-стенки или свай, влекущий непредусмотренные проектом усилия в элементах опоры;

- трещины и разломы в верхней зоне корня консолей ригелей (насадок) опор;
- поперечные трещины по всей высоте свай свайных опор;

- продольные трещины вдоль свай с обнажением рабочей арматуры на свайных опорах;
- поперечные трещины по низу насадки в "безмоментных" опорах в случаях внецентренного опирания балок пролетного строения.

В) Характерные дефекты массивных опор:

- просадки и крены опор;
- трещины и разломы фундамента;
- трещины и разломы тела опор;
- размораживание бетона тела опор в зонах систематического увлажнения в зимний период (зона колебания меженных вод, периодическое увлажнение через неисправный деформационный шов, зоны контакта с грунтом пойм) с уменьшением сечения элемента по бетону и арматуре;

- расстройство облицовочной кладки из натурального камня;
- разломы, сколы, трещины на ригелях и подферменных (карнизных) рядах опор;
- замусоренность подферменных рядов, приводящая к заклиниванию опорных частей.

Для типовых фундаментов стаканного типа под сборные опоры-стенки характерны проломы днища фундамента и отвал стенок по основным нижеперечисленным причинам:

- недостаточность высоты днища фундамента по сравнению с проектом;
- отсутствие заделки свай в теле фундамента;
- сваи обрезаны на уровне подошвы фундамента;
- смещение двойной арматуры днища фундамента в одну плоскость на дно фундамента;
- некачественный бетон фундамента;
- отсутствие тампонажного слоя бетона;
- раздельное бетонирование стакана фундамента.

Опоры из каменной кладки, имеющие большой срок службы необходимо обследовать более тщательно. При осмотре таких опор следует обращать внимание на качество расшивки швов, наличие выветривания, расстройство подферменных и облицовочных камней, выщелачивание цементного раствора. В наиболее старых опорах необходимо выявлять места разрушения кладки: трещины и щели в швах, выпадение отдельных камней или целых блоков, неравномерную осадку кладки и ее расчленение вертикальными трещинами и пр.

В облицованных опорах следует выявлять поверхностные трещины, проходящие в облицовке, а также глубокие, проникающие в глубь тела опоры (иногда сквозные). Для определения глубины трещин используют щупы, нагнетание подкрашенной жидкости или же вскрывают облицовку.

В опорах из сборных бетонных и железобетонных элементов (в виде блоков или контурных элементов), а также в столбчатых опорах из свай-оболочек с заполнением следует обращать внимание на состояние швов, а также блоков, контурных элементов (особенно в зоне контактов друг с другом) и оболочек, где возможно образование трещин из-за различного температурного расширения оболочки и ее заполнения. В комбинированных опорах, состоящих из массивной нижней части и колонн, следует проверять наличие вертикальной трещины в массивной части между колоннами, раскалывающей опору. Диагностика дефек-

тов – визуальная, с помощью лупы, отстукивание молотком, замер расстояний между марками, нивелирование и визирование теодолитом.

3.3 Ремонт опор

При текущем содержании опор мостов ремонтируют швы кладки, сливы, штукатурку опоры на небольших участках, устройства защищающие опоры от подмыва и др. Ремонт швов в опорах из каменной кладки и бетонных блоков в большинстве случаев состоит из восстановления расшивки швов, которую делают цементно-песчаным раствором состава 1:1 и 1:2. Перед расшивкой расчищают швы от слабого старого раствора и промывают струей воды. После этого раствор с силой набрасывают мастерком в шов и разделяют расшивником. При малых объемах работ швы расчищают вручную зубилом, крейцмейселем и т. п., при значительных объемах – механизированным пневматическим инструментом; цементный раствор подают специальными нагнетательными насосами.

На сливных площадках опор периодически (по мере повреждения) восстанавливают смазку цементным раствором. Старую, потрескавшуюся и отставшую смазку удаляют металлическими щетками, скребками и наносят новую на предварительно увлажненную поверхность из цементно-песчаного раствора состава 1:1 или 1:2. После нанесения смазки всю поверхность слива подвергают железнению. Уклон сливов должен быть не менее 1:10.

Наружные местные повреждения в бетонных и железобетонных опорах (выколы, раковины) устраняют оштукатуриванием цементно-песчаным раствором состава 1:1 (первый слой) и 1:3 (последующие слои). Для улучшения сцепления штукатурки на поверхности делают насечку, поверхность перед штукатуркой смачивают водой. Каждый из последующих слоев наносят после схватывания предыдущего; все слои кроме последнего, заглаживать не нужно.

При перекладке распавшиеся кордонные и карнизные камни, снимают: очищают их и нижележащий ряд кладки от старого раствора и промывают, затем камни устанавливают на клинья по уровню и отвесу, а швы заливают цементно-песчаным раствором состава 1:2. До заливки раствора швы снаружи герметизируют – заделывают бумагой, паклей и т. п., которые удаляют после схватывания раствора. Затем расшивают швы и очищают металлическими щетками лицевые поверхности камней нижележащей кладки от потеков цементного раствора и т. п.

Нередко при ремонте опор приходится устранять повреждения облицовки. На рисунке 3.2 а показано разрушение облицовки.

При местных повреждениях – выколах, трещинах камни облицовки заменяют новыми: их ставят на цементно-песчаный раствор состава 1:1 или 1:2. Если облицовка повреждена на больших участках, для улучшения связи со старой кладкой заделывают петли-анкеры, к которым новые камни крепят скобами, скрутками и т. п. Такие работы выполняют при капитальном ремонте опор. На участках выше горизонта воды облицовку ремонтируют с подмостей, а ниже горизонта – под защитой специальных ограждений с водоотливом. Зимой такие работы выполняют под защитой ледовых перемычек, образуемых способом вымораживания.

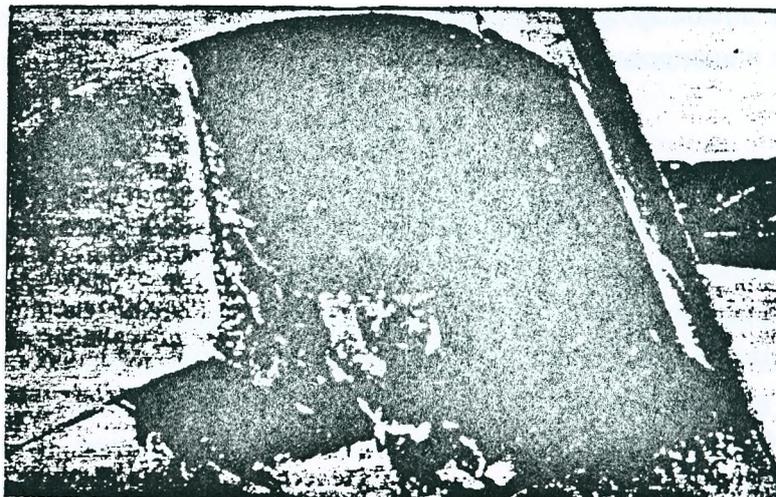


Рисунок 3.2 а Разрушение облицовки.

Участки выветрившейся облицовки штукатурят по металлической сетке: на поврежденных участках делают насечку и забивают анкеры, к которым прикрепляют арматурную сетку из проволоки диаметром до 6 мм с ячейками 5-10 см. После очистки и промывки поверхности водой наносят штукатурку из цементно-песчаного раствора состава 1:2. Таким же способом ремонтируют повреждение поверхности бетонных и железобетонных опор.

При неудовлетворительном состоянии бутовой кладки старых опор (без облицовки) из-за наличия большого числа глубоких трещин (раздробление кладки), откола обратных и передних стенок устоев и т. п. частично перекладывают опоры. Такие работы выполняют при капитальном ремонте по специальным проектам с устройством разгружающих опор, прорезей и пакетных перекрытий. Расстроившуюся кладку разбирают, новую возводят на цементно-песчаном растворе (состав 1:2 или 1:3) с перевязкой швов и расщепенкой, используя старые камни. Новую кладку поддерживают влажной в течение 7 дней. Перекладывают опоры при температуре не ниже +5 °С. Если температура ниже, то работы выполняют в тепляках.

Каменные опоры старых мостов возводили на известковых и цементно-песчаных растворах невысокой прочности, что является одной из главных причин расстройств кладки. Такую кладку при хорошем состоянии массивной облицовки можно восстановить цементацией — нагнетанием под давлением водоцементного раствора в тело опоры. Для этой цели в кладке опоры бурят скважины. Раствор, нагнетаемый через эти скважины, заполняет пустоты и трещины и после твердения связывает кладку. Скважины диаметром 36-75 мм бурят перфораторами по швам облицовки в шахматном порядке с шагом 0,9-1,5 м. С подферменных площадок скважины бурят вертикально, а с боковых поверхностей — наклонно к горизонту под углом не менее 10°.

Длина наклонных скважин должна быть не более $\frac{3}{4}$ толщины опоры при бурении с одной стороны. После бурения всех скважин кладку промывают водой под давлением 0,2 МПа и продувают сжатым воздухом. Воду нагнетают по трубкам, вставленным в скважины, или через инъекторы, заделанные в устье скважины. Промывают кладку сверху вниз горизонтальными рядами до тех пор, пока вытекающая вода не станет прозрачной. Для ускорения процесса промывки кладки в скважины вводят 5%-ный раствор едкого натра. После этого скважины продувают сжатым воздухом под давлением 0,2 МПа и закрывают деревянными

пробками с паклей, которые удаляют только перед цементацией данной скважины. До начала работ в кладке пробуривают 10% проектного числа скважин и испытывают их на удельное водопоглощение – определяется количеством воды, поглощенной 1 м скважины в 1 мин. В зависимости от удельного водопоглощения кладки устанавливается степень ее трещиноватости (крупная, средняя, мелкая), по которой назначают состав инъецируемого раствора, давление и расстояние между скважинами.

Трещины, пустые швы, через которые возможна утечка нагнетаемого раствора, герметизируют. Внутри кладки нагнетают водоцементный раствор состава от 1:10 до 1:1 (отношение цемента к воде по массе). Нагнетать раствор (1:10) начинают при давлении 0,1 МПа, которое постепенно повышают до 0,5-1,0 МПа, доводя раствор до соотношения 1:1. Для улучшения проходимости раствора в него вводят пластифицирующие добавки – сульфатно-спиртовую барду до 0,25% или мылонафт 0,75-1,0 % массы цемента.

В скважины на боковых поверхностях опор нагнетают цементный раствор через иньекторы последовательно снизу вверх, начиная с нижних скважин, а в вертикальные – от центра к наружным.

Для нагнетания раствора применяют различные растворонасосы, развивающие давление до 10-15 атм (рис 3.3).

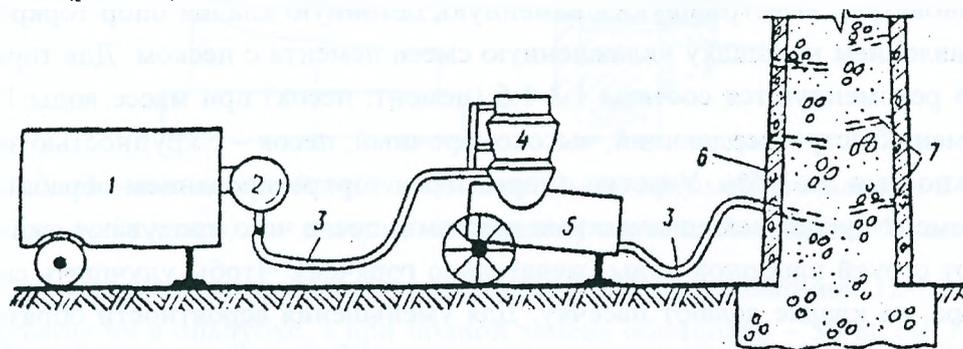


Рисунок 3.3 Установка для цементации кладки: 1 – компрессор; 2 – воздушный баллон; 3 – резиновые шланги диаметром 18-50 мм; 4 – загрузочный барабан нагнетателя; 5 – смесительный резервуар нагнетателя; 6 – оболочка; 7 – буровая скважина.

Вначале раствор нагнетают под давлением около 1,0 атм., затем давление постепенно повышают ступенями в 0,5 атм. Одновременно с повышением давления уменьшают водоцементное отношение, изменяя его соответственно от 10 : 1 до 1 : 1. В конце нагнетания давление должно быть доведено до предельного (табл. 3.1). По мере заполнения раствором скважины закрывают пробками. Появление потеков или влажных пятен в швах, в местах заделки инъекционных трубок, в зацементированных наружных трещинах, а также заполнение соседних скважин свидетельствует о хорошем проникании раствора в кладку. Цементация кладки считается законченной, если при подаче раствора в предельную скважину под предельным давлением (см. табл. 3.1) в течение 10-15 мин поглощения его не происходит.

Цементацию выполняют по заранее составленному проекту. В проекте на основании тщательного изучения сооружения, определения прочности кладки и ее состояния назначают расположение и глубину скважин, состав инъекционного раствора, режим нагнетания, оборудование и т.д.

Таблица 3.1

Вид и состав цементируемой кладки	Предельное давление в конце нагнетания, атм
Слабая, трещиноватая каменная или кирпичная	2 – 5
Прочная, хорошо сохранившаяся каменная или кирпичная (при цементации отдельных трещин)	5 – 8
Слабая, пористая, трещиноватая бетонная	3 – 6
Хорошо сохранившаяся бетонная	6 – 12
Железобетонная (при цементации тонких трещин)	12 – 15

Правильность ведения процесса нагнетания определяют по появлению влаги, просачивающейся через конопатку трещин, пробки, закрывающие вышележащие скважины. При температуре ниже +5 °С кладку цементируют в тепляках. Скважины считаются качественно зацементированными, если поглощение цементного раствора при принятом давлении прекращается. Проверяют качество цементации кладки не ранее чем через 5 сут контрольным нагнетанием цементного раствора в дополнительно пробуренные скважины. Непрохождение раствора свидетельствует о хорошем качестве цементации. Водоцементные растворы нагнетают ручными или механическими насосами, обеспечивающими давление до 1,0-1,2 МПа.

Трещиноватую, выветрившуюся каменную, бетонную кладки опор торкретируют – наносят под давлением на кладку увлажненную смесь цемента с песком. Для торкретирования опор мостов рекомендуются составы 1:3-1:5 (цемент, песок) при массе воды 10-15% массы цемента; цемент быстротвердеющий, высокомарочный; песок – с крупностью зерен не более 5 мм и влажностью до 3-5%. Участки опоры перед торкретированием обрабатывают сухим песком из цемент-пушки, металлическими щетками, после чего продувают сжатым воздухом и промывают струей напорной воды (желательно горячей). Чтобы улучшить сцепление торкрет-раствора, на кладке делают насечку. Для уменьшения вероятности образования в торкретном покрытии усадочных трещин и придания ему большей прочности слой торкрета целесообразно армировать металлической сеткой из проволоки диаметром 2-4 мм с ячейками размером 5-10 см. Сетку устанавливают после подготовки поверхности к торкретированию на расстоянии 10-15 мм от нее и крепят к заделанным в кладку стальным штырям, располагаемым с шагом 30-80 см. Торкретное покрытие делают толщиной 20-40 мм в 2-3 слоя полосами шириной до 1,5 м, которые наносят сверху вниз. При нанесении первого слоя сопло торкретной установки должно находиться на расстоянии не ближе 1,0 м, а последующих – не ближе 0,5 м от покрываемой поверхности. Каждый последующий слой наносят после схватывания предыдущего.

Для торкретирования поверхностей каменных и бетонных опор применяют специальное оборудование, состоящее из цемент-пушки (например С-165), компрессора с воздухоочистителем (КС-3 или КС-6), водяного бака, шлангов и сошла.

При значительных расстройках кладки (ядра) и облицовки опоры с образованием «дышащих» под нагрузкой трещин устраивают железобетонные пояса, оболочки, предварительно сделав цементацию кладки изложенным выше способом. Железобетонные пояса устраивают в тех случаях, когда расстройства облицовки ограничены по высоте опоры и встре-

чаются в одном-двух местах. При расстройках облицовки на больших участках сооружают железобетонные оболочки.

Железобетонные пояса (рис. 3.4) делают высотой 1,0-1,5 м, толщиной 25-40 см из бетона класса не ниже В20, а при расположении поясов в уровне деятельных горизонтов воды и льда – не ниже В30. Арматуру поясов прикрепляют к кладке опоры металлическими штырями (анкерами) диаметром 20-25 мм, заделываемыми на глубину 50-75 см (25-30 диаметров). Верхним горизонтальным плоскостям поясов придают уклон в 1/10 для обеспечения стока воды. Участки опоры между поясами, на которых обнаружены незначительные расстройки, оштукатуривают.

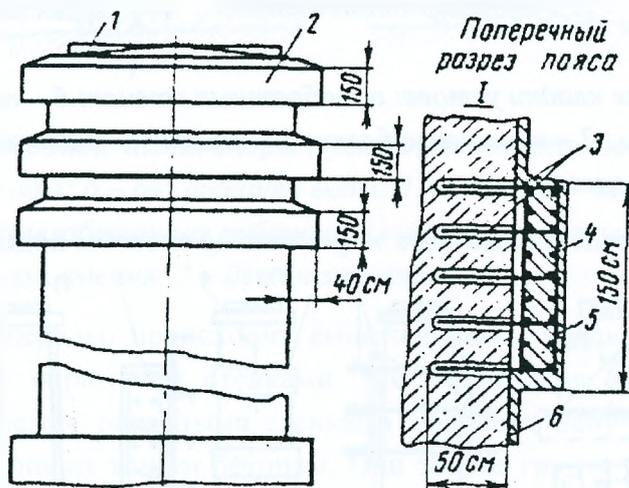


Рисунок 3.4 Конструкция железобетонных поясов: 1 – подферменный камень; 2 – железобетонные пояса; 3 – анкера; 4 – арматура пояса; 5 – хомут; 6 – штукатурка.

Железобетонные оболочки без снятия облицовки делают толщиной 12-15 см при условии бетонирования их в опалубке, а при полной замене облицовки – 50-60 см. Оболочку армируют стальными сетками из стержней диаметром 20-25 мм с ячейкой 10-20 см и крепят к штырям (анкерам) диаметром до 20 мм, заделываемым в кладку на глубину 8-10 диаметров. На устоях оболочку устраивают по наружным открытым поверхностям, заводя ее в грунт конуса насыпи на 40-50 см. На промежуточных опорах низ оболочки опирают на обрез фундамента, прокладной ряд, пояс, а верх подводят под карнизные камни, прокладные ряды.

При местных повреждениях кладки опор, угрожающих безопасности движения устанавливают в качестве временной меры стягивающие хомуты и тязи, балки из различных прокатных профилей. Например, кладку обратных стенок устоев (рис. 3.5 а) можно подкрепить тязями, пропускаемыми через кладку стенок и засыпку устоя. Под гайки тязей устанавливают большие шайбы. Кладку передних стенок устоев можно подкрепить каркасом из двутавров, устанавливаемых в плоскости передней стенки, и тязями с винтовыми натяжными муфтами (рис. 3.5 б). Тязи одним концом закрепляют за каркас, а другим – за анкерные балки, закрепленные за устоем или в кладке обратных стенок. Кладку промежуточных опор подкрепляют хомутами из тязей из круглого или полосового железа стягиваемых муфтами.

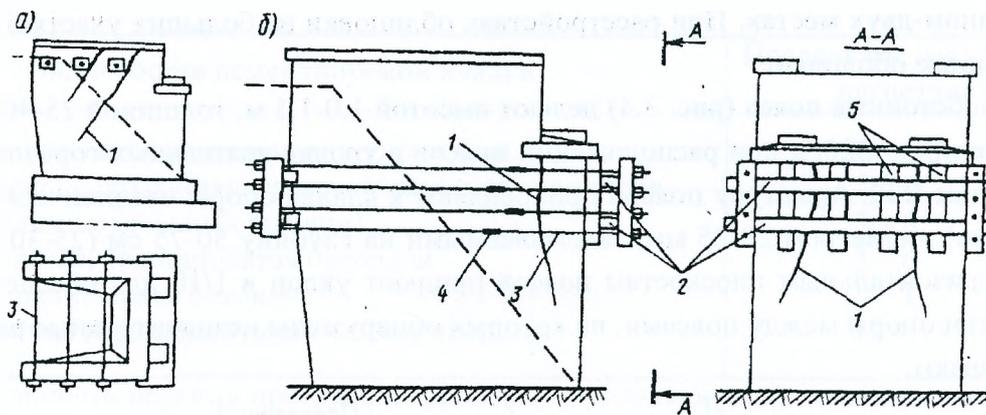


Рисунок 3.5 Подкрепление кладки устоев: а – обратных стенок; б – передней стенки; 1 – трещины; 2 – каркасные балки; 3 – тяжи; 4 – натяжные муфты; 5 – распределительные брусья.

На рисунке 3.6 приведены наиболее эффективные способы подкрепления опор.

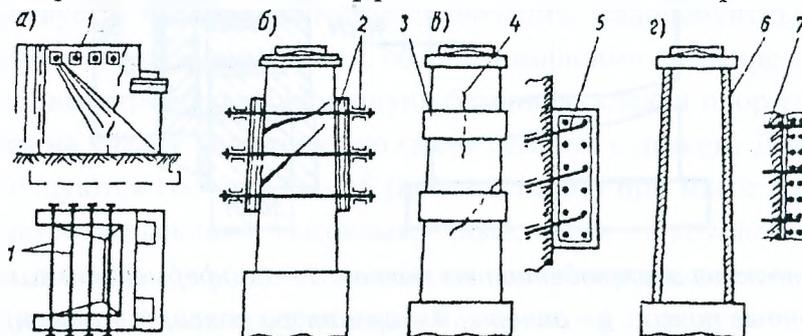


Рисунок 3.6 Стальные крепления, железобетонные пояса и оболочки на опорах.

Бетонные или железобетонные рубашки, бетонируемые с водоотливом или подводным способом, устраивают при расстройках кладки опор в подводной части и в фундаментах. Водонепроницаемые перемычки вокруг опор создают так: устраивают шпунтовые, ряжевые, металлические или железобетонные ограждения, затем подводным способом бетонируют тампонажную подушку толщиной 0,5-1,5 м и после ее затвердения откачивают воду. По мере откачки воды устанавливают распорки между телом опоры (фундамента) и перемычкой, герметизируют ограждения, затем обследуют кладку опоры и фундамента. После подготовки наружной поверхности кладки и установки арматурного каркаса бетонируют рубашку (рис. 3.7 а); если необходимо, цементируют кладку. Водонепроницаемую перемычку можно создать способом вымораживания.

Подводную часть опор можно отремонтировать бетонированием подводным способом (рис. 3.7 б). Для этой цели элементы железобетонных и металлических ограждений устанавливают с плавучих средств, подвесных подмостей. Дно вокруг опоры перед опусканием ряжевых, металлических каркасов для железобетонных перемычек расчищают и планируют каменной или щебеночной отсышкой. Ограждения подводной части опор при бетонировании рубашек с водоотливом в последующем разбираются, а при бетонировании подводным способом – остаются, выполняя роль дополнительной защиты.

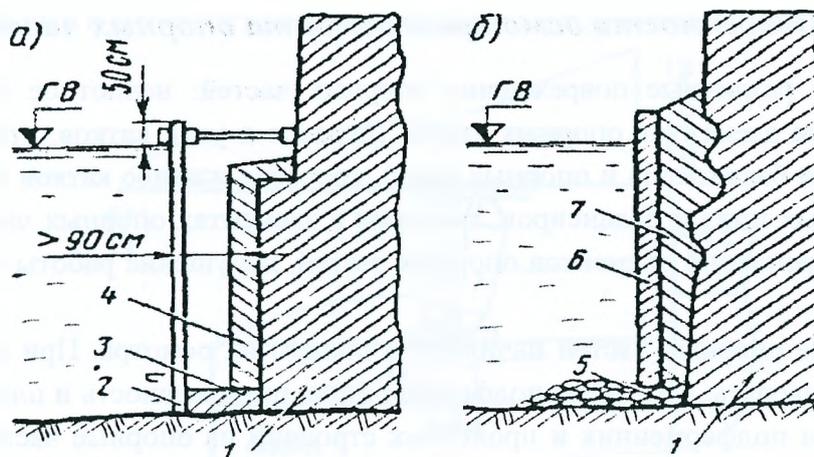


Рисунок 3.7 Ремонт подводной части опоры с устройством железобетонной рубашки: а – с откачкой воды; б – без откачки воды; 1 – опора; 2 – шпунт; 3 – подводный бетон; 4 – железобетонная рубашка; 5 – каменная отсыпка; 6 – железобетонная оболочка ограждения; 7 – бетон заполнения.

В устоях мостов нередко происходит выщелачивание кладки и пучения грунта из-за скопления воды между обратными стенками. Для устранения этих явлений пучинистый грунт в пространстве между обратными стенками заменяют непучинистым (песок, гравий, щебень и т.п.) или заполняют тощим бетоном. При замене грунта за устоем устраивают новый дренаж и изоляцию внутренних поверхностей кладки обмазкой их горячим битумом. Если необходимо, ремонтируют кладку устоя с заделкой швов и трещин цементным раствором. Для замены грунта и устройства дренажа за устоем делают прорезы, перекрываемые разгрузочными пакетами (рис. 3.8). Прорезы по мере их разработки крепят закладными досками, стойками и распорками. Разгрузочный пакет опирают одним концом на переднюю стенку устоя, а другим – на подушку.

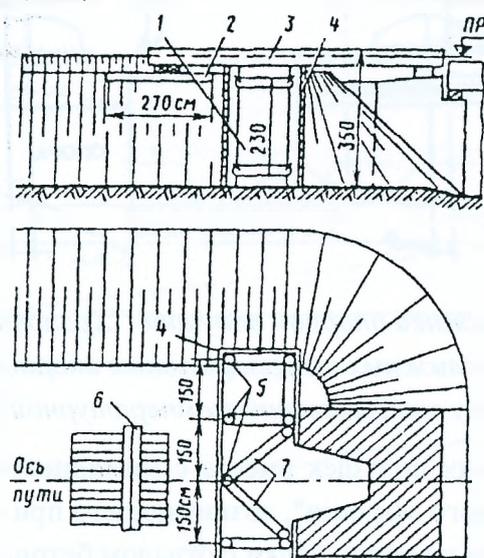


Рисунок 3.8 Замена грунта за устоем с устройством прорезы в насыпи: 1 – прорезь; 2 – подушка; 3 – инвентарное пролетное строение; 4 – стенка из досок; 5 – стойки; 6 – опорные брусья; 7 – распорки.

3.4 Особенности осмотра и ремонта опорных частей

Встречаются различные повреждения опорных частей: неплотное опирание, неправильное положение элементов опорных частей (перекос и угон катков, отклонение от проектного положения балансиров и опорных плит), коррозия и износ катков и контактных поверхностей опорных плит и балансиров, трещины в элементах опорных частей, ослабление или разрушение креплений элементов опорных частей, нарушение работы защитных футляров и др.

Обследование опорных частей начинают с общего их осмотра. При осмотре опорных частей следует проверять: состояние подферменников; равномерность и плотность опирания опорных частей на подферменник и пролетных строений на опорные части; наличие анкеровки и креплений; состояние сопряжения элементов опорных частей между собой и состояние их конструкций (наличие трещин, коррозия металла, загрязненность и пр.); положение катков и других элементов опорных частей.

Наиболее характерны следующие дефекты опорных частей (опираний):

А. Для стальных опорных частей тангенциального типа:

- коррозия видимых стальных элементов в зоне опирания – закладных деталей, сварных стыков, верхних и нижних опорных подушек, фиксаторов;
- выталкивание нижних опорных подушек из зон опирания из-за отсутствия сварного шва или разрыва (некачественное выполнение швов) либо проявление "храпового эффекта" в зоне контакта одного из нижних ребер поперечной грани верхней опорной полушки с нижней опорной подушкой (рис. 3.9);

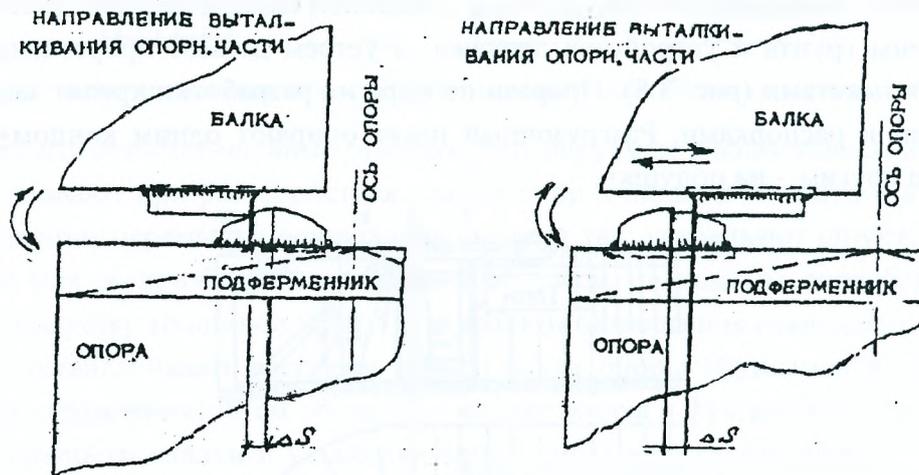


Рисунок 3.9 Выталкивание нижней опорной подушки ("Храповой эффект") при неправильном опирании подвижных тангенциальных опорных частей (ΔS – сдвижка (зарубка) на величину максимальной температурной деформации за год).

- отрыв нижних опорных подушек вместе с закладными пластинами и бетоном зоны опирания вследствие "храпового эффекта", возникающего при отрицательных температурах;
- вертикальные разломы по торцу балки с отвалом бетона по ребру балки;
- отсутствие смазки на контактных поверхностях опорных частей;
- мусор по верху опоры, закрывающий опорные подушки;
- разрушение подферменников.

Б. Для стальных и железобетонных валков подвижных опорных частей (рис. 3.10):

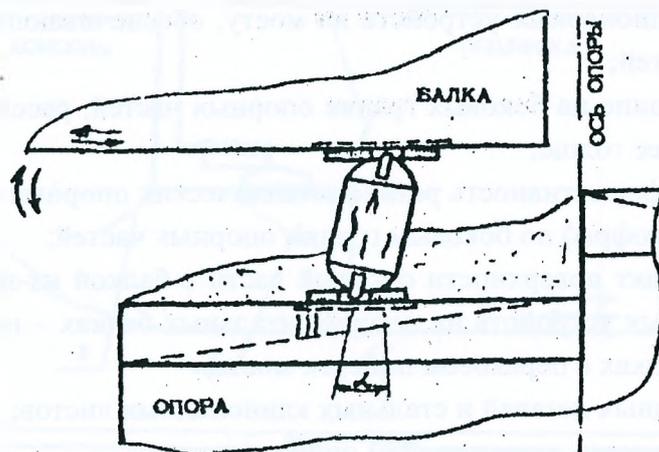


Рисунок 3.10 Дефекты железобетонных валков.

– коррозия видимых стальных элементов опорных частей – верхней и нижней опорных полушек, валков, катков, болтов анкерных и крепежных, фиксаторов, верхнего и нижнего окаймления железобетонных валков, элементов кожухов;

– трещины и раковины в бетоне железобетонного валка;

– недопустимые наклоны валков;

– перекося и угон катков или валков;

В. Для резинометаллических и полиуритановых опорных частей (рис. 3.11):

– выход из зацепления фиксирующего зуба;

– отсутствие анкерных болтов на опорных плитах или гаек на болтах;

– отсутствие смазки на контактных поверхностях опорных частей;

– отсутствие защитных кожухов;

– мусор по верху опоры, закрывающий подферменники и валки (катки);

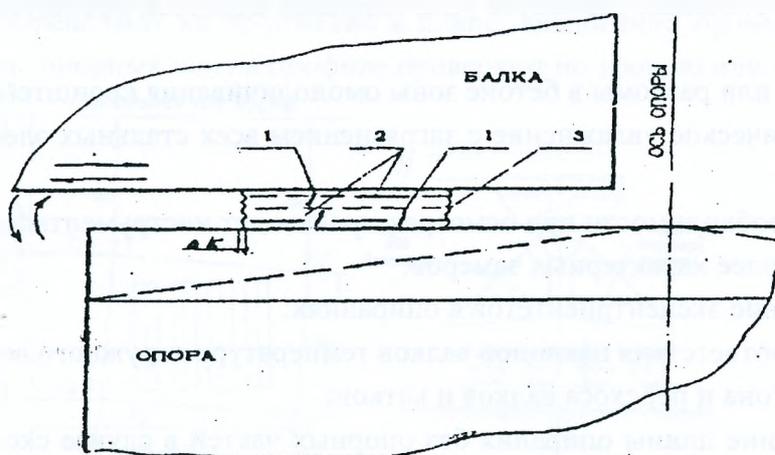


Рисунок 3.11 Дефекты резинометаллических опорных частей: 1 – вертикальные трещины; 2 – горизонтальные трещины; 3 – волны ("гофры") на боковых поверхностях. (при $\Delta K = 2$ мм и более опорная часть считается раздавленной).

- разрушение подферменников.
- отсутствие стационарных устройств на мосту, обеспечивающих быструю замену отказавших опорных частей;
- трещины по резине на боковых гранях опорных частей, расслоение резины и коррозия стальных листов в ее толще;
- повышенная деформативность резинометаллических опорных частей, признаком чего является волнистость (гофры) по боковым граням опорных частей;
- неполный контакт поверхности опорной части с балкой из-за отсутствия клиновидных элементов или иных устройств на негоризонтальных балках – на мостах с продольным уклоном, а также на балках с перекосом поперек моста;
- коррозия закладных деталей и стальных клиновидных листов;
- мусор поверху опоры, закрывающий опорные части.

Характерные дефекты опираний без опорных элементов на прокладке из рубероида или толя:

- сколы торцов балок с оголением каркасов несущей арматуры балок;
- сколы бетона ригелей (насадок) опор в зоне опирания с оголением арматуры;
- разрывы фасадных граней ригелей (насадок) опор;
- недостаточность длины опирания балок при сколах бетона балок и ригелей опор (при длине опирания менее 15 см требуется ремонт зоны опирания).

Характерные дефекты комбинированных опорных частей:

- коррозия металлоэлементов опорной части;
- деформации и разломы фиксирующих и направляющих элементов опорной части;
- отсутствие или повреждение защитных водонепроницаемых брезентовых (прорезиновых) чехлов.

Характерные дефекты для остальных "шарниров" подвесок приведены на рисунке 3.12.

Это:

- коррозия стальных элементов узла опирания подвесок-кронштейнов, серьги, шарнира (пальца);
- трещины или разломы в бетоне зоны омоноличивания кронштейна;
- систематическое увлажнение с загрязнением всех стальных элементов опорного узла подвесок.

В случае необходимости при осмотрах производят инструментальные измерения.

Виды наиболее характерных замеров:

- определение эксцентриситетов в опираниях;
- оценка соответствия наклонов валков температуре наружного воздуха в тени;
- оценка угона и перекоса валков и катков;
- определение длины опирания без опорных частей в случае сколов торцов балки или ригеля (насадки) опор;
- определение положения в плане плоских или тангенциальных опорных частей;
- определение годовых перемещений ("зарубок") при выталкивании нижних опорных подушек (при "храповом эффекте").

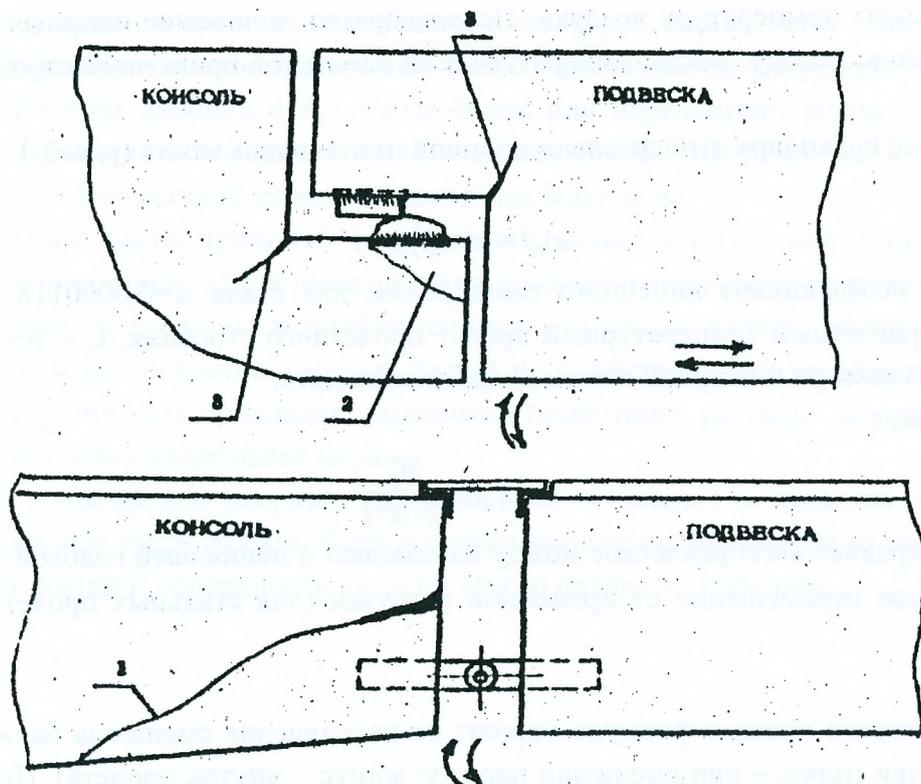


Рисунок 3.12 Дефекты опирания (шарниров) рамно-подвесных и валочно-консольных систем; 1 – разлом железобетона в зоне анкеровки кронштейна, коррозия металлоэлементов шарнира; 2 – разлом бетона в зоне анкеровки с вырывом закладной детали; 3 – трещины.

Правильность положения опорных плит в плане проверяют измерением расстояний от оси моста и от оси опоры (поперек моста) до характерных точек плиты (вершины углов плиты, пересечение осей плиты и т.п.), измеряя расстояния от сторон опорной плиты до осей катков (рис. 3.13 а), определяют их положение в плане; аналогично проверяют положение балансиров. Положение опорных плит в профиле проверяют по уровню или нивелировкой.

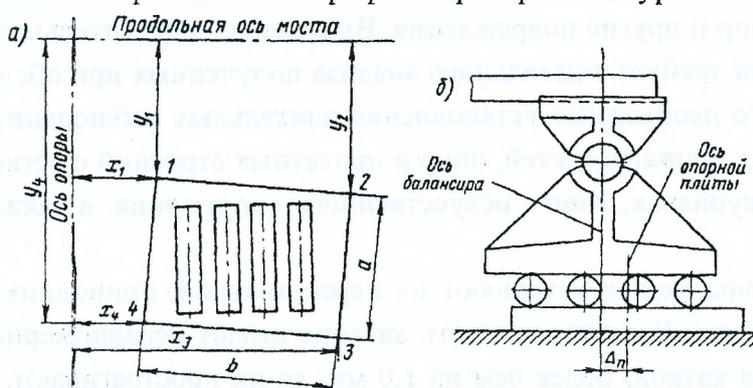


Рисунок 3.13 Схемы к определению положения подвижной опорной части: а – в плане: плиты и катков; б – смещения балансира относительно опорной плиты.

Зная взаимное положение отдельных элементов опорных частей, можно установить смещение их центров, перекося и другие характеристики. При этих измерениях обязательно

нужно записывать температуру воздуха. Целесообразно положение опорных частей проверять в пасмурную погоду, когда температура всех элементов пролетного строения примерно одинакова.

Смещение балансира относительно опорной плиты вдоль моста (рис. 3.13 б) при температуре t

$$\Delta_{п} = (t - t_0) \cdot \alpha \cdot l$$

где α – коэффициент линейного расширения, для стали $\alpha=0,000118$, для бетона – $0,00010$; l – расчетный температурный пролет пролетного строения; t_0 – температура, при которой оси балансира и опорной плиты должны совпадать.

Принимают

$$t_0 = t_{cp} \pm \frac{\Delta_k}{2 \cdot \alpha \cdot l}$$

где t_{cp} – среднее алгебраическое между наивысшей и наименьшей годовой температурой; Δ_k – продольное перемещение от временной нагрузки (для стальных пролетных строений $\frac{\Delta_k}{2 \cdot \alpha \cdot l} \approx 14$).

Знак у второго члена в формуле зависит от направления смещения балансира от подвижной нагрузки (плюс – при смещении наружу; минус – внутрь пролета). При вычислении t_{cp} годовые температуры подставляют со своими знаками. Нормальное отклонение центра катков от оси опорной плиты определяется величиной $\Delta_{п}/2$. Разность между измеренным и расчетным смещением оси балансира относительно оси опорной плиты равна дополнительному смещению, которое может быть следствием неправильной установки при сборке или смещения опор в процессе эксплуатации.

В пролетных строениях, особенно ориентированных с востока на запад, на смещение опорных частей и появление в них повреждений оказывает влияние неравномерность нагрева главных ферм: одна ферма нагревается солнцем сильнее другой, что приводит к изгибу пролетного строения в горизонтальной плоскости. В результате в опорных частях, препятствующих повороту концов пролетного строения в плане, могут появиться перекосы и сдвиги, трещины в кладке опор и другие повреждения. Выяснение действительной причины повреждения опорных частей требует тщательного анализа полученных при обследовании материалов. Иногда для этого необходимо установление длительных наблюдений и периодических измерений положения опорных частей, опор и пролетных строений с регистрацией результатов в специальных журналах, Книге искусственного сооружения, а также непосредственно на опорах.

Перекосы и угоны катков устраняют их перестановкой, приподнимая домкратами конец пролетного строения. Если поверхности катания имеют неравномерный износ (углубления в зонах опирания катков) более чем на 1,0 мм, то их протрагивают. Неравномерно изношенные катки протачивают на токарных станках. При значительном смещении балансира подвижных опорных частей относительно плит может потребоваться передвижка опорных плит или балансира и даже пролетного строения вместе с неподвижными опорными частями.

В случае упирания пролетного строения в шкафную стенку устоя кладку устоя вырубают или укорачивают консоли продольных балок. При взаимном упоре пролетных строений на быке укорачивают консоли продольных балок или передвигают пролетные строения в продольном направлении. Устраняя последствия смещений в опорных частях, предусматривают меры, предотвращающие их накопление в последующем.

Сравнительно часто причиной повреждений является неплотное опирание опорных частей на подферменники: увеличивается динамическое воздействие на конструкцию, в результате появляются трещины в подферменниках, опорных плитах, расстройство кладки опор и др. Неплотное опирание опорных частей на подферменники устраняют при помощи свинцовых или резиновых прокладок, подливкой цементного раствора под давлением, подсыпкой цемента и тому подобными мерами.

Развитие повреждений опорных частей во многом зависит от качества их содержания. Подвижные опорные части должны быть надежно защищены футлярами от попадания пыли, мусора и влаги. Катки и поверхности катания нужно натирать графитом.

4 Содержание, осмотр и ремонт металлических мостов

4.1 Общие сведения о содержании металлических мостов

На автомобильных дорогах и в городах эксплуатируется большое число мостов со стальными пролетными строениями.

Старые мосты выполнены из сварочного железа. По сравнению с современными сталями сварочное железо имеет более низкий предел текучести, относительное удлинение и ударную вязкость. Сварочное железо неоднородно, имеет большие шлаковые прослойки, способствующие расслоению металла. Такое железо непригодно для электросварки. Как показывают наблюдения, в коррозионном отношении оно несколько лучше современных сталей, однако при расслоении металла ржавчина глубоко проникает в его толщу. В настоящее время пролетных строений из сварочного железа эксплуатируется сравнительно мало.

Мосты более поздней постройки выполнены из литого железа, по своим свойствам близкого к современным сталям.

В современных условиях для мостов применяют углеродистые и низколегированные стали (ст. 3 мост., М16С, 15ХСНД и пр.), в достаточной степени обеспечивающие надежность мостовых конструкций. Элементы конструкций соединяют при помощи заклепок, точеных болтов и электросварки. В последние годы все чаще применяют фрикционные соединения на высокопрочных болтах.

Старые пролетные строения имеют ряд конструктивных недостатков и часто не соответствуют современным требованиям. Так, главные фермы обычно имеют многораскосную решетку из полосовой стали с недопустимой гибкостью стержней; поясам характерны сильно развитые горизонтальные пакеты и большие эксцентриситеты в узлах; вертикальные листы элементов, в том числе и сжатых, не окаймлены уголками жесткости; заклепки в узлах и стыках поставлены слишком часто и близко к кромкам листов, расстояние же между связующими заклепками чрезмерно большое и пр. Балочная клетка старых мостов также часто не отвечает современным требованиям, особенно в конструкции прикрепления продольных балок к поперечным, которые раньше осуществляли без «рыбок» и «столиков».

Эти недостатки конструкций старых пролетных строений снижают надежность их работы и требуют усиленного надзора и содержания для продления срока их службы.

Современные стальные мосты имеют более совершенную и надежную конструкцию, однако и за ними необходимо внимательное наблюдение и уход, особенно за новыми системами пролетных строений и видами соединений. Особенно тщательно должно быть поставлено наблюдение за мостами в северных районах с суровым климатом, в районах с сильно загрязненной атмосферой.

Наиболее распространенный дефект стальных мостов – коррозия металла, которая представляет собой сложный электрохимический процесс, обусловленный разнообразными факторами.

В мостах преимущественно наблюдается так называемая атмосферная коррозия, основной причиной которой является увлажнение металла и воздействие на металл вредных газов (преимущественно сернистого). Интенсивное ржавление могут вызвать блуждающие токи, возникающие при недостаточной изоляции электропроводов, уложенных в конструкции мостов.

та. В первую очередь коррозия поражает плохо окрашенные поверхности и места скопления воды: горизонтальные листы поясов коробчатого и Н-образного сечения, фасонки горизонтальных связей, узлы сквозных ферм и балочной клетки и т. д. Интенсивно развивается ржавчина в щелях и замкнутых пазухах, легко загрязняемых мусором и удерживающих влагу продолжительное время. Быстро ржавеют верхние пояса балок в местах опирания на них деревянных элементов" проезжей части.

Объем, занимаемый ржавчиной, в несколько раз превышает то количество металла, из которого она образовалась. Вследствие этого при развитии коррозии металл выпучивается (рис. 4.1 а) на участках между редко поставленными связующими заклепками; в некоторых случаях это приводит к отрыву заклепочных головок.

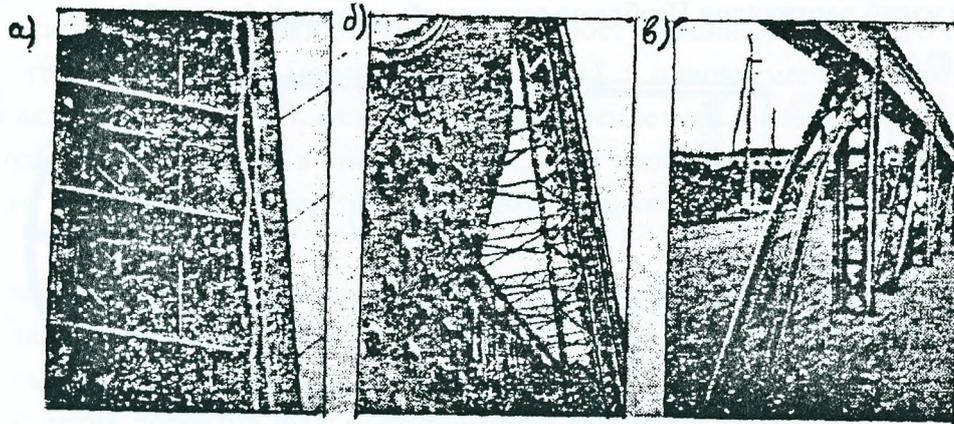


Рисунок 4.1 Местные деформации металлической конструкции.

Весьма опасны трещины в металле.

Трещины возникают преимущественно в зонах концентрации напряжений: в высадках, в местах резкого изменения сечения, например, в узловых фасонках, по крайним рядам заклепок узловых соединений, вблизи сварных швов и т. д. Трещинообразование в большинстве случаев объясняется снижением усталостной прочности металла, преимущественно наблюдаемой в сжато-растянутых и растянутых стержнях ферм и в элементах, подверженных интенсивному динамическому воздействию временной нагрузки. Большое внимание имеет также повышенное содержание в металле серы и фосфора, увеличивающих его хрупкость. Вероятность образования трещин, особенно в сварных конструкциях, повышается в мостах, расположенных в северных районах с низкими отрицательными температурами. В фасонных профилях, преимущественно в двутавровых балках больших номеров, иногда появляются трещины от внутренних напряжений при прокате. Аналогичные трещины могут быть в стальных отливках.

Кроме трещин силового происхождения, иногда наблюдаются трещины вследствие расслоения металла. Эти трещины возникают вдоль кромок проката и постепенно распространяются по его ширине. Расслоение главным образом свойственно сварочному железу, но оно может встретиться также и в толстомерных листах из современной стали.

Трещины можно обнаружить только при тщательном осмотре конструкций. Наружными признаками их могут быть разрушение около трещин краски и потеки ржавчины. Для на-

блюдения за развитием трещин следует периодически замерять их раскрытие и длину, отмечая на конструкции краской их распространение и указывая дату наблюдения.

Местные деформации в стальных конструкциях возникают при недостаточной жесткости элементов или действии случайных сил большой величины. Пример выпучивания вертикального листа опорного раскоса, не укрепленного по свободной кромке уголком жесткости, приведен на рис. 4.1б. Нередко встречаются погнутости стержней решетчатых ферм от удара автомобилей (рис. 4.1в) и других случайных причин.

В сварных конструкциях вследствие усадочных деформаций сварных швов и недостаточной правки листов на заводе-изготовителе часто наблюдаются грибовидные коробления поясов сплошных балок и выпучины вертикальных листов между ребрами жесткости (рис. 4.2а), а также изгиб вертикалов Н-образных сечений стержней (рис. 4.2б).

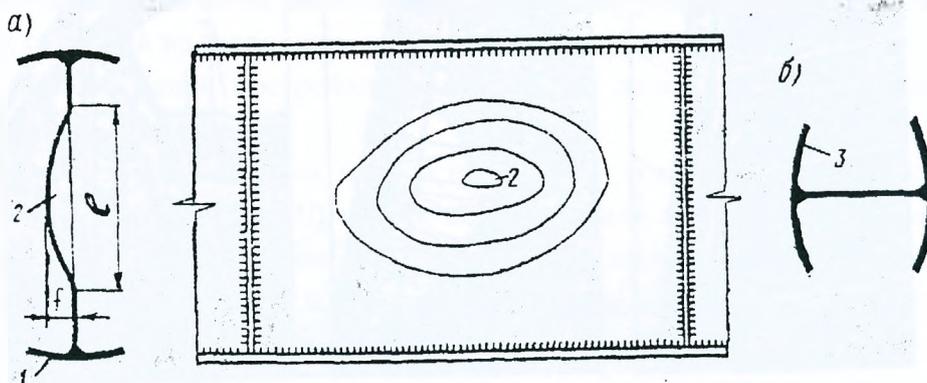


Рисунок 4.2 Деформации сварных элементов: 1 – коробления поясных листов; 2 – выпучина вертикального листа; 3 – изгиб вертикалов.

Величину местных деформаций замеряют стальной линейкой, натягивая проволоку вдоль деформированного элемента. Предельные допустимые величины погнутостей и выпучин деформированного участка могут быть приняты равными:

$$f/l$$

Для элементов сжатых не более 1/500

То же, растянутых не более 1/300

Для вертикальных листов не более 1/250

Основные дефекты заклепок показаны на рис. 4.3а. Особенно недопустимы слабые заклепки рабочих соединений, неплотно заполняющие заклепочные отверстия.

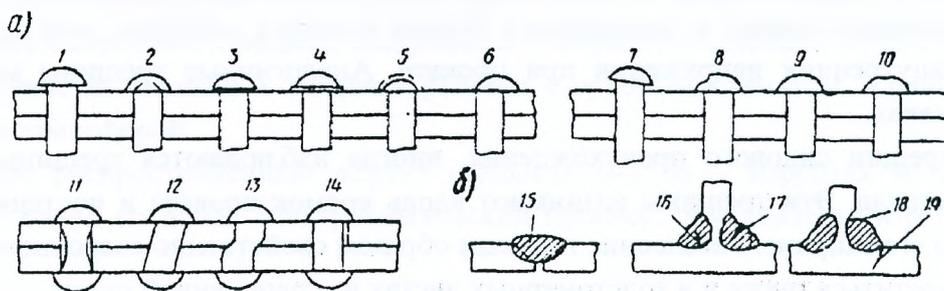


Рисунок 4.3 Основные дефекты заклепочных и сварных соединений: 1 – неплотная головка; 2 – трещиноватая головка; 3 – не прижатая головка; 4 – венчик; 5 – маломерная головка; 6 – сбитая головка; 7 – косая головка; 8 – зарубленная головка;

*9 – зарубленный металл; 10 – побитая головка; 11 – неплотная заклепка;
12 – косая дыра; 13 – чернота; 14 – овальная дыра; 15 – непровар шва;
16 – внутренняя трещина шва; 17 – наружная трещина шва; 18 – надрез металла; 19 – трещины в основном металле.*

Слабые заклепки чаще встречаются в прикреплениях сжато-вытянутых раскосов, в прикреплениях продольных балок к поперечным, в узлах продольных и поперечных связей.

Наружные дефекты заклепок выявляют путем осмотра и обмера. Зазор между заклепочной головкой и основным металлом замеряют при помощи набора щупов – металлических пластинок различной толщины. Внутренние дефекты можно обнаружить только при удалении заклепки. Иногда около дефектных заклепок появляются ржавые потеки и нарушения слоя краски. Слабые заклепки обнаруживают простукиванием. Для этого по головке заклепки наносят боковые удары молотком весом 0,2 кГ и одновременно к противоположной стороне головки прикладывают палец руки: слабая, неплотная заклепка при ударах дрожит, что ощущается пальцем. Однако в старых мостах, если заклепки сильно поражены коррозией и неплотности заклепочного отверстия заполнены ржавчиной, этот способ может и не дать результата.

Дефектами сварных швов являются (рис. 4.3 б) непровар, шлаковые включения, трещины, а также наружные пороки – неровная поверхность, разбрызгивание металла, несоответствие проектным размерам и пр.

Для выявления дефектов швы осматривают и замеряют. Неровная поверхность и темный цвет очищенного от краски шва служат признаками плохого выполнения и вероятности внутренних дефектов. Мелкие наружные поры и волосные трещины выявляют осмотром шва через лупу. Внутренние трещины и поры можно обнаружить протравливанием шва керосином. Для этого шов с одной стороны покрывают разведенным в воде мелом, и после его просушки противоположную сторону шва смазывают керосином. В дефектных швах керосин, легко проникая через мельчайшие поры, выступает на покрытой мелом поверхности желтыми пятнами. В необходимых случаях применяют выборочную рассверловку шва с травлением поверхности углубления 10-15 %-ным раствором соляной или азотной кислоты и последующим осмотром ее через лупу. Более тщательно швы контролируют ультразвуком или другими методами дефектоскопии.

В пролетных строениях с железобетонной проезжей частью необходимо следить за состоянием железобетонных плит. Плита всегда участвует в общей работе пролетного строения, и в ней в зонах действия растягивающих усилий нередко возникают трещины. Наиболее часто трещины наблюдаются в надпорных участках неразрезных балок, а также в разрезных пролетных строениях с ездой понизу. Трещины располагаются перпендикулярно к оси моста и при большом развитии и плохом состоянии гидроизоляции могут стать причиной интенсивной коррозии бетона, арматуры и стальных конструкций. Возможны также трещины и сколы бетона в местах объединения плит с балками. Нарушения прочности плит в зонах объединения снижают несущую способность балок и должны ликвидироваться в первую очередь.

В опорных частях пролетных строений часто наблюдается загрязнение и поражение ржавчиной, неправильное положение катков, неплотное опирание ферм на опорные части и другие дефекты.

Одними из признаков нарушения нормальной работы опорных частей служат угон и перекося катков. Угон – это параллельное смещение катков относительно проектного положения, перекося – поворот их в плане.

Расчеты смещений каретки, нижнего балансира и перекося катков приведены в п. 3.4.

Если угон катков превышает 50 мм или перекося 10 мм, то опорные части нужно выправлять.

Нарушение нормальной работы опорных частей, кроме плохого ухода, некачественного заводского изготовления (например, конусности и овальности катков) и ошибок при монтаже, могут быть вызваны смещениями пролетных строений и подферменных площадок опор. Смещения пролетных строений с проектных осей могут возникнуть из-за неравномерного нагрева ферм, случайных ударов и других причин. Подферменные площадки смещаются при деформациях опор. Последние могут достигать таких величин, при которых уничтожаются зазоры между шкафными стенками устоев и фермами или между смежными пролетными строениями на быках. Эти дефекты следует исправлять, тщательно изучая причины их происхождения.

Отсюда задача содержания стальных пролетных строений – своевременное выявление дефектов и повреждений конструкций и защита металла от коррозии.

Дефекты выявляют детальным осмотром конструкции, обращая особое внимание на те узлы и элементы, в которых наиболее вероятны механические повреждения и коррозия металла. Все обнаруженные дефекты отмечают краской на конструкции. Если дефекты не требуют немедленных устранений, то за ними устанавливают наблюдение и исправляют при ближайшем ремонте пролетного строения.

Для предупреждения ржавления необходимо защищать металл от загрязнения и увлажнения. Проезжую часть, водоотводные устройства и деформационные швы нужно содержать в исправном состоянии, конструкции периодически очищать от грязи, снега и льда. Особое внимание должно быть обращено на очистку коробчатых и Н-образных поясов, узлов главных ферм, фасонки ветровых связей и опорных частей. Чтобы не повредить окраску, очищать металл надо мягкими метлами и деревянными лопатами; применять стальные лопаты и ломы нельзя. В необходимых случаях в горизонтальных листах поясов и узлах ферм просверливают дренажные отверстия для стока воды: допустимый размер отверстия проверяют расчетом конструкции на прочность.

Ремонт стальных конструкций, за исключением мелких повреждений и систематической окраски, требует обычно привлечения специализированных строительных организаций, обладающих необходимыми средствами и квалифицированной рабочей силой.

4.2 Классификация повреждений и особенности их проявления

Накоплен большой опыт эксплуатации металлических пролетных строений, особенно клепаных, при различных условиях их работы (по уровням нагруженности, климатическим

условиям, интенсивности движения и грузонапряженности и др.) и сроках службы. Этот опыт широко используется при прогнозировании характера повреждений металлических пролетных строений, возникающих в процессе длительной эксплуатации, выяснении причин появления и скорости их развития, оценке влияния повреждений на грузоподъемность пролетных строений и их долговечность, безопасность движения и т. д.

Информация, получаемая с эксплуатируемых мостов, наиболее достоверна, комплексно отражает все процессы действительной работы конструкций, что трудно воспроизвести даже при самых совершенных лабораторных испытаниях. Поэтому данные эксплуатационной проверки мостовых конструкций всегда служат главным критерием оценки их долговечности и надежности, важным источником для уточнения методов расчета, совершенствования методов проектирования и технологии изготовления конструкций мостов.

Повреждения (дефекты) металлических пролетных строений мостов классифицируются по таким признакам: по виду повреждения, скорости развития до опасной стадии, степени опасности, принадлежности к определенным частям конструкции, частоте появления (массовости).

По виду повреждения различают: расстройство заклепочных соединений; усталостные повреждения в виде трещин в элементах или полностью разрушенные элементы; коррозия; потеря местной или общей устойчивости отдельных элементов или их частей; трещины; механические повреждения.

По скорости развития до опасной стадии существуют повреждения развивающиеся: мгновенно (трещины при хрупком разрушении; потеря устойчивости и т. п.); быстро (например, усталостные макротрещины); постепенно (расстройство болтовых и заклепочных соединений, коррозия и т. п.).

По степени опасности могут быть повреждения: весьма опасные – с высокой вероятностью могут быстро привести к прекращению эксплуатации сооружения или его разрушению (трещины, потеря устойчивости отдельных элементов пролетного строения и др.); опасные – могут вызвать серьезные нарушения нормальной эксплуатации (например, расстройство заклепочных соединений, развитие сильной коррозии и др.); малоопасные – ухудшающие условия работы конструкции, оказывая некоторое влияние на развитие других повреждений (например, перекося катков опорных частей).

По принадлежности к определенным частям пролетного строения различают повреждения: балок проезжей части; главных ферм или главных балок; связей.

По частоте появления (массовости) существуют повреждения: массовые; часто встречающиеся; редко встречающиеся.

Повреждения металлических пролетных строений – следствия многих причин, к которым, прежде всего, относятся: низкое качество металла и изготовления конструкции; конструктивные недостатки; несоответствие расчетных предпосылок действительным условиям работы; плохое содержание сооружения; особенности климатических условий; вид перевозимых грузов; несоблюдение габарита подвижного состава; характер воздействия подвижной нагрузки.

Расстройство заклепочных соединений. Это одно из наиболее распространенных и прогрессирующих повреждений эксплуатируемых клепаных пролетных строений мостов.

Главная причина расстройств заклепок – механический износ соединений, который зависит, прежде всего, от взаимных суммарных перемещений (сдвигов) соединяемых элементов по поверхностям их контактов. Суммарные сдвиги находятся в прямой зависимости от интенсивности движения, напряженного состояния соединений, характера динамического воздействия нагрузки. Большое влияние на скорость износа оказывают конструктивные особенности соединения, среда, в которой они работают, и качество изготовления.

Расстройство заклепочных соединений – серьезное повреждение, которое наряду с увеличением динамического воздействия усилий на прикрепляемый элемент и соединение, деформативности соединений и пролетного строения в целом приводит к значительному повышению концентрации напряжений у заклепочных отверстий. Коэффициент концентрации напряжений для заклепочных отверстий в зависимости от степени износа соединения может изменяться в несколько раз.

С возрастанием концентрации напряжений около заклепочных отверстий увеличивается скорость накопления усталостных повреждений и вероятность появления усталостных трещин, особенно в элементах, работающих при многократно повторяющихся знакопеременных или переменных растягивающих усилиях. Поэтому обычно усталостным разрушениям элементов с заклепочными соединениями предшествует расстройство заклепок. Расстройство заклепочных соединений – длительный процесс. Оно неуклонно растет по мере увеличения срока эксплуатации.

В изношенных соединениях изменяется характер передачи усилий. Из-за значительного расстройства заклепок к кромкам отверстий проникают влага и агрессивные газы, способствующие появлению коррозии и ускоряющие развитие усталостных и коррозионно-усталостных трещин на кромках отверстий в зонах максимальной концентрации напряжений.

В главных фермах заклепки часто расстраиваются в прикреплениях раскосов (особенно средних) и подвесок к верхним узлам, в прикреплениях элементов продольных и поперечных связей между главными фермами и в пересечениях элементов решетки, главных ферм и связей. В прикреплениях раскосов и подвесок к нижним узлам главных ферм слабые заклепки встречаются пока редко.

В проезжей части заклепочные соединения расстраиваются в прикреплениях продольных балок к поперечным, особенно если не поставлены «рыбки», верхних поясных уголков к стенкам продольных балок. Часто расстраиваются прикрепления элементов продольных и поперечных связей между продольными балками.

Расстраиваются заклепочные соединения неравномерно: сначала ослабляются заклепки крайних наиболее напряженных поперечных рядов; соединения с односрезными заклепками при прочих равных условиях расстраиваются быстрее, чем с двухсрезными. Слабые заклепки обнаруживаются при простукивании молотком.

Если заклепка слабая, то чувствуется легкое дрожание головки. Чувствительность повысится, если вместо пальца к головке заклепки прижать стальной стержень длиной 10-12 см и толщиной 5-6 мм с утолщением на конце. Слабую заклепку можно определить и по звуку, возникающему при ударе: она глухо дребезжит. Ржавые потеки из-под головок заклепок или по контактам соединяемых элементов, трещины в окраске около заклепочных головок – при-

знак расстройства соединения. В этом случае детально проверяют простукиванием все заклепки.

Усталостные повреждения. Усталость материала – процесс постепенного накопления повреждений при действии многократно повторяющихся усилий, приводящий в определенных условиях к усталостному разрушению, которое происходит в результате постепенного развития трещины. Свойство материала противостоять усталости называется выносливостью. Усталость – процесс избирательный, происходящий, как правило, в локальных зонах элементов конструкций, где наблюдается максимальная концентрация напряжений. На поверхности излома – на участках зарождения трещин усталости образуются характерные начальные пятна усталости.

На рис. 4.4 показаны схемы главных ферм клепаных пролетных строений, в которых чаще всего наблюдаются усталостные повреждения раскосов.

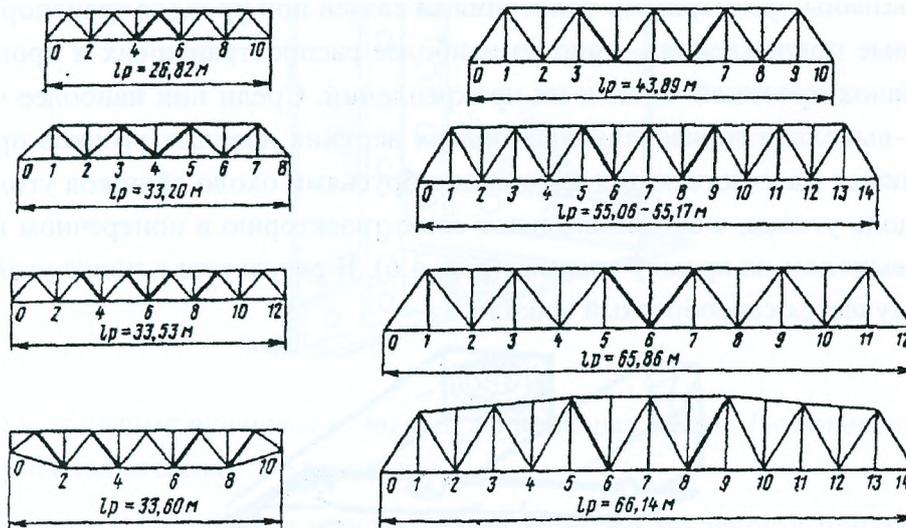


Рисунок 4.4 Раскосы с усталостными разрушениями (выделены жирными линиями).

Все усталостные трещины начинаются в зонах максимальной концентрации напряжений у кромок заклепочных отверстий первого, второго и очень редко третьего поперечного ряда заклепок, считая от середины раскоса (рис. 4.5).

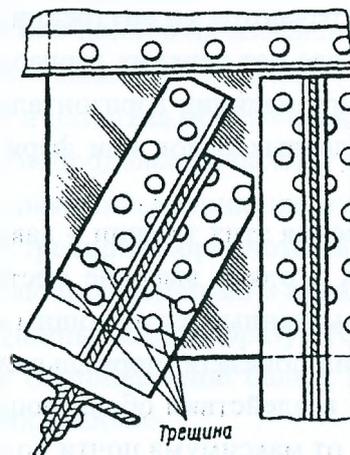


Рисунок 4.5 Усталостные трещины в раскосах.

Развитие трещины происходит в поперечном направлении к продольной оси элемента.

Трещина зарождается в зоне пересечения кромки отверстия с плоскостью, перпендикулярной продольной оси раскоса и проходящей через центр отверстия. Иногда ее начало смещается до $1/5$ диаметра отверстия вдоль оси раскоса по направлению к его концу. При этом начальная зона разрушения (характерное пятно усталости) располагается, как правило, в вершине угла, образованного поверхностью контакта раскоса с фасонкой и стенкой отверстия. В этих зонах концентрация напряжений максимальная.

Появлению усталостных трещин всегда предшествует расстройство заклепок на участке прикрепления элемента, где возникла трещина. В раскосах и подвесках, прикрепленных двухсрезными заклепками, такие повреждения почти не встречаются. Нередко усталостные трещины возникают в элементах связей между главными фермами и обычно развиваются от кромок заклепочных отверстий на участках прикрепления элементов связей к фасонкам. Эти повреждения вызваны чрезмерными колебаниями связей при проходе транспорта.

Усталостные повреждения – одно из наиболее распространенных и прогрессирующих повреждений балок проезжей части и их прикреплений. Среди них наиболее часто встречаются трещины–выколы в горизонтальных полках верхних поясных уголков продольных балок. Они возникают на участках под мостовыми брусьями около обушков уголков и сначала развиваются вдоль уголка, а затем изменяют свою траекторию в поперечном направлении с последующим выходом на кромку уголков (рис. 4.6). В результате в полке уголка под мостовым брусом получается своеобразный выкол.

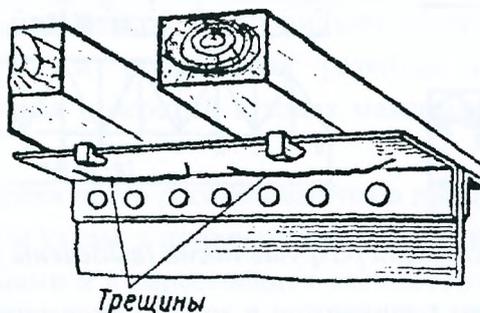


Рисунок 4.6 Усталостные трещины в поясных уголках продольных балок.

Повреждения такого типа встречаются во внутренних и в наружных поясных уголках. Обычно они появляются в балках, где нет верхних горизонтальных поясных листов, но уже были случаи возникновения их и при наличии горизонтальных листов. Аналогичные повреждения обнаруживают в поясах главных балок или ферм при опирании на них мостовых брусьев.

Основная причина возникновения этих трещин – давление мостовых брусьев вызывает в горизонтальных полках поясных уголков высокие местные напряжения, которые в ряде случаев превышают напряжения, вызванные изгибающим моментом в продольных балках в вертикальной плоскости. Испытания показали: нормальные напряжения около обушка уголка в поперечном направлении при воздействии обращающихся нагрузок достигают 150-200 МПа. Эти напряжения изменяются от максимума почти до нуля.

Сочетание высоких переменных напряжений с большим числом циклов их изменения приводит к появлению усталостных трещин, которые существенно снижают несущую способность балок и безопасность движения.

Иногда возникают усталостные повреждения стенок продольных балок. Наклонные трещины в стенках образуются у кромок заклепочных отверстий второго, третьего и четвертого ряда (считая сверху) прикрепления стенки балки к вертикальным соединительным уголкам (рис. 4.7)

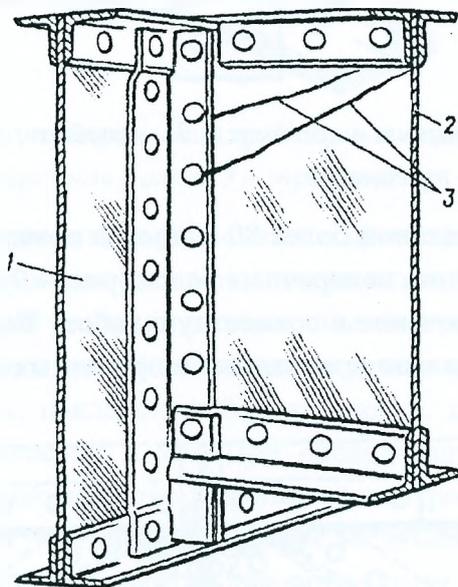


Рисунок 4.7 Усталостные трещины в стенках продольных балок: 1 – поперечная балка; 2 – продольная балка; 3 – трещины.

Появлению этих трещин предшествует расстройство заклепок в прикреплении стенки балки к соединительным уголкам. При некотором несовпадении заклепочных отверстий и из-за расстройств заклепок усилия между ними распределяются крайне неравномерно. Это приводит к высокой концентрации напряжений около заклепочных отверстий с перегруженными заклепками. При этом у кромок верхних заклепочных отверстий создается значительная концентрация растягивающих напряжений. Высокая концентрация растягивающих напряжений с большой повторяемостью циклов их изменения – основная причина возникновения усталостных трещин в стенках балок.

Отмечены случаи появления и развития поперечных усталостных трещин в нижних поясных уголках и по середине стенок продольных балок у кромок заклепочных отверстий или в зоне других концентраторов напряжений, возникших из-за коррозии или механических повреждений. Нередко усталостные трещины образуются в «рыбках» (рис. 4.8) из-за высоких нормальных напряжений от изгибающих моментов в прикреплениях продольных балок к поперечным. Такие усталостные трещины всегда образуются у кромок заклепочных отверстий первого или второго ряда, считая от поперечной балки, а их появлению предшествует расстройство заклепок в прикреплении «рыбки».

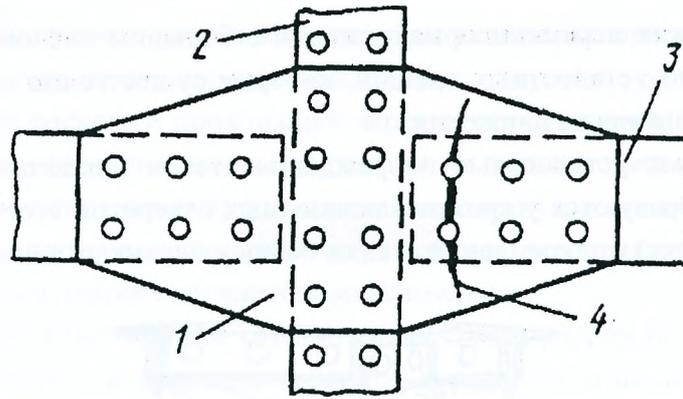


Рисунок 4.8 Усталостные трещины в «рыбках»: 1 – «рыбка»; 2 – поперечная балка; 3 – продольная балка; 4 – трещина.

В пролетных строениях длиной более 80 м иногда появляются усталостные трещины в нижних поясных уголках крайних поперечных балок (рис. 4.9). Одна из основных причин их появления – интенсивное включение в совместную работу балок проезжей части с поясами главных ферм, что особенно сильно проявляется в пролетных строениях, где нет «разрывов» продольных балок.

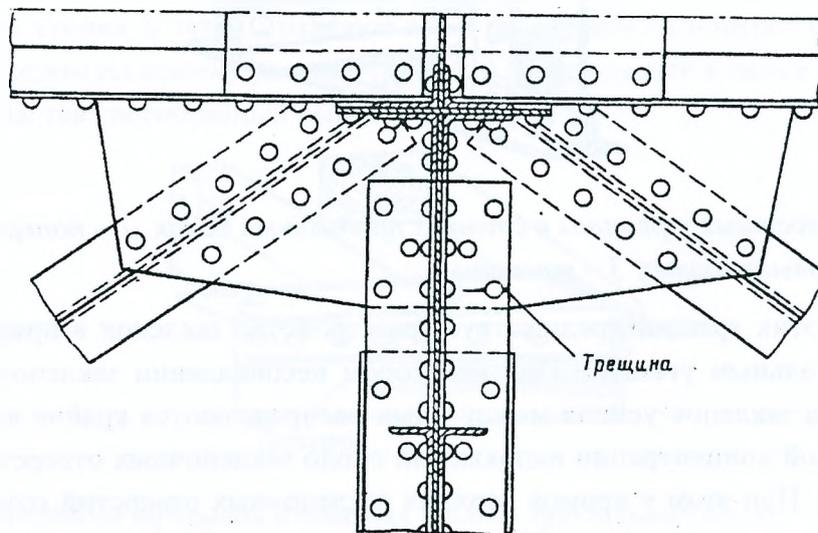


Рисунок 4.9 Усталостные трещины в нижнем поясном уголке поперечной балки.

Часто можно обнаружить усталостные трещины у обушков в уголках прикрепления продольных балок к поперечным (рис. 4.10) особенно в тех, где не поставлены «рыбки» или очень слабые «рыбки».

Развитие этих усталостных трещин вызвано передачей через соединительные уголки значительных продольных сил, возникающих в продольных балках при совместной работе с поясами главных ферм, а также изгибающих моментов в сопряжениях продольных и поперечных балок. Низкой долговечностью и надежностью по выносливости обладают соединения продольных и поперечных балок проезжей части при их этажном расположении независимо от расчетных норм, по которым они запроектированы. В них часто возникают усталостные трещины, главным образом, в полках поясных уголков на участках опирания продольных балок на поперечные и поперечных на главные фермы (балки).

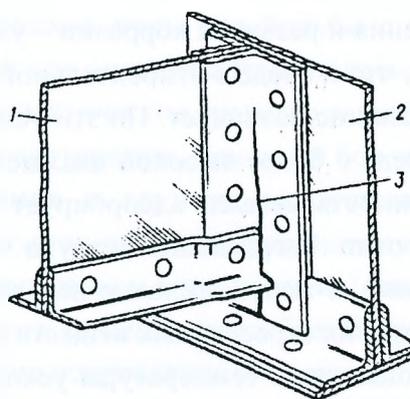


Рисунок 4.10 Трещины в уголках прикрепления продольных балок к поперечным: 1 – продольная балка; 2 – поперечная балка; 3 – трещина.

В сварных пролетных строениях и усиленных с применением сварки усталостные трещины могут возникать в сварных швах и в основном металле, в зонах концентрации растягивающих напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений, вызванных сваркой. К таким зонам относятся участки с резким изменением сечения, вызванным, например, обрывом листов, приваркой планок, накладок, ребер жесткости, диафрагм; концами швов; различного рода заплатами отверстий и т.п. При обследовании металлических пролетных строений на указанные места возможного возникновения трещин обращают особое внимание. Внешний признак трещин – потеки ржавчины и шелушение краски. Крупные трещины можно обнаружить при тщательном осмотре невооруженным глазом или через лупу, а мелкие – при помощи различных приборов, например индукционного дефектоскопа ППД-1. Скрытые трещины и другие дефекты (непровары, шлаковые включения) обнаруживают рентгенографированием ультразвуковыми и электромагнитными приборами.

В полевых условиях для выявления трещин пользуются часто простыми способами: участок, где подозревается трещина очищают от краски и ржавчины, шлифуют наждачной бумагой и протравливают поверхность 10-15% раствором азотной кислоты затем поверхность промывают водой, вытирают насухо и просматривают через лупу или микроскоп. В некоторых случаях вдоль предполагаемой трещины хорошо заточенным небольшим зубилом снимают тонкую стружку. Разделение стружки подтверждает наличие трещины.

С целью предупреждения опасного развития мелких трещин участки конструкции, где они обнаружены (например, концы сварных швов, кромки элементов и т. п.), обрабатывают до полного удаления трещин наждачным кругом, зубилом или напильником, создавая выточку с плавным переходом во избежание высокой концентрации напряжений в этих местах.

Коррозионные повреждения. Длительно эксплуатирующиеся металлические пролетные строения мостов обычно имеют коррозионные повреждения. Коррозионные повреждения, уменьшая площадь сечения элементов, снижают их грузоподъемность, а совместное воздействие коррозии и циклических напряжений может привести к возникновению коррозионно-усталостных трещин. Такие трещины начинаются в зонах концентрации напряжений с разрушения защитной пленки на металле под действием циклических напряжений.

Скорость развития коррозии зависит от способов и качества защиты от коррозии, химического состава металла, агрессивности среды, температуры, напряженного состояния и

др. Главная причина возникновения и развития коррозии – увлажнение поверхности металла. Экспериментально установлено, что в среде с относительной влажностью меньше 40%, даже при наличии загрязнений, коррозия не возникает. Но эти условия не характерны для мостов, находящихся, как правило, в среде с более высокой влажностью. При относительной влажности воздуха более 70% поверхность металла адсорбирует влагу из воздуха в количествах, достаточных для развития коррозии. Загрязнение воздуха частицами хлоридов, сульфидов или газами (например, сернистым), а также оседание на поверхности элементов пролетных строений всякого рода солей и других агрессивных веществ способствует появлению и ускоренному развитию коррозии. Повышение температуры ускоряет коррозию, понижение – замедляет. При отрицательных температурах развитие коррозии практически прекращается.

Пролетные строения с ездой поверху, элементы и узлы которых больше загрязняются, чаще подвержены коррозии, чем пролетные строения с ездой понизу. В пролетных строениях с ездой понизу более интенсивно корродируют элементы, расположенные ниже уровня мостового полотна. Существует два вида коррозии: поверхностная – распределяется по поверхности элемента и местная – отдельные очаги. Поверхностной коррозии подвержены, главным образом, элементы поясов главных ферм и балок проезжей части, связи между главными фермами и продольными балками. В поясах главных ферм из-за отсутствия или недостаточности дренажных отверстий, из-за загрязнения может возникать застой воды, что приводит к коррозии внутренних элементов сечения коробки.

Развитие местной коррозии часто наблюдается в элементах проезжей части. В продольных балках проезжей части наиболее подвержены местной коррозии верхние горизонтальные листы или горизонтальные полки верхних поясных уголков в местах контакта с мостовыми брусками. Ускоренный процесс развития коррозии на этих участках объясняется быстрым разрушением слоя краски в зоне контакта с мостовым брусом и устойчивым увлажнением поверхности.

В узлах прикрепления продольных связей к поясам главных ферм и продольных балок часто причиной коррозии является загрязнение. У поперечных балок местная коррозия разрушает верхние горизонтальные листы и нижние пояса на участках прикрепления к ним фансонок продольных связей между главными фермами.

Развитие коррозии на контактирующих поверхностях может приводить к «распучиванию» соединяемых элементов. Причина этого вида повреждения – конструктивные недостатки – «мешки», щели, пазухи, большой шаг заклепок и т. д., характерные для пролетных строений с многораскосными и многорешетчатыми фермами. Плоские раскосы таких пролетных строений обычно состоят из парных листов, объемлющих в узлах вертикальный лист пояса; нижние узлы прикреплений раскосов к поясам ферм с большим шагом заклепок – наиболее уязвимы для коррозии. Коррозионные повреждения этого типа обнаруживаются также в элементах нижних поясов главных ферм, у которых в вертикальных пакетах соединительные заклепки расположены с большим шагом, и в диагоналях продольных связей, состоящих из двух уголков, соединенных редко поставленными заклепками.

Анализ показал: скорость развития коррозии в элементах мостов при неудовлетворительном качестве защитного слоя достигает в среднем 0,1-0,2 мм/год. При обследовании металлических пролетных строений мостов важно выявить все неблагоприятные места с тем,

чтобы выработать профилактические меры для борьбы с коррозией. Ослабление сечений элементов коррозией учитывают при оценке их грузоподъемности.

Окраска – основное профилактическое средство защиты металла от коррозии. Следует помнить, что коррозию легче предотвратить, чем с ней бороться.

Механические повреждения и хрупкие разрушения. Механические повреждения часто возникают во время эксплуатации при ударах негабаритных грузов по элементам пролетных строений; могут быть нанесены и в процессе их изготовления и при монтаже. Механические повреждения могут быть самыми разнообразными: разрывы отдельных элементов или их частей, местные или общие искривления элементов, пробоины, вмятины (рис. 4.11)

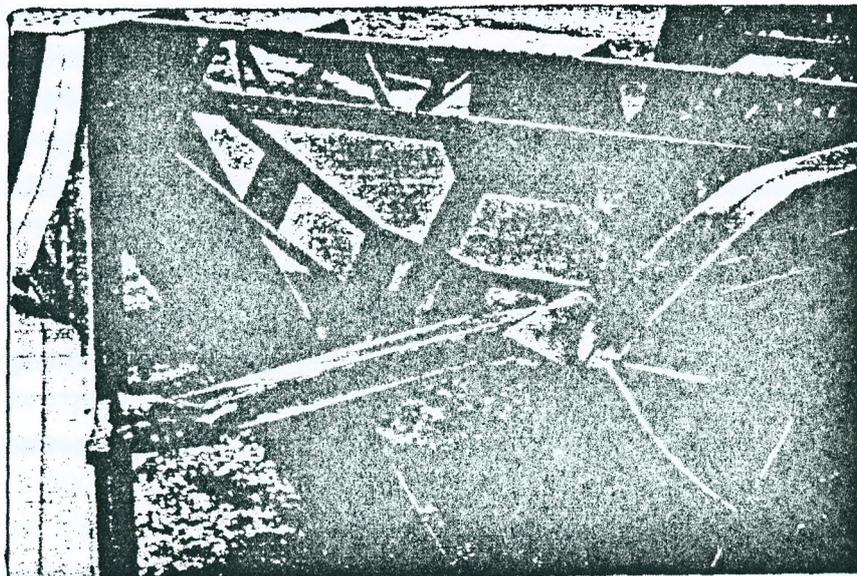


Рисунок 4.11 Механические повреждения связей между главными фермами.

Элементы с механическими повреждениями тщательно обследуют. Степень опасности повреждения устанавливают в каждом конкретном случае. Она зависит не только от размеров повреждения элемента, но и от напряженного состояния и его изменений в связи с появлением дефекта. Элементы, поврежденные ударом, тщательно осматривают с целью выявления трещин, особенно в зоне удара. В искривленных элементах могут возникнуть дополнительные напряжения, а в сжатых – уменьшится сопротивляемость продольному изгибу. Прямолинейность элемента обычно проверяют при помощи натягиваемой вдоль него тонкой стальной проволоки, относительно которой измеряют ординаты (стрелы) искривления. Если стрела искривления сжатых элементов превышает $1/7$ радиуса инерции сечения в плоскости искривления, а в растянутых – $1/10$ высоты сечения, то проверяют допустимость такого искривления и в противном случае принимают срочные меры по усилению или выправке элемента. *Особенно опасны искривления сжатых элементов с одновременным повреждением соединительной решетки между ветвями (погнутости, разрывы).* В таких случаях немедленно принимают меры по усилению и ремонту элемента, если это окажется необходимым по расчету.

Хрупкие разрушения происходят вследствие мгновенного развития трещины при силовом воздействии без заметной пластической деформации. Скорость распространения трещины в металле достигает 5000 м/с. Склонность к хрупким разрушениям зависит от структуры

металла, ориентации кристаллов, химического состава, наличия примесей, формы элемента, вида напряженного состояния, скорости деформирования, температуры окружающей среды и т.д.

4.3 Осмотр стальных и сталежелезобетонных пролетных строений

При осмотре несущих конструкций металлических и сталежелезобетонных пролетных строений следует проверять состояние элементов конструкций, металла элементов и защитных покрытий (окраски), прикреплений и стыков, а также состояние сварных швов и околошовной зоны, заклепочных и болтовых соединений. Необходимо обращать внимание на места, где наиболее вероятно скопление воды и грязи и возможно поражение металла коррозией: корыто- и И-образные элементы; опорные участки конструкций (поперечные балки, связи и пояса), где возможно скопление воды и грязи в результате разрушения или неудовлетворительной работы деформационных швов; места, где вода через швы между железобетонными плитами проезжей части, окна омоноличивания плит, трещины в плите стекает на стальные элементы.

Трещины в металлических конструкциях представляют значительную опасность для сооружения. Они могут развиваться в результате:

- концентрации напряжений в металле, остаточных напряжений от сварки;
- усталостных явлений;
- повышенной хладоломкости металла, либо в результате совокупного действия нескольких факторов.

Вероятные места появления усталостных трещин:

- места прикрепления знакопеременных раскосов, стоек и подвесок к фасонкам главных ферм,
- места прикрепления распорок поперечных связей к ребрам жесткости главных балок;
- горизонтальные полки уголков верхних поясов продольных балок без горизонтальных листов;
- горизонтальные листы верхних поясов сквозных ферм при непосредственном опирании на них мостовых брусьев или плиты проезжей части;
- стенки продольных балок и уголки прикрепления их к поперечным балкам, концевые поперечные связи;
- ортотропная плита проезжей части;
- элементы проезжей части с этажным расположением балок;
- нижние поясные уголки крайних продольных балок проезжей части.

Концентраторами напряжений следует считать места:

- с резким изменением сечения элементов (обрывы листов, неплавное изменение ширины и толщины листов, места примыкания накладок, ребер и т.п.);
- отверстия в элементах, механические повреждения элементов;
- необработанные концы сварных швов и их различные дефекты (непровары, подрезы кромок, наплывы, шлаковые включения, поры, прожоги, несплавления по кромкам, неразделанные кратеры);
- сварные швы, расположенные поперек усилия в элементах.

При выявлении трещин следует ограничить движение по сооружению.

При ограничении массы транспортных средств при неконтролируемом движении автотранспорта максимальную массу следует определять по формуле

$$P = 30 \cdot \frac{K}{II}, (m)$$

где K – действительный класс нагрузки самого слабого элемента конструкции.

Потеря общей устойчивости элементов проявляется в видимом изменении геометрического очертания элементов решетки. Дефект проявляется при действии расчетной или превышающей ее нагрузки и приводит, как правило, к мгновенному обрушению конструкций. Потеря местной устойчивости проявляется изменением очертания сжатых элементов конструкции (волнообразное очертание) и выпучиванием стенок элементов под воздействием близких к расчетным подвижным нагрузкам.

Механические повреждения элементов металлических мостов могут быть вызваны воздействием подвижной нагрузки (удары автотранспортных средств об элементы конструкции), щелевой коррозией металла (вспучивание элементов в зоне коррозии) и др.

Механические повреждения элементов-ферм приводят к изменению геометрического очертания решетки (искривление раскосов, поясов, шпренгелей и т.д.) и вызывают изменение расчетной схемы ферм.

В пролетных строениях со сквозной решеткой необходимо проверять прямолинейность элементов, состояние соединительной решетки, планок и их крепления, выявлять искривления более $1/500$ длины сжатых элементов, связей между фермами и балками, а также искривления более $1/300$ длины растянутых элементов в результате их механических повреждений или перегрева металла.

В несущих конструкциях пролетных строений со сплошной стенкой следует проверять места возможного выпучивания вертикальной стенки и особенно места, где выпучивание превышает $1/250$ наименьшего расстояния между ребрами жесткости или полками балки.

При визуальном осмотре необходимо выявлять и замерять также коробление элементов, вмятины и другие дефекты. Прямолинейность элемента проверяется натягиванием проволоки вдоль кромок элемента и закреплением ее струбцинами к недеформированным участкам.

В сталежелезобетонных пролетных строениях следует проверять состояние стыков объединения железобетонной плиты проезжей части с главными балками.

Внешними, признаками нарушения объединения плиты с балками являются:

- разрушение бетона омоноличивания окон в зоне расположения стальных упоров;
- удары плиты о стальную балку при прохождении временной нагрузки.

Наиболее вероятными местами расшатывания заклепок следует считать:

- пересечения и крепления элементов, работающих на знакопеременные нагрузки;
- крепление гибких элементов (связи, средние раскосы ферм);
- крепление продольных балок к поперечным;
- пакеты при большой толщине их склепки;
- места расположения дефектных заклепок.

Дефектными следует считать заклепки, имеющие:

– неплотное прижатие головки к склепываемому пакету на части головки либо по всему контуру;

- трещиноватость, неоформленность, рябину или зарубку головки;
- зарубку основного металла обжимкой вокруг головки;
- прокорродировавшие головки заклепок;
- срыв головок заклепок вследствие щелевой коррозии элементов.

К основным дефектам фрикционных соединений следует относить:

- отсутствие плотности соединяемого пакета;
- отсутствие натяжения болтов (гайки прокручиваются вручную);
- несоответствие величины натяжения болтов расчетным значениям;
- трещины в болтах и гайках;
- смятие шайб;
- смятие головки болта;
- недостаточную длину болта (длина резьбы после полного закручивания гайки должна составлять не менее одного свободного витка).

Плотность стягивания пакетов следует проверять щупом толщиной 0,3 мм, который не должен входить между частями пакета по кромкам элементов и деталей.

Контроль усилия натяжения (величины крутящего момента) высокопрочных болтов следует выполнять специальным протарированным динамометрическим ключом, отсчет по которому берут в начале поворота головки болта или гайки. Контрольная величина не должна отличаться от расчетной более чем на 20%.

Коррозионные повреждения следует подразделять на два вида:

- поверхностная коррозия (развивается на поверхности элементов и может охватывать значительные площади);
- местная коррозия (развивается очагами в отдельных местах).

Щелевая коррозия является одним из видов местной и развивается при попадании воды между соединяемыми поверхностями элементов решетки и узлов конструкций. Щелевая коррозия приводит к выпучиванию соединяемых элементов, срыву головок заклепок или болтов и значительному снижению несущей способности элементов конструкций.

К дефектам окраски следует относить:

- отсутствие окраски; – шелушение окраски;
- вспучивание и отслаивание окрасочного слоя.

4.4 Ремонт стальных пролетных строений

Во время ремонта стальных пролетных строений исправляют прогнутости и местные деформации отдельных элементов конструкции, заделывают трещины и пробоины, заменяют дефектные заклепки и т. п. Текущий и средний ремонт производят, как правило, без перерыва движения; для капитального ремонта, связанного с расклепкой узлов, движение переводят на обезд.

4.4.1 Исправление прогнутостей и местных деформаций

Металл следует исправлять в холодном состоянии, так как при нагреве может быть легко изменена его структура.

Небольшие местные погнутости исправляют лапой (рис. 4.12 а). Для выпрямления изогнутого на небольшой длине уголка, швеллера и другого фасонного применяют скобу (рис. 4.12 б), винтом которой надавливают на выгнутую часть деформированной детали. При правке скобой под погнутость следует подводить жесткую балку и к ней подтягивать деформированный элемент.

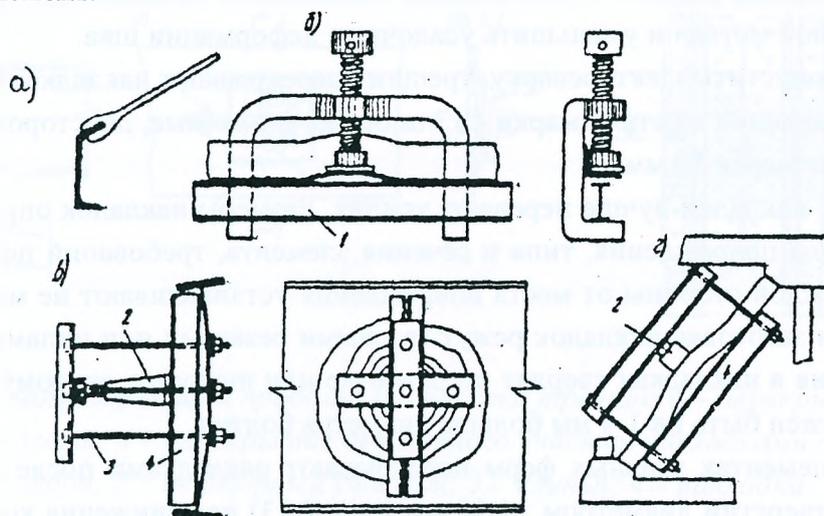


Рисунок 4.12 Исправление местных деформаций: а – лапой; б – скобой; в – исправление вертикальной стенки; г – исправление раскоса; 1 – жесткая балка; 2 – домкрат; 3 – тяж; 4 – контрбалка.

Небольшие выпучины листов можно исправить кувалдой, нанося ею удары через гладилку. Более значительные деформации, например, деформации вертикальных листов балок сплошного сечения, исправляют домкратами с помощью тяжей и контрбалок (рис. 4.12в). Если натяжением все же не удастся исправить выпучины, то вертикальные листы следует укрепить приваркой дополнительных ребер жесткости, пригнанных к очертанию выпучины. Простым способом усиления деформированного участка является также местное обетонирование вертикальной стенки. Для прочного сцепления бетона с металлом следует к стенке приварить достаточное количество анкеров из арматурной стали. Местные деформации стержней сквозных ферм исправляют домкратами (рис. 4.12 г). Для этого может потребоваться расклепка соединительной решетки или планок на протяжении деформированного участка с последующей заменой их новыми.

Элементы ферм со значительными деформациями должны быть полностью или частично заменены новыми. Слабо натянутые плоские раскосы решетчатых ферм, а также гибкие элементы горизонтальных связей при ремонте пролетного строения должны быть подтянуты. Для этого исправляемый элемент разрезают и укорачивают на необходимую величину; образовавшийся стык перекрывают накладками.

Все работы, связанные с разрезкой или удалением отдельных частей конструкций, следует производить по проектам, в которых должны быть предусмотрены меры по разгрузке ремонтируемого элемента от внутренних усилий.

4.4.2 Заделка трещин и пробоин

Трещины в металле заваривают или перекрывают накладками. Заварку применяют в

ответственных элементах конструкции, когда металл допускает электросварку (рис. 4.14а). Перед заваркой концы трещины рассверливают до диаметра 8-12 мм, что предохраняет металл от дальнейшего растрескивания. Далее края трещины разделяют под углом 60-70° и заваривают толстообмазанными электродами или полуавтоматами под слоем флюса с подваркой противоположной стороны. Швы следует накладывать за несколько проходов, чтобы не перегреть основной металл и уменьшить усадочные деформации шва.

Если нельзя допустить электросварку, трещину перекрывают накладками на заклепках.

Применяют накладки из стали марки Ст3 плоские, уголковые, двусторонние и односторонние толщиной не менее 10 мм.

Двусторонние накладки лучше передают усилия. Размеры накладок определяют в зависимости от величины повреждения, типа и сечения элемента, требований по размещению и числу болтов. С каждой стороны от места повреждения устанавливают не менее двух рядов болтов. Металл при заготовке накладок режут газовыми резаками или пилами, кромки обрабатывают. Отверстия в накладках сверлят по разметке или шаблону, снятому с природы. Диаметр отверстий должен быть на 1-4 мм больше диаметра болтов.

Трещины в элементах главных ферм перекрывают накладками после сверления у их концов сквозных отверстий диаметром 14-18 мм (рис. 4.13) для снижения концентрации напряжений. Однако опыт эксплуатации мостов показал, что такими мерами не всегда удается прекратить развитие трещин. Поэтому накладками перекрывают все сечение, а не часть сечения прокатного или сварного элемента, пораженного трещиной. При возникновении поперечной трещины в сварном элементе накладками перекрывают все его сечение, а в составном клепаном – только тот лист или уголок в котором обнаружена трещина. Суммарная площадь сечения накладок должна быть больше или равна площади перекрываемого элемента. Число болтов в полунакладке определяется в зависимости от рабочей площади накладки или прикрепляемого элемента.

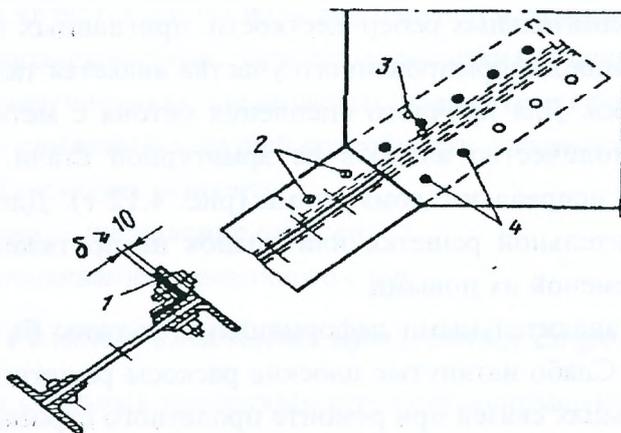


Рисунок 4.13 Перекрытие трещин в элементе раскоса: 1 – уголковая накладка; 2 – высокопрочные болты в новых отверстиях; 3 – отверстие у конца трещины; 4 – высокопрочные болты в старых отверстиях.

При ремонте пробоев поврежденный металл вырезают автогеном так, чтобы был полностью удален поврежденный металл, который по краям пробоев обычно имеет трещины. После этого накладку обваривают по контуру с двух сторон (рис. 4.14б).

Для уменьшения коробления швы следует накладывать небольшими участками попеременно с одной и другой стороны накладки. Для плотного прилегания к основному металлу накладку прижимают клиньями с помощью временных скоб.

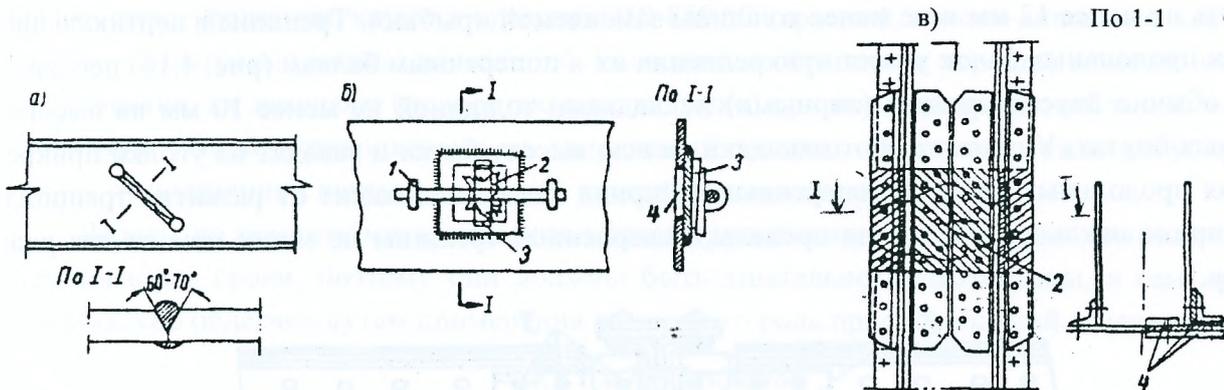


Рисунок 4.14 Ремонт трещин и пробоин: а – заварка трещин; б – перекрытие пробоины на накладками; в – перекрытие дефектного участка накладками на заклепках; 1 – скоба; 2 – дефектный участок; 3 – клинья; 4 – накладки.

При заклепочных соединениях накладки ставят двухсторонние, а зазор между ними заполняют прокладками (рис.4.14 в) При этом для меньшего ослабления элемента во время ремонта рекомендуется перекрывать дефектное место постепенно: вначале отремонтировать одну половину сечения, а затем вторую. Возможность ослабления сечений дополнительными заклепочными отверстиями должна быть проверена расчетом.

Трещины и выколы в горизонтальных полках верхних поясных уголков (листов) продольных балок перекрывают плоскими горизонтальными накладками на всю ширину верхнего пояса балок или уголковыми (рис. 4.15 а, б).

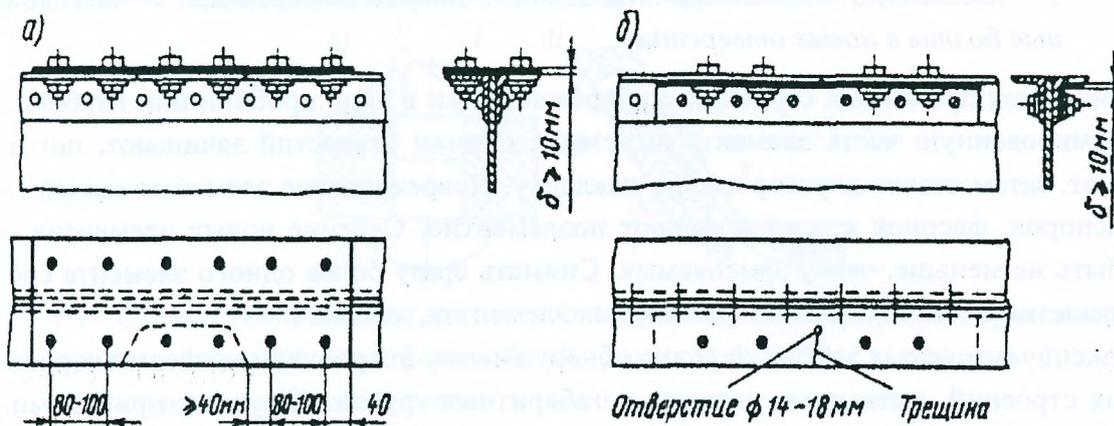


Рисунок 4.15 Перекрытие выколов и трещин в поясных уголках продольных балок накладками плоскими (а) и уголковыми (б).

Угловые накладки необходимо принимать того же сечения, что и поясные уголки, но с осторожкой обушка уголка. Если накладки ставят с наружной стороны продольной балки, то сострагивают горизонтальную полку, чтобы не мешала установке лапчатого болта.

В нижних поясах продольных балок (ферм) трещины и другие повреждения перекрывают плоскими или уголковыми накладками по технологии, описанной выше. Поврежденные «рыбки» заменяют таким же способом как накладки. Минимальная толщина «рыбок» должна быть не менее 12 мм и не менее толщины заменяемой «рыбки». Трещины в вертикальных листах продольных балок у мест прикрепления их к поперечным балкам (рис. 4.16) перекрывают обычно двусторонними (парными) накладками толщиной не менее 10 мм на высокопрочных болтах. Устанавливают накладки на всю высоту балки и заводят на уголки прикрепления продольных балок к поперечным. Ширина накладки зависит от развития трещины. По ширине накладку заводят за пределы засверленной трещины не менее чем на два ряда болтов.

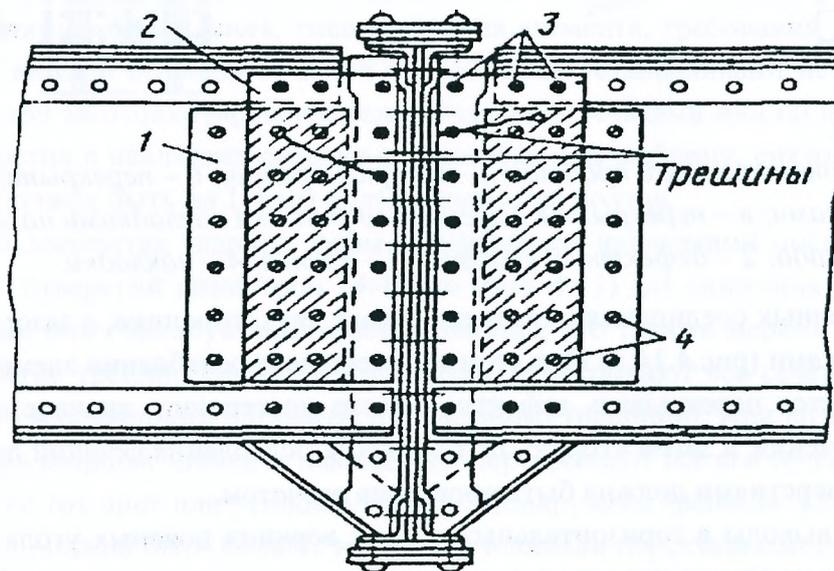


Рисунок 4.16 Перекрытие трещин в вертикальном листе продольных балок: 1 – прокладка; 2 – накладка; 3 – высокопрочные болты в старых отверстиях; 4 – высокопрочные болты в новых отверстиях.

В элементах пролетных строений с повреждениями в виде пробоин или глубоких вмятин деформированную часть элемента вырезают, кромки отверстий зачищают, погнутости выправляют, затем ставят двустороннюю накладку. Поврежденные элементы связей (диагоналей, распорок, фасонки и т.д.) заменяют поэлементно. Сечение новых элементов связей должно быть не меньше, чем у заменяемых. Снимать сразу более одного элемента соединительной решетки в сжатых и сжато-растянутых элементах, нельзя.

На эксплуатируемых мостах нередко обнаруживают искривления отдельных элементов пролетных строений, вызванные ударами негабаритных грузов и другими причинами. Особенно опасны искривления сжатых элементов. Если стрела искривления превышает $1/7$ радиуса инерции сечения, то такое сечение нужно проверить расчетом. При значительном искривлении сжатых элементов их срочно ремонтируют. Временно усилить такие элементы можно деревянными брусками с прикреплением их хомутами. Изогнутые элементы выправляют домкратами или другими приспособлениями, иногда для этой цели их нагревают. Следует помнить, что при холодной выправке в металле протекают пластические деформации, которые приводят к изменению его механических характеристик. При значительных дефор-

мациях и низкой пластичности стали в зоне деформаций (удлинения) могут возникнуть трещины. Подогрев металла при определенных температурах и режимах охлаждения может вызвать неблагоприятные структурные изменения в стали, поэтому нагрев металла в процессе правки строго регламентируют в пределах 750-850 °С (красный, красно-вишневый цвет). Охлаждают подогретый металл постепенно. Если нельзя обеспечить хорошее качество выправки элементов, их заменяют (полностью или частично) при помощи приспособлений, воспринимающих усилие, приходящееся на заменяемый элемент. При этом можно регулировать усилия от постоянной нагрузки во вновь поставленном элементе.

Работы по ремонту металлических мостов трудоемкие, ответственные, выполняются в ограниченные сроки, поэтому они должны быть тщательно подготовлены, а сам процесс максимально облегчен путем применения различного рода приспособлений и механизмов.

4.4.3 Смена заклепок

Смена заклепок может быть сплошной и частичной. При сплошной смене заменяют все заклепки, расположенные в узле или стыке, при частичной заменяют отдельные дефектные заклепки или небольшое число их.

В первую очередь следует заменять слабые заклепки, неплотно заполняющие заклепочное отверстие; заклепки с другими пороками заменяют в зависимости от размера дефектов и назначения заклепок.

При смене заклепок головки удаляют пневматическим или ручным зубилом или срезкой автогеном. Срубка зубилом может вызвать ослабление соседних заклепок, поэтому этот способ применяют при сплошной смене; при частичной смене, а тем более при смене одиночных заклепок рекомендуется удалять головки автогеном. Срезку автогеном следует производить осторожно, чтобы не повредить основной металл.

Стержень заклепки выбивают из отверстия бородками или высверливают коническими сверлами, работа которых сопряжена с меньшими сотрясениями (рис. 4.17)

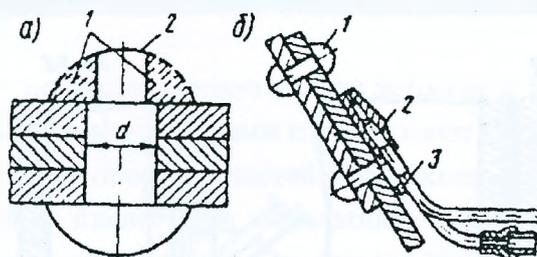


Рисунок 4.17 Схема срезки головки заклепки: а – пустотельным сверлом; 1 – срезается сверлом; 2 – выбивается бородком; б – резаком РАЗ-70; 1 – заклепка; 2 – мундштук; 3 – опорный центр.

После удаления дефектной заклепки проверяют заклепочное отверстие и, если в нем есть чернота, овальность, косина и т. д. делают рассверловку на большой диаметр. Выравнивание отверстия оправками запрещается, так как при этом можно легко повредить кромки основного металла.

Клепку производят пневматическими молотками обычным способом. В тех местах, где из-за тесноты новые заклепки невозможно поставить, их заменяют точеными или высоко-

прочными болтами. Диаметр высокопрочных болтов применяют на 1-3 мм меньше заменяемых заклепок.

В необходимых случаях отверстие можно рассверлить до определенного диаметра. Длину болтов выбирают в зависимости от толщины стягиваемого пакета исходя из условий минимального числа типоразмеров. Высокопрочные болты и шайбы перед постановкой в конструкцию очищают от смазки, грязи и налета ржавчины; гайки проворачивают по всей резьбе. Болты затягивают в два приема: ключом или гайковертом до упора, а затем окончательно динамометрическим ключом до расчетного усилия. Затянутые до расчетного усилия болты отмечают краской. Установив болты, проверяют постукиванием все ближайшие к ним заклепки и при обнаружении ослабленных – заменяют.

4.4.4 Исправление дефектов в опорных частях

Для исправления дефектов в опорных частях необходимо предварительно поднять пролетные строения. Поднимают пролетное строение на высоту 4-6 см при помощи гидравлических или винтовых домкратов (рис. 4.18). В зависимости от веса строения во время подъема в целях безопасности выкладывают страховочные клетки.

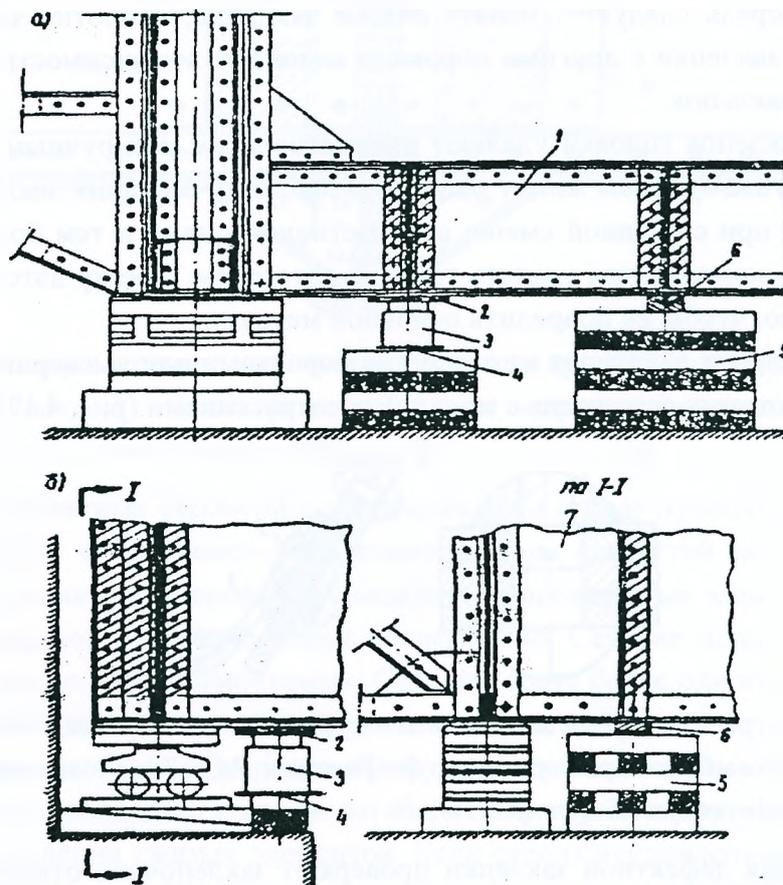


Рисунок 4.18 Способы подъема пролетных строений при ремонте опорных частей:

а – подъемка за домкратную балку; *б* – подъемка за нижний пояс; *1* – домкратная балка; *2* – деревянная прокладка; *3* – домкрат; *4* – стальной лист; *5* – страховочная клетка; *6* – клинья; *7* – опорная диафрагма.

Домкраты устанавливают под поперечными балками, расположенными в опорных узлах, предусмотренных проектом (рис. 4.18а). В пролетных строениях небольших пролетов с ездой поверху при частом расположении ферм домкратов подводят непосредственно под нижние пояса (рис. 4.18б) или под поперечные связи.

Для распределения давлений на подферменную площадку опор домкраты устанавливают на клетки из деревянных брусьев или прокатных балок. На головку домкрата следует укладывать деревянную прокладку, предупреждающую перекося поршня и местные деформации конструкции в местах упора домкрата. Рядом с поддомкратными клетками выкладывают страховочные клетки. На клетках располагают клинья, которые во время подъема постепенно подбивают, следя за тем, чтобы между ними и пролетным строением оставался зазор не более 0,5-1,0 см. После подъема на необходимую величину пролетное строение опирают на страховочные клетки.

Иногда не удается разместить домкраты в опорных узлах пролетных строений. В этом случае, особенно если необходимо поднять пролетное строение на небольшую величину, можно воспользоваться электронагревом. Для этого между нижней опорной подушкой и балансирами вставляют короткие металлические стержни, обмотанные проводом, через которые проходит электрический ток; нагреваясь, стержни удлинятся и воспримут на себя вес пролетного строения.

Освобожденные от давления опорные части тщательно очищают от грязи и ржавчины, осматривают и выправляют. Обнаруженные трещины заваривают или заменяют дефектную деталь новой.

Перекося опорных плит и неплотности опирания выправляют подливкой цементного раствора, а при небольших щелях – подбивкой сухого цемента. Если опорная плита должна быть поднята на высоту более 3-5 см. то наращивают подферменник. Плоскости катания и поверхности катков смазывают тонким слоем смазки, после чего катки устанавливают в проектное положение. При неодинаковом диаметре катков их переставляют или заменяют новыми.

Для облегчения работ по выправлению катков верхние и нижние балансиры опорных частей закрепляют за пояса тросами и хомутами и поднимают вместе с фермами.

Одновременно с ремонтом опорных частей в необходимых случаях исправляют положение пролетных строений в плане. При небольших смещениях передвижка пролетных строений может быть осуществлена во время подъема наклонным расположением домкратов. При перемещениях на большую величину необходимо устраивать накаточные пути. Для продольных перемещений пути укладывают под главные фермы, для поперечных – под домкратные балки. В зависимости от веса пролетные строения передвигают на салазках или катках, домкратами или лебедками.

Опорные части обычно исправляют без перерыва движения с ограничением скорости до 5-10 км/час. Небольшой порожек в проезжей части, возникающий при подъеме пролетного строения, уничтожают временным дощатым настилом.

4.4.5 Капитальный ремонт пролетных строений

При капитальном ремонте производят смену отдельных элементов ферм, балочной клетки, связей, замену узловых фасонки, переклепку узлов и стыков и пр.

При расклепке отдельных частей конструкции под пролетное строение или некоторые его узлы необходимо подводить подмости. Однако устройство подмостей не всегда может быть экономически оправдано, а иногда оказывается и невозможным.

В качестве примера ниже рассмотрен капитальный ремонт пролетного строения путепровода (рис. 4.19).

По условиям эксплуатации устройство подмостей под пролетными строениями было невозможно.

Пролетные строения с ездой понизу состоят из ферм раскосной решеткой, поперечных и продольных балок и нижних ветровых связей. На продольные балки опирается сплошной настил из брусьев 14х21 см, по которому уложены слой щебня и асфальтобетонное покрытие.

Ремонт пролетных строений вызван главным образом значительной коррозией нижних узлов ферм и раскосов ниже уровня проезжей части; поражены также верхние пояса некоторых продольных балок и частично ветровые связи.

При ремонте ферм были заменены все раскосы и переклепаны нижние узлы; частично заменены также продольные балки и элементы связей.

Нижние узлы отремонтированы путем установки новых двухсторонних фасонки и накладок. Для этого стыки поясов были расклепаны, старые накладки и уголки крепления стоек удалены; поперечные балки оставались приклепанными к стойкам. После расклепки узла в поперечных узловых листах прорезались автогеном дополнительные прорезы для новых фасонки. Новые стыковые накладки в отличие от старых были заведены на поясные уголки для перекрытия по всей высоте стыка вертикальных листов. Новое крепление стоек осуществлено уголками, поставленными на прокладках.

Раскосы заменены путем расклепки старых и постановки новых, составленных из двух уголков. Зазор между уголками определился толщиной пакета фасонки нижних узлов; в верхних узлах под уголками раскосов проложены прокладки толщиной по 10 мм. Новые заклепки в большинстве случаев поставлены в старые отверстия; в местах, неудобных для заклепки, вместо заклепок поставлены точеные болты.

Для разгрузки узлов и сохранения геометрической неизменяемости ферм во время их ремонта были поставлены две системы временных тяжей. Тяжи (а) ставили сразу на всю длину каждой фермы; они поддерживали концы поясов после расклепки узлов и предохраняли пояса от изгиба. Тяжи (б) ставили по мере ремонта узлов и замены раскосов; назначение их – сохранить геометрическую неизменяемость ферм и воспринять усилие от веса пролетного строения. Так, например, при расклепке узла 2 и смене раскоса 1-2 ставили тяж 1-3, при ремонте узла 3 ставили тяж 2-4 и т. д.

Тяжи делали из круглого железа диаметром 19 мм; для натяжения и регулирования длины тяжи снабжали стяжными муфтами. К поясам тяжи прикрепляли уголками через основные подушки.

Одновременно ремонтировали только один узел одной из ферм; расклепка следующего узла производилась только после окончания всех работ по предыдущему узлу. Работы велись на сплошном настиле, подвешенном к балочной клетке.

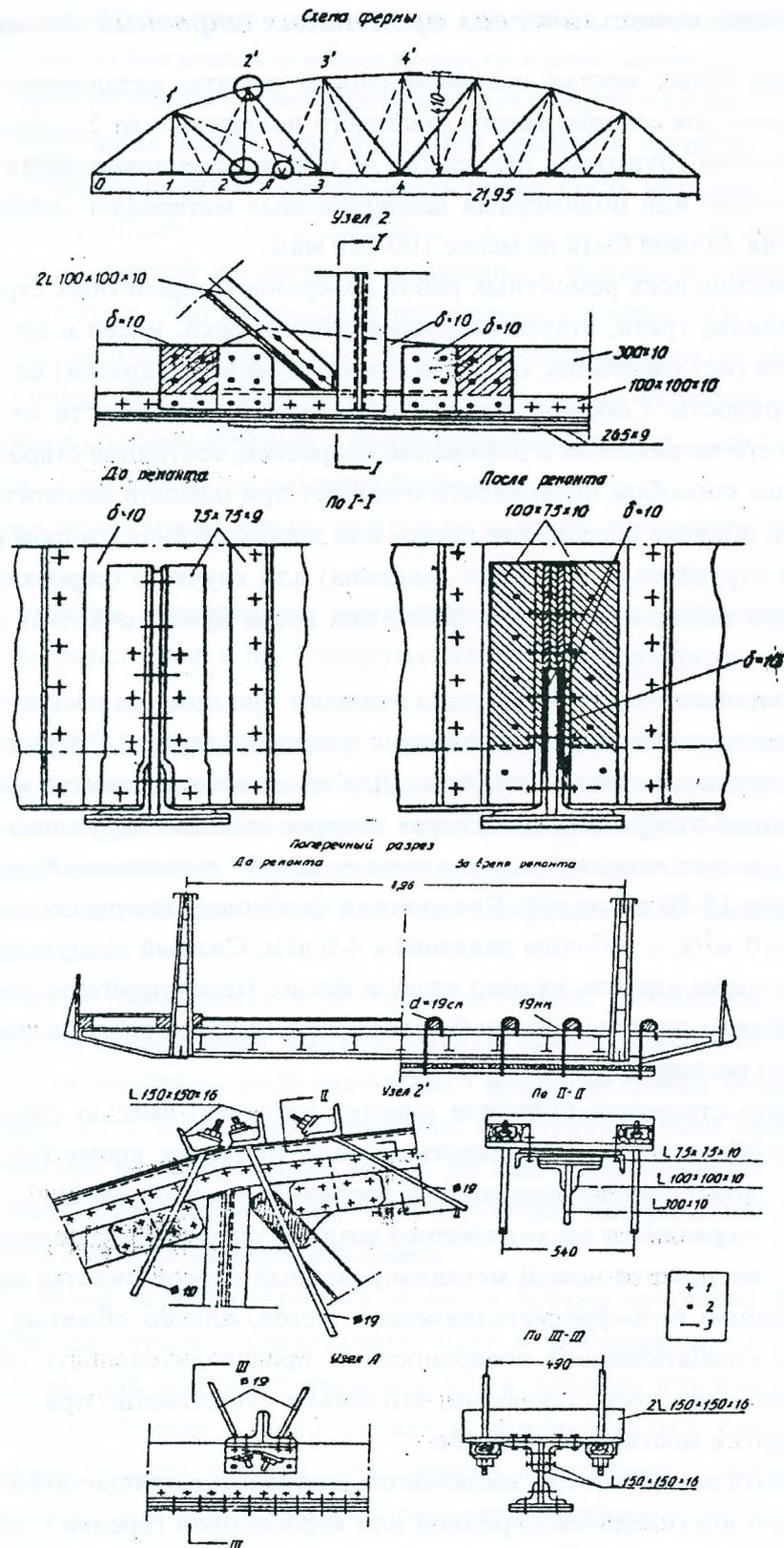


Рисунок 4.19 Капитальный ремонт пролетного строения; 1 – существующие заклепки; 2 – новые заклепки; 3 – болты диаметром 22 мм (толстыми линиями показаны новые элементы; пунктирные линии – тяжи а; штрихпунктирные – тяжи б).

4.5 Защита металлических пролетных строений от коррозии

На эксплуатируемых мостах основной способ защиты металлических элементов от коррозии – окраска. Срок службы такого защитного покрытия – от 5 до 8 лет. Защитное покрытие состоит из слоя грунтовки, наносимой на очищенную поверхность элемента, и двух слоев масляной краски или полимерных лакокрасочных материалов. Общая толщина комплексного покрытия должна быть не менее 100-120 мкм.

После завершения всех ремонтных работ поверхности пролетных строений тщательно очищают от ржавчины, грязи, старой разрушившейся краски, масел и др. Старую краску в хорошем состоянии (нет ржавчины, отслаивания и вспучивания краски) не удаляют, а только очищают ее поверхность. Способы очистки выбирают в зависимости от типа пролетного строения, степени его загрязнения и поражения коррозией, состояния старой окраски.

Механическим способом поверхности очищают при помощи механизированного инструмента (щетками, обдувка абразивами песко- или дробеструйная, гидроабразивная, а также пароструйная или струей воды высокого давления) или вручную (скребками, зубилом, ручными щетками) при небольшом объеме работ или когда нужно очистить труднодоступные места.

При механизированном способе металл очищают при помощи пескоструйного аппарата сухим, просеянным крупнозернистым песком с размером зерен 1-2 мм. К очищаемым поверхностям песок подается сжатым воздухом. Для качественной очистки необходимо, чтобы давление у выходного отверстия сопла, через которое выходит струя песка, составляло 2-3 атм; струю песка следует направлять под углом около 45° к очищаемой поверхности, держа сопло на расстоянии 15-20 см от нее. Для очистки необходим компрессор производительностью не менее 15-20 м³/ч, с рабочим давлением 4-6 атм. Сжатый воздух следует пропускать через очиститель, чтобы удалить из него влагу и масло. Пескоструйную очистку следует выполнять с соблюдением правил техники безопасности, снабжая рабочих комбинезонами, рукавицами, очками и респираторами.

Большое распространение получила очистка (обдувка) смесью стальной и цинковой дроби. Стальная дробь очищает поверхность металла; цинковая, кроме того, образует на ней тонкий защитный слой. Очистка поверхности дробью более экономична: 1 т дроби заменяет 20 т песка, на 15% сокращается расход сжатого воздуха; создает лучшие условия труда.

Разработан и внедряется новый механизированный способ очистки металлических поверхностей с помощью игло-фрезметаллических щеток, плотно обжатых в металлической оправе. Качество обрабатываемой поверхности и производительность труда значительно выше по сравнению с другими способами, что весьма существенно при выполнении противокоррозийных работ в мостовом хозяйстве.

Термический (огневой) способ заключается в обработке очищаемой металлической поверхности пламенем ацетилено-кислородной или керосиновой горелки с избытком кислорода до 30%. В процессе обработки конструкция высушивается и нагревается, что повышает качество окраски, которая выполняется вслед за очисткой при температуре окрашиваемого металла около 40-50 °С, ускоряет процесс высыхания краски и позволяет окрашивать при пониженной температуре воздуха. Термический способ не требует специальной аппаратуры: используют аппаратуру, применяемую при газовой резке (сварке). Недостаток способа: при

очистке конструкция нагревается до температуры 200-400 °С, при которой происходит ускоренный процесс старения металла, что может привести к повышению его хрупкости.

Химический способ очистки поверхности металла основан на применении специальных составов: смывки (удаления старой разрушившейся краски) и грунтовок-преобразователей, которые позволяют одновременно подготавливать поверхность металла (очищать) и грунтовать его. Грунтовки-преобразователи разрешается наносить только на поверхности, предварительно очищенные от рыхлой и пластовой ржавчины, с толщиной продуктов коррозии до 150 мкм. Следует отметить, что применение термического и химического способов очистки поверхности металла эксплуатируемых мостов требует специального согласования.

Применяя ручную очистку, пользуются металлическими скребками и щетками, зубилами, а также шлифовальными кругами с проволочными щетками и другим механизированным инструментом. Жировые пятна смывают бензином.

После очистки песок, мусор и пыль тщательно удаляют, продувая конструкцию сжатым воздухом.

В процессе очистки конструкцию осматривают, выявляя механические повреждения металла – трещины, расслоения и пр. Обнаруженные дефекты устраняют до окраски конструкции.

Окрашивать металл необходимо сразу после очистки, так как очищенные поверхности быстро покрываются слоем ржавчины. Если первый слой краски (грунт) не удастся нанести в день очистки, то металл должен быть покрыт тонким слоем олифы. Металл окрашивают несколькими слоями. Первый слой – грунт является основным слоем, защищающим металл от коррозии, поэтому он должен прочно соединяться с окрашиваемой поверхностью, быть водо- и газонепроницаемым.

Краски состоят из связующего вещества и пигмента. Связующее вещество, обладая свойством создавать при высыхании плотную пленку, представляет собой главнейший компонент краски. В зависимости от вида связующего вещества краски бывают масляные, битумные, глифталевые и т.д. Для окраски мостовых конструкций чаще применяют масляные краски, приготовленные на растительном масле. Из них наиболее пенно льняное масло, из которого изготавливают натуральную олифу. При отсутствии натуральной олифы разрешается заменять ее олифами «оксоль» или «оксоль-смесь».

Пигментами служат порошкообразные вещества преимущественно минерального происхождения, придающие краске определенный цвет и усиливающие ее антикоррозийные свойства. Промышленность выпускает пигменты или в порошке или в виде паст – густотертых красок. Для употребления в дело пигменты предварительно смешивают с олифой (табл. 4.1) до нужной густоты, причем сухие краски перетирают с натуральной олифой в краскотерках до густотертой консистенции, после чего разжижают ею же или ее заменителями. Для разжижения красок, загустевших во время работ, применяют уайт-спирит или скипидар, а для ускорения высыхания – сиккативы.

Для грунта применяют более прочные краски – свинцовый или железный сурик на натуральной олифе.

Таблица 4.1

Лакокрасочный материал	Содержание олифы в красках, % по весу			
	в густотертой краске	добавляемой для разжижения густотертой краски		
		в грунт	в первый покрывной слой	во второй покрывной слой
Сурик свинцовый	10–12	10–15	–	–
Сурик железный	18–24	28–30	30–32	35
Белила цинковые	16–20	–	28	33
Алюминиевая пудра	–	–	85	80
Сажа малярная	Добавляется в объеме 3% к белым краскам для придания светло-стального цвета			

Основные типы грунтовок, используемых при окраске мостов и выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Тип грунтовки	Марка	Цвет	Назначение
Эпоксидные	ЭП-00-10	Красно-коричневый Серый Серебристый	Стойкое покрытие для жаркого, умеренного и холодного климата. Обладает повышенной противокоррозионной стойкостью. Наносят кистью или распылением
	ЭП-057		
	ЭП-057А		
Перхлорвиниловые и сополимервинилхлоридные	ХС-10	Красно-коричневый	Применяют под химически стойкие эмали в условиях умеренного и тропического климата. Наносят кистью или распылителем
	ХВ-050		
	ХС-059		
Фенолоформальдегидные	ФЛ-03К	Красно-коричневый Желтый	Применяют под различные эмали, для металлизационных покрытий (ФЛ-03Ж) в условиях умеренного и тропического климата
	ФЛ-03Ж		
Фосфатирующие	ВЛ-02;	Зеленовато-желтый Защитно-зеленый	Применяют вместо фосфатирования с последующим перекрытием противокоррозионными грунтовками в умеренном климате
	ВЛ-08		
	ВЛ-023		
Масляные	Сурик свинцовый сухой Сурик железный густотертый	Оранжевый Красно-коричневый	Применяют в комплексе атмосферостойких покрытий под масляные краски

Последующие слои наносят цинковыми белилами, железным суриком, алюминиевой краской. В целях экономии натуральной олифы краски последующих слоев разрешается разводить до рабочей консистенции заменителями олифы.

Алюминиевые краски готовят из алюминиевой пудры. В качестве связующего материала могут быть использованы различные виды олиф и битумно-масляный лак. Добавлением различных густотертых пигментов алюминиевой краске придают любой оттенок.

Лакокрасочные материалы перед употреблением нужно направлять в лаборатории для определения их качества и соответствия заводским паспортам и ГОСТам. Помимо этого, на месте работ следует проверять краски на высыхаемость и степень перетирки.

Для проверки на высыхание краску наносят на железную или стеклянную пластинку, расположенную наклонно под углом 45° , и сушат при температуре $+20^\circ\text{C}$. Краска считается

высохшей, если при нажиме пальцем она не отстает от пластинки и на ней не остается отпечатка пальца. Нормальный срок высыхания краски олифы – 24 часа. Достаточность перетирки устанавливают путем нанесения тонкого слоя краски (разведенной в двух частях олифы), на стеклянную пластинку. Если при рассматривании пластинки на свет не будут видны зерна краски, то перетирка считается достаточной.

После нанесения и высыхания грунта все щели, неплотности, местные углубления и неровности заполняют шпаклевкой. Шпаклевку готовят из олифы, мела и свинцового сурика, принимая их количество соответственно 15:60:25 по весу, или из олифы и мела – 17:83. Затем наносят в два покрывных слоя краски; слои наносят только после полного высыхания предыдущих. Для контроля малярных работ рекомендуется каждому слою, включая грунт, придавать свой оттенок; для предохранения металла от нагревания солнечными лучами наружный слой желательно наносить светлой краской.

Приготовленную для работы краску следует систематически перемешивать, так как ее минеральные компоненты, особенно алюминий, быстро оседают на дно. Для разбавления красок в процессе работы в них добавляют олифу, бензин, скипидар или уайт-спирит. Для ускорения высыхания в краски добавляют сиккативы. В зависимости от объема работ окрашивают вручную или механизированным способом при помощи сжатого воздуха. На рис. 4.20 приведена схема оборудования для окраски пистолетом-распылителем с подачей в него краски из специального нагнетательного бачка. Давление воздуха в распылителе должно быть в пределах от 1,5 до 4 атм; максимальное давление в бачке – 4,5 атм; расход воздуха на один распылитель составляет 0,1-0,2 м³/мин.

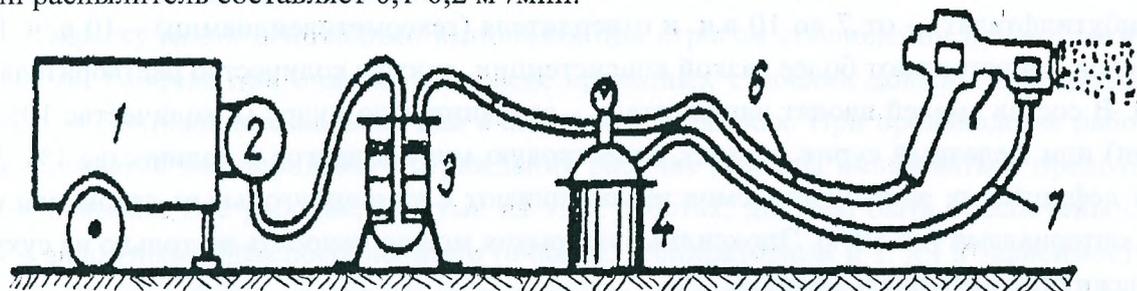


Рисунок 4.20 Схема оборудования для механической окраски: 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – масловодоотделитель; 4 – красконагнетательный бак; 5 – пистолет-распылитель; 6 – воздушные шланги; 7 – материальный шланг.

При больших объемах работ по окраске целесообразны механизированные способы с безвоздушным распылением или в электростатическом поле.

При безвоздушном распылении используют установку УБРХ-1М, а при окраске в электростатическом поле УЭРЦ-4 с ручным электрораспылителем.

Пролетные стросения со сплошными балками рационально окрашивать механизированным способом с безвоздушным распылением, а со сквозными фермами – в электростатическом поле. При малых объемах работ окрашивают вручную кистями № 24, 30, 36.

При работе распылителями необходимо тщательно фильтровать краску; сжатый воздух должен проходить через масловодоотделитель и быть сухим и чистым.

Мостовые конструкции следует окрашивать в сухую погоду при температуре от +4° до +25°.

Кроме масляных красок, применяют и другие антикоррозионные покрытия, в том числе лакокрасочные материалы на основе полимеров. Как показали исследования, в разных атмосферных условиях наиболее стойки покрытия на основе эпоксидных и перхлорвиниловых смол, сополимера и кремнийорганических лаков (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Тип покрытия	Марка	Цвет	Назначение
Эпоксидная эмаль	ЭП-057А биметаллическая	Серебристый	Покрытие повышенной атмосферостойкости для условий промышленной и атмосферы
Перхлорвиниловые и сополимервинилхлоридные эмали	ХВ-124, ХВ-125, ХВ-113	Серый, серебристый, серый	Для защиты металлических конструкций в условиях повышенной влажности и холодного климата.
Полиуретановая эмаль	ХВ-119	Светло-серый	Для условий повышенной влажности.

Из готовых эпоксидных красок рекомендуется шпаклевка ЭП-00-10, состоящая из эпоксидной смолы, пластификатора и пигмента (железного сурика). Эпоксидную шпаклевку достаточно наносить в два слоя. Перед нанесением в шпаклевку вводят отвердитель (гексаметилендиамин) в количестве 8,5-9,0 в. ч. на 100 в. ч. шпаклевки и растворитель (Р-4 или Р-5) для получения рабочей консистенции краски.

Покрытия из эпоксидных смол ЭД-5, ЭД-6 и других наносят в три слоя. Первый слой составляют из смолы – 100 в. ч., растворителя (Р-4 или толуол) – от 60 до 100 в.ч., пластификатора (дибутилфталат) – от 7 до 10 в.ч. и отвердителя (гексометилендиамин) – 10 в. ч. Покрывные слои приготавливают более вязкой консистенции, снижая количество растворителя до 20-25 в. ч. В состав эмалей вводят наполнители – алюминиевую пудру (в количестве 10% от веса эмали) или железный сурик, цемент, известковую муку и другое в количестве 1%. Для экономии дефицитных эпоксидных смол их смешивают с каменноугольным лаком или битумными материалами (до 50%). Эпоксидные покрытия можно наносить не только на сухую, но и на влажную поверхность металла.

Достаточно стойки более доступные покрытия на основе полихлорвиниловой смолы и сополимера хлорвинила с винилиденхлоридом (перхлорвиниловые эмали ПХВ-23, ПХВ-26). В обычных атмосферных условиях их наносят в четыре слоя: слой грунта, два слоя эмали и слой лака. В качестве грунта рекомендуются грунтовки ХС-010, ГФ-020 и грунтовки на основе полистирольного лака с металлическим цинком.

Хорошими антикоррозионными свойствами обладают также покрытия на основе кремнийорганических лаков.

В зависимости от консистенции полимерные покрытия наносят кистями или краскораспылителями. Каждый слой наносят после высыхания предыдущего. Срок сушки эпоксидных покрытий составляет около 24 ч, полихлорвиниловых – 30 мин.

В зависимости от качества материалов сплошную окраску металлических пролетных строений возобновляют через 4-6 лет. Независимо от этого при текущем содержании мостов отдельные участки конструкции с поврежденной краской следует периодически подкрашивать. Окраске подлежат все конструкции, за исключением шарниров, катков и поверхностей

их перемещения; эти элементы необходимо систематически очищать от ржавчины и смазывать тонким слоем машинного масла или натирать графитом.

Кроме окраски, защиту мостов от коррозии можно осуществить металлизацией.

Металлизацию – покрытие поверхности очень тонким слоем цинка или алюминия – применяют для защиты наиболее подверженных коррозии элементов. Слой металла наносят аппаратами-металлизаторами на очищенную поверхность. Простой способ подготовки поверхности для металлизации – обработка «стальным песком», не содержащим соединений кремния, или высокотвердыми абразивными материалами с размером частиц 0,8-1,2 мм. Подготавливать поверхность химическим или гидроабразивным способами не разрешается. При высокой влажности очищенную поверхность перед металлизацией просушивают и подогревают.

Цинковую проволоку Ц1 или АМЦ диаметром 1,5-3,0 мм расплавляют электрической дугой или ацетиленовым пламенем и в таком виде наносят сжатым воздухом на поверхность конструкции. Металлизация дает устойчивое против коррозии покрытие, но большая пористость таких покрытий снижает их эффективность и срок службы. Для устранения этого недостатка металлизацию комбинируют с грунтовкой лакокрасочными материалами. Для цинковых покрытий лучше использовать грунтовки ЭП-057 и ЭП-057А, а для алюминиевых – ФЛ-ОЗЖ. Срок службы комбинированных защитных покрытий металлических элементов достигает 20-30 лет.

Существенным ее недостатком является большая стоимость и необходимость применения дефицитных цветных металлов.

Окраску моста необходимо выполнять при строгом соблюдении правил техники безопасности. Рабочие при очистке и окраске пролетных строений должны находиться на подмостях, в специальных люльках или в смотровых тележках. При производстве работ с дощатых подмостей без перильного ограждения рабочие должны пользоваться предохранительными поясами. Все рабочие, занятые на этих работах, должны быть обеспечены спецодеждой и защитными приспособлениями (очками, респираторами и т. д.) в зависимости от рода выполняемых работ и вредности применяемых окрасочных материалов. Свинцовые белила допускаются к применению только в готовом виде, перетертые на олифе. Лакокрасочные материалы, содержащие свинец или бензол, запрещается наносить методом пневматического распыления.

5 Содержание, осмотр и ремонт деревянных мостов

5.1 Общие сведения о содержании и ремонте деревянных мостов

Деревянные мосты чаще всего эксплуатируются на дорогах местного значения. В эксплуатационном отношении деревянные мосты наиболее трудоемки и дороги. Древесина мостов растрескивается при высыхании, легко поражается гнилостными грибами, настилы проезжей части быстро изнашиваются, пролетные строения провисают от обмятий во врубках и усушке древесины, опоры и ледорезы часто повреждаются льдом. Срок службы деревянных мостов обеспечивается главным образом качественной постройкой их из здорового воздушно-сухого леса с обязательной пропиткой его антисептиками. Но и при этих обязательных требованиях за ними необходимы тщательный текущий надзор и уход.

При эксплуатации деревянных мостов нужно строго соблюдать установленный режим движения (в особенности по ограничению веса машин), хорошо организовывать противопожарную службу, своевременно принимать защитные меры против растрескивания древесины и поражения ее гнилью, обеспечивать безопасный для моста пропуск ледохода и паводковых вод, строго требовать соблюдения правил судоходства. Необходимо также систематически наблюдать за состоянием деревянных конструкций и металлических креплений и своевременно принимать меры для исправления обнаруженных дефектов и повреждений. Многие дефекты и повреждения могут быть устранены и силами текущего надзора с минимальными затратами сил и средств. Правильно организованная служба эксплуатации может значительно продлить срок службы деревянных мостов и обеспечить бесперебойное движение по ним.

5.2 Механические повреждения и их устранение

В деревянных мостах механические повреждения наблюдаются преимущественно в деревянных элементах и значительно реже в металлических. Наиболее часто встречаются трещины и сколы древесины, а также общие и местные деформации пролетных строений и опор.

Одна из причин этих дефектов – усушка, в результате которой в древесине возникают трещины, появляются неплотности во врубках, ослабевают металлические крепления, что снижает прочность и жесткость сооружения. Кроме этого, трещины и неплотности являются очагами гнили. Механические повреждения могут быть вызваны плохой подгонкой врубок и сопряжений элементов, а также непосредственным воздействием подвижных нагрузок и других внешних сил.

Большинство механических дефектов и повреждений исправляют силами линейного надзора, в порядке ухода за мостами.

Наиболее интенсивно изнашивается верхний настил проезжей части. Под действием временных нагрузок, особенно гусеничных и колесных тракторов, в досках появляются трещины, выдергиваются гвозди, прикрепляющие настил, уменьшается толщина досок и т. д.

Изношенные доски настила заменяют новыми. Ставить в этом случае короткие «заплаты» не рекомендуется, так как они легко ломаются. В условиях интенсивного движения, например в городах, стыки досок верхнего настила, с которых обычно начинается износ, целе-

сообразно перекрывать стальными листами толщиной 2-3 мм, прибивая их коваными гвоздями. Для этого доски настила нужно стыковать в одном месте по всей ширине проезда.

При достаточной жесткости настил может быть защищен от истирания покрытием из асфальтобетона или защитным ковриком, который укладывают летом после ремонта и просушки настила; на настил разливают битум и рассыпают каменный отсев или крупный песок. Полученный таким образом коврик толщиной 0,5-0,75 см хорошо защищает настил от износа, создает ровную поверхность проезда и предохраняет нижележащую конструкцию от влаги и грязи.

В перилах часто наблюдается ослабление креплений и наклон перильных стоек, что исправляют подтяжкой болтов и забивкой дополнительных скоб и гвоздей. В поперечинах из-за интенсивной усушки часто наблюдается растрескивание торцов. Для предупреждения растрескивания торцы окрашивают раствором в воде мелом или защищают от солнечных лучей козырьками. Работа досок нижнего настила и поперечин значительно ухудшается при наличии между ними зазоров. Зазоры необходимо заполнять деревянными прокладками, тщательно прирубая их и закрепляя гвоздями.

Продольные трещины, в прогонах, стойках, подкосах и других элементах, работающих на поперечный или продольный изгиб, необходимо своевременно стягивать болтами или хомутами. Болты в составных балках на колодках должны быть подтянуты и надежно препятствовать выворачиванию колодок, колодки плотно прирублены к бревнам.

Обнаруженные неплотности во врубках колодок нужно заполнять дубовыми или стальными прокладками, а трещины стягивать хомутами или болтами (рис. 5.1 а). Иногда из-за недостаточной поперечной устойчивости наблюдается наклон (завал) высоких многоярусных прогонов. В этом случае до ремонта пролетного строения следует между прогонами ставить временные поперечные связи (рис. 5.1 б).

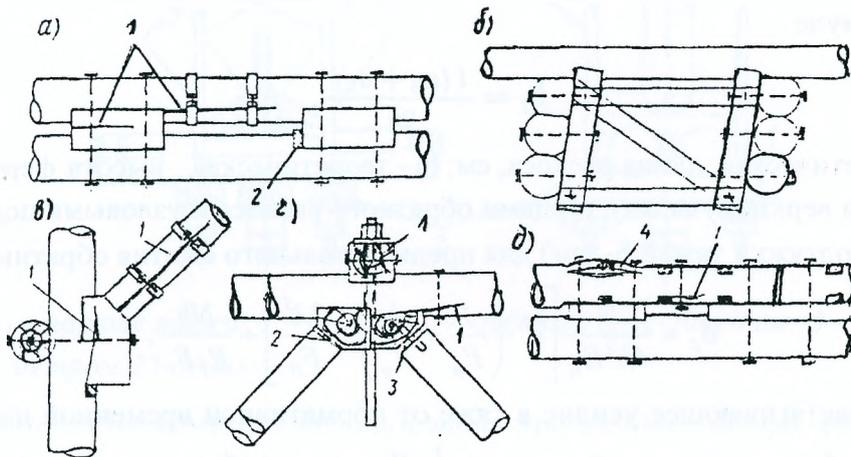


Рисунок 5.1 Механические дефекты в элементах деревянных мостов: 1 – трещина; 2 – неплотность врубки, заполненная прокладкой; 3 – зазор; 4 – отщеп древесины.

В треугольно-подкосных мостах могут возникать дефекты в опорных узлах (рис. 5.1 в): неплотное опирание торцов подкосов на подушки, зазоры и неплотности во врубках подушек и затяжек в стойки опор, опасные трещины и сколы подушек и затяжек и т. д. Для предупреждения и обезвреживания этих дефектов болты в опорных узлах необходимо систематически

подтягивать, трещины стягивать хомутами, неплотности во врубках заполнять дубовыми прокладками.

В фермах Гау-Журавского наиболее опасны дефекты в узлах ферм (рис. 5.1 г) и стыках растянутых поясов (рис. 5.1 д). Неплотности в узловых врубках, а также зазоры между раскосами и подушками заполняют прокладками, трещины в подгаечниках и сколы поясов у узловых подушек стягивают болтами. В стыках растянутых поясов на шпоночных накладках часто наблюдаются опасные сколы и трещины между шпонками, а также отщепление древесины при ослаблении стяжных болтов. Эти дефекты нужно исправлять в кратчайший срок, устанавливая дополнительные и своевременно подтягивая стяжные болты. Систематическому осмотру подлежат тязи, особенно сварные стыки тязей, в которых со временем могут появиться трещины. Все тязи периодически окрашивают масляной краской для защиты от ржавления, а дефектные усиливают или заменяют новыми.

В дощато-гвоздевых фермах наиболее опасны разрывы досок растянутых поясов и стыковых накладок, а также продольные трещины между нагелями. Эти дефекты приводят фермы в аварийное состояние, требующее срочного усиления конструкции.

В результате усушки древесины, обмятий во врубках и других причин деревянные пролетные строения провисают. В фермах Гау-Журавского провисание исправляют подтяжкой тязей, в остальных системах улучшают профиль проезда, изменяя высоту проезжей части. Если провисание значительно, то ограничивают скорость движения транспорта или капитально ремонтируют мост. В фермах Гау-Журавского подтяжкой тязей восстанавливают строительный подъем, уничтожают зазоры между обратными раскосами и узловыми подушками, а также создают в обратных раскосах сжимающие усилия, при которых отставание их от подушек невозможно. Величина подтяжки каждого тяза δ_1 (см), при которой устраняются зазоры между обратными раскосами и подушками, с достаточной точностью может быть определена по формуле

$$\delta_1 = \frac{l(a_n + a_n)}{2h},$$

где l – теоретическая длина раскоса, см; h – теоретическая высота фермы, см; a_n , a_n – зазоры (нижний и верхний) между торцами обратного раскоса и узловыми подушками, см.

Величина подтяжки тязей δ_2 (см) для предварительного сжатия обратных раскосов

$$\delta_2 = \frac{N}{4h^2 E_d} \left[l^3 \cdot \left(\frac{1}{F_p} + \frac{1}{F_p'} \right) + \frac{2\lambda^3}{F_n} \right] + \frac{Nh}{E_T F_T}.$$

Здесь N – растягивающее усилие в тязе от нормативной временной нагрузки, кГ; F_p – площадь сечения брутто прямого раскоса, см²; F_p' – то же, обратного раскоса, см²; λ – длина панели, см; F_n – средняя площадь верхнего и нижнего пояса, см²; F_T – площадь тяза, см²; E_d – модуль упругости дерева, мПа; модуль упругости тяза, мПа.

Подъем Δ середины ферм при подтяжке тязей для ферм с четным числом панелей

$$\Delta = \delta_{cp} + \frac{\sum \delta}{2};$$

для ферм с нечетным числом панелей

$$\Delta = \frac{\sum \delta}{2},$$

где $\delta_{\text{ср}}$ – подтяжка среднего тяжа; $\sum \delta$ – сумма подтяжек всех остальных тяжей.

Чтобы пояса изгибать не сильно, тяжи нужно подтягивать в несколько приемов, начиная со средних панелей. В процессе работ необходим геодезический контроль (нивелирование узлов ферм).

В пролетных строениях с ездой поверху тяжи подтягивают постепенно по всем фермам, начиная с наиболее деформированных, исправляя за один прием провисание не более чем на 2-4 см, а в пролетных строениях с ездой понизу на 6-8 см. Подтягивать тяжи можно, подвинчивая как верхние, так и нижние гайки. При езде понизу удобнее подвинчивать верхние гайки с легких подмостей, настилаемых по верхним связям. При езде поверху обычно подтягивают нижними гайками с вышек, устанавливаемых зимой на льду, а летом – на плавучих средствах, или с подвесных люлек. При подвинчивании гаек тяжи нужно закреплять от вращения.

Для облегчения подтяжек рекомендуется пользоваться вспомогательными инвентарными тяжами (рис. 5.2) в виде комплекта из четырех тяжей, дубовых подушек, шайб и гаек.

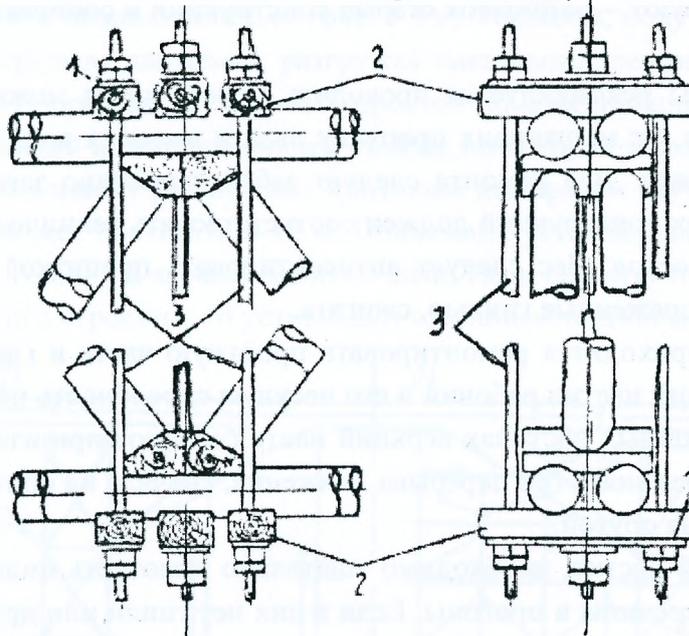


Рисунок 5.2 Инвентарные тяжи: 1 – шайбы; 2 – дубовый брус 20x20 см; 3 – тяжи (тяги) диаметром 25-30 мм.

Тяжи делают составными для использования при разных высотах ферм. Инвентарные тяжи располагают с обеих сторон узла на расстоянии не более 40-50 см от его оси и, натягивая их, освобождают основной тяж, после чего на нем легко подвинтить гайку. Гайки следует подвинчивать в несколько приемов поочередно: сначала подтянуть вспомогательные тяжи, затем основной. Перед подтяжкой необходимо нарезки тяжей очистить от ржавчины и смазать солидолом.

В первые два-три года эксплуатации пролетных строений подтягивать тяжи нужно ежегодно, а потом по мере надобности, но не реже одного раза в два года.

В работы по содержанию опор и ледорезов входят систематическая подтяжка болтов и хомутов, пополнение и замена расшатанных скоб и других металлических креплений. Хомуты в стыках должны плотно прилегать к стыкуемым бревнам, а между торцами бревен не должно быть незаполненных щелей. В опорах с подводными связями необходимо следить за натянутостью стальных тяжей, а сильно корродированные тяжи своевременно заменять новыми.

В опорах часто наблюдаются общие деформации – осадки, крены, перекосы. Небольшие осадки могут быть вызваны обмятием стыков и врубок в первые годы эксплуатации моста. Значительно опаснее осадки, вызванные размывами дна, сопровождающиеся обычно кренами и перекосами. Ледорезы и опоры могут быть сильно деформированы и повреждены при навале на них плотов и судов. Радикальной мерой по защите опор от осадок служит своевременное укрепление дна реки. Общие деформации моста исправляют только при капитальном ремонте опор.

5.3 Ремонт деревянных мостов

При значительных повреждениях, поражениях гнилью и износе отдельных элементов и частей мосты ремонтируют – разбирают старые конструкции и собирают новые с подгонкой их по месту установки.

Ремонтные работы рекомендуется проводить зимой, когда можно работать со льда. Часть ремонтных работ, не мешающих пропуску льда и высоких вод, может быть отнесена на весенне-летний период. Для ремонта следует заблаговременно заготавливать элементы и детали. Материал новых конструкций должен соответствовать техническим условиям на постройку деревянных мостов. Лес следует антисептировать пропиткой, а снятые элементы старых конструкций, пораженные гнилью, сжигать.

Наиболее часто приходится ремонтировать проезжую часть и главным образом верхний настил. Если верхний настил рабочий и его несущая способность потеряна на 25%, то он подлежит замене. В двойных настилах верхний настил меняют при износе досок до 2-3 см. Доски настила можно заменять без перерыва движения, сначала на одной половине ширины проезжей части, затем на другой.

Вскрывая верхний настил, необходимо тщательно осмотреть нижний и в выборочном порядке обнажить поперечины и прогоны. Если в них нет гнили или других дефектов, доски нижнего настила антисептируют, далее укладывают рулонную изоляцию и затем стелят верхний настил из новых досок. Верхний настил рекомендуется покрыть асфальтовым ковриком. При наличии в нижнем настиле, поперечинах или прогонах, а также в других элементах мостов поверхностной гнили ее удаляют, обнаженную здоровую древесину антисептируют, а образовавшиеся неровности на верхней поверхности элементов заполняют прокладками (рис. 5.3 а). Глубина врезки прокладок должна быть проверена соответствующим расчетом.

Составные прогоны при наличии трещин в колодках или бревнах можно отремонтировать нашивкой наклонных досок (рис. 5.3 б). Для включения досок в работу на полную нагрузку прогоны временно подклинивают, после чего доски пришивают гвоздями. Подкосы и затяжки подкосных мостов, имеющие большое количество дефектов, заменяют новыми. Ес-

ли дефекты сосредоточены только на концах подкосов, то концы удаляют и элементы наращивают вполдерева или в торец, с перекрытиями стыка стальными накладками.

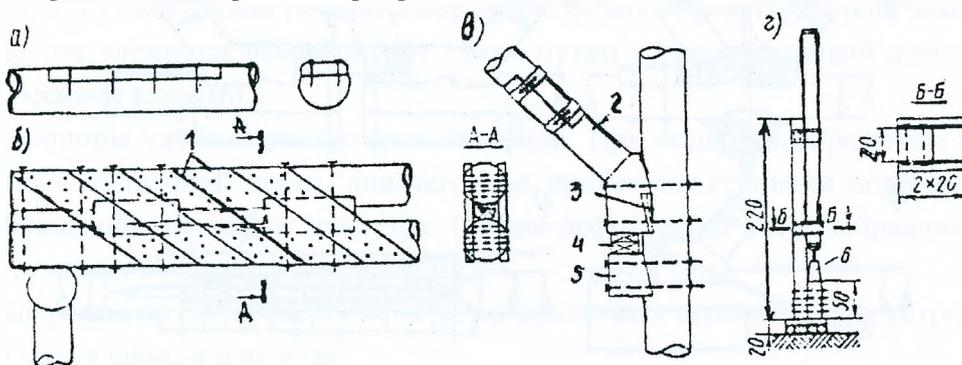


Рисунок 5.3 Отремонтированные элементы балочных и подкосных мостов и подъемник для ремонтных работ: 1 – трещина; 2 – вставка; 3 – скол древесины; 4 – клин; 5 – новая подушка; 6 – домкрат подъемника.

Дефектные подушки заменяют новыми или же ставят дополнительные коротыши, включая их в работу при помощи клиньев (рис. 5.3 в). Подкосы, подушки и другие элементы сменяют снизу без перерыва движения, разгружая сменяемые элементы временными опорами. Такой временной опорой может служить простой по конструкции инвентарный подъемник (рис. 5.3 г), состоящий из направляющей стойки, по которой в хомутах скользит подъемный брус. Сменяемый элемент разгружают винтовым домкратом грузоподъемностью 5-10 т. Высота подъемника может достигать 8-12 м. Подъемник устанавливают или непосредственно на грунт (рис. 5.4 а), или на заранее забитые сваи. Если ремонту подлежит большая часть конструкции пролетного строения, то устраивают сплошные подмости (рис. 5.4 б).

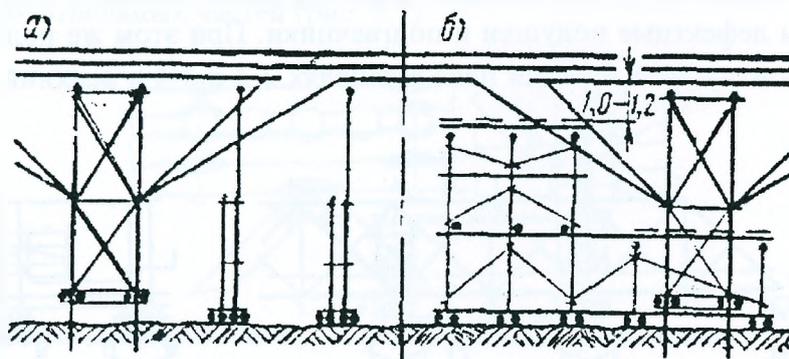


Рисунок 5.4 Схема временных опор и подмостей для ремонта подкосных мостов.

При дефектах (трещинах, сколах) в узлах ферм Гау-Журавского усилия от прямых раскосов можно передать на прочную часть пояса через брус, ставя между брусом и подушкой клинья (рис. 5.5 а). Трещины в подгаечном бруске обезвреживают стяжными болтами, пропущенными через шайбы жесткого профиля – уголки или швеллеры. При ремонте опорных узлов усилие с дефектного узла может быть передано на соседнюю ферму (рис. 5.5 б). Возможна также постановка дополнительных тяжей (рис. 5.5 в). В растянутых стыках, имеющих большое число дефектов, ставят деревянные накладку на нагелях (рис. 5.5 г). Для включения

накладок не только на временную, но и на постоянную нагрузку стык предварительно стягивают полиспастом.

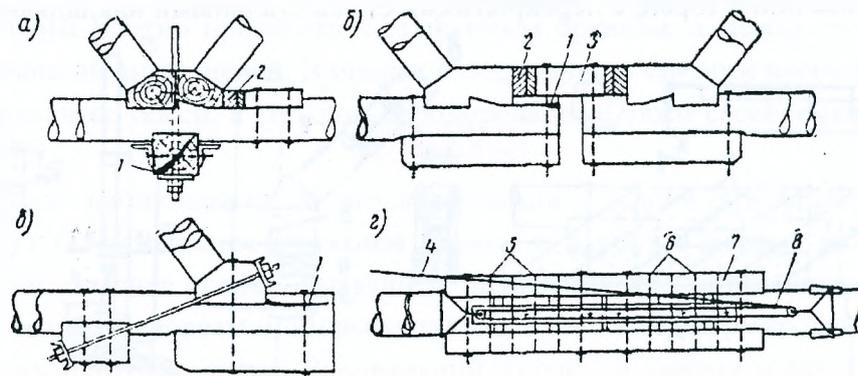


Рисунок 5.5 Отремонтированные узлы и стыки ферм Гау-Журавского: 1 – трещины; 2 – клинья; 3 – распорка; 4 – трос к лебедке; 5 – нагели, поставленные до натяжения; 6 – нагели, поставленные после натяжения полиспаста; 7 – накладка; 8 – полиспаст.

Отдельные элементы ферм меняют с подмостей. В зимних условиях удобны передвижные подмости-опоры, передвигаемые по льду на катках (рис. 5.6) Опоры устанавливают под нижние узлы для их подклинки. Для ремонта верхних узлов и поясов ставят верхние подмости, которые должны по возможности меньше загромождать проезжую часть, чтобы сохранить хотя бы одностороннее движение. При смене отдельных элементов фермы поддомкрачивают на временных опорах так, чтобы сменяемый элемент выключился из работы. Например, для смены подушки и подгаечника в узле 3 нижнего пояса необходимо поддомкратить узлы 2 и 4 до тех пор, пока раскосы 2-3' и 3-4' не отойдут от подушек на 5-8 см; далее поперечную балку и нижний пояс подвешивают инвентарными тяжами к узлу 3', после чего могут быть заменены дефектные подушки и подгаечники. При этом же положении временных опор можно отремонтировать нижний пояс в панелях 2-3 и 3-4 и верхний – в панелях 2'-3' и 3'-4'.

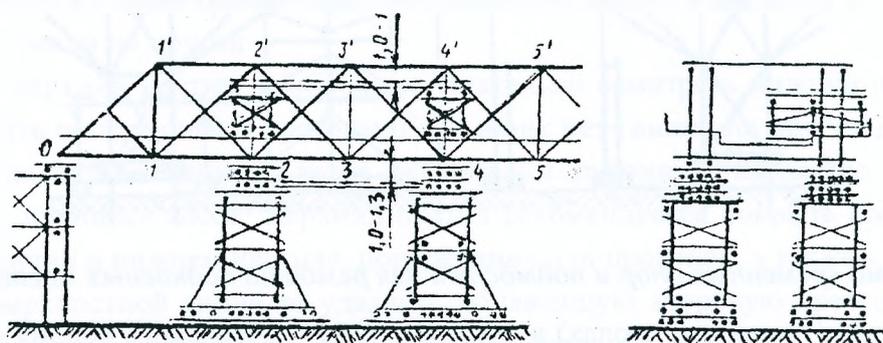


Рисунок 5.6 Схема подмостей для ремонта ферм.

При более крупном ремонте, когда требуется смена большей части пролетного строения, сооружают сплошные подмости.

Ремонт свайных опор и ледорезов обычно заключается в смене участков свай, загнивших у поверхности земли или у уровня меженных вод, и в ремонте укосин. Загнившие участ-

ки вырезают и вместо них врубают в полдерева вставки и укрепляют хомутами. Сваи, расположенные на поймах, удобнее наращивать летом, когда легко откопать ремонтируемую сваю на необходимую глубину; сваи речных опор лучше ремонтировать со льда зимой. Укосины, подкосы и другие элементы ремонтируют также путем вставок здоровой древесины или же полностью заменяют новыми.

Ряжевые опоры удобнее ремонтировать зимой. При большом поражении гнилью ряжи перестраивают в надводной части, для чего под пролетные строения подводят временные опоры, освобождающие ряжи от нагрузок. Общие деформации опор исправляют также при помощи разгрузки их от пролетных строений.

Сложные ремонты (например, смена ферм пролетных строений, переустройство опор и пр.) ведут по специальным проектам.

5.4 Осмотр деревянных мостов

В процессе обследования деревянных мостов, прежде всего, обращают внимание на состояние древесины, выявляя места, где начинается и развивается гниение – разрушение древесины низшими споровыми грибами. Большинство грибов, вызывающих гниение, развивается при влажности древесины от 23 до 60% и положительной температуре от 3 до 35°C. Следовательно, на процесс гниения оказывают влияние климатические условия: влажность воздуха и продолжительность периодов положительных температур. Наиболее уязвимые для загнивания места деревянных конструкций – сопряжения; врубки; швы в пакетах из досок, брусьев и бревен и другие, в которых может задерживаться влага, а проветривание их затруднено.

В балочных и подкосных мостах обычно гнилью поражаются участки сопряжения ярусов, соединения подкосов со сваями и прогонами и в особенности сложные узлы с неплотностями в сопряжениях отдельных частей (рис. 5.7)

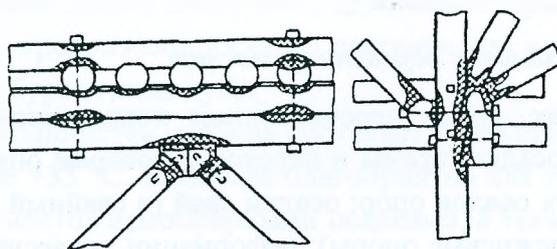


Рисунок 5.7 Наиболее уязвимые места для загнивания (заштрихованы).

Конденсация влаги на металле в местах контакта металлических деталей с деревянными способствует загниванию древесины. В наиболее неблагоприятных условиях находятся детали опор деревянных мостов, подвергающиеся переменному увлажнению у поверхности земли и горизонта воды. Элементы деревянных опор мостов в относительно сухих песчаных грунтах могут загнивать на глубине до 2 м. В увлажненных и в плотных грунтах гниение глубоко не распространяется (до 0,5 м).

Поврежденные гнилью участки деревянных конструкций обнаруживают внешним осмотром, остукиванием молотком, сверлением отверстий, стеской верхних слоев и другими способами. При внешнем осмотре места загнивания определяют по наличию грибков (их

плодовых тел) на поверхности, по цвету древесины, которая при загнивании приобретает бурый, красный, табачный и другие оттенки, а также по мелким поверхностным трещинам. Поврежденная гнилью древесина легко растирается в порошок. Развитие гниения в глубь древесины устанавливают стеской верхних слоев, высверливанием проб древесины специальным полым буром. Пользуясь последним, можно получить образец древесины с определенной глубины для лабораторных исследований. Для проверки состояния деревянных деталей, погруженных в грунт, их в выборочном порядке откапывают на глубину 30-60 см. При ослаблении сечений элементов гнилью на глубину более 2 см или более чем на 15 % необходимо их прочность проверить расчетом.

Другое распространенное повреждение деревянных мостов – трещины (рис. 5.8) Небольшие продольные трещины появляются в процессе усушки древесины. Если такие трещины не подходят близко к врубкам, они обычно не представляют серьезной опасности. Крупные трещины у врубок, расположенные в плоскостях скалывания или близко к ним, опасны, так как могут привести к разрушению. Причиной появления таких трещин может быть неудовлетворительное выполнение врубок и сопряжения элементов, неплотное прилегание элементов во врубках, неравномерная работа шпонок и т. п. Определяются они визуально.

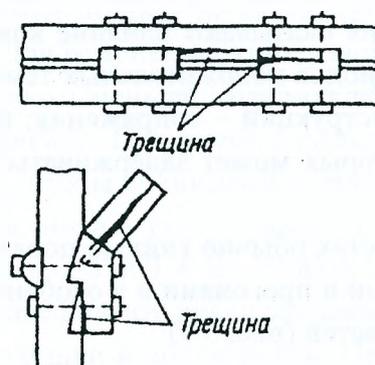


Рисунок 5.8 Трещины в элементах деревянных мостов.

В деревянных опорах, кроме перечисленных повреждений, встречаются различные смещения: вертикальные осадки, крены и перекосы, которые определяются инструментально. Причины вертикальных осадок опор: осадки свай (в свайный опорах) или грунта в основании опоры (ряжевые и лежневые опоры); деформации древесины от действия усилий или вследствие усушки (увлажнения); деформации в сопряжениях элементов опоры. Если в первое время эксплуатации произошли умеренные смещения и в дальнейшем они прекращаются, то такие смещения не опасны. В этих случаях нужно выправить положение пролетных строений.

Под действием горизонтальных или внецентренно приложенных вертикальных сил при недостаточной несущей способности свай и жесткости опоры могут появиться крены и перекосы (рис. 5.9). Такие повреждения наиболее вероятны при подмыве основания опоры. В этих случаях срочно принимают меры по обеспечению нормальной работы опоры: усиливают опору постановкой дополнительных связей, укосин, устраивают ряж с каменной засыпкой и др. В береговых опорах при большой высоте насыпи, неправильной отсыпке конусов и недостаточной жесткости опоры они могут смещаться в сторону русла.

На деревянных мостах должны быть в необходимом числе и в исправном состоянии противопожарные средства.

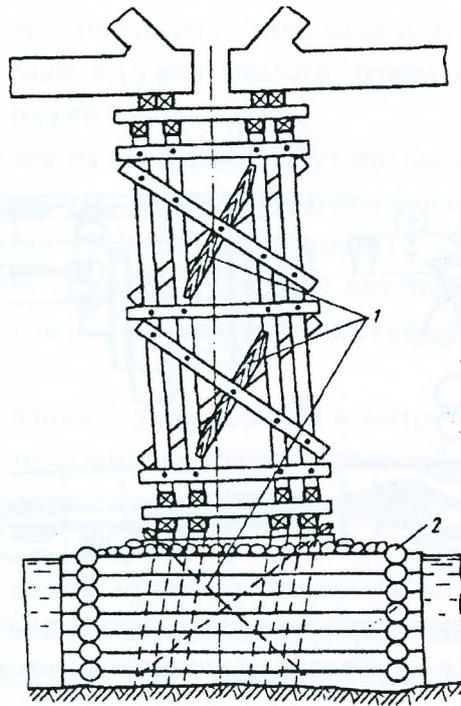


Рисунок 5.9 Перекос и крен опоры, и ее усиление: 1 – дополнительные связи; 2 – рязь.

5.5 Защита мостов от гниения

Для деревянных мостов наиболее опасно гниение древесины, представляющее собой процесс разрушения ее низшими споровыми растениями и грибками. Древесина мостов наиболее часто поражается домовым пленчатым, домовым слезоточивым и шпальным грибками; эти виды грибков развиваются только в мертвой, срубленной древесине. Из грибков, поражающих дерево на корню и продолжающих свою деятельность в срубленном лесе, встречаются красная гниль сосны и бурая гниль дуба.

Жизнедеятельность большинства грибков протекает при влажности древесины от 23 до 40 % и температуре от -3 до $+35$ °С. Наиболее благоприятна для развития гниения температура 20-25 °С. Увлажнение мостов атмосферными осадками, а также повышенная влажность воздуха в речных долинах создают благоприятные условия для гниения древесины в мостах.

Гниль, прежде всего, поражает сильно увлажненные и плохо проветриваемые места конструкции (рис. 5.10) Быстро загнивают доски нижнего настила на верхней своей поверхности и в местах опирания на поперечины, а также доски деревоплиты. Поперечины и прогоны загнивают в торцах, во врубках анкеров и сжимов и по плоскостям сплачивания бревен.

В фермах Гау-Журавского в первую очередь загнивают верхние узлы. Гниль поражает пояса, ветровые связи, подушки, подгаечники, торцы подкосов. Часто загнивают опорные узлы, ферм при опирании их на бетонные или каменные опоры, где древесина интенсивно увлажняется конденсатом. Очагом развития гнили, являются стыки поясов на гребенчатых накладках, а также все места сопряжения дерева с металлом. Фермы Гау-Журавского с ездой

поверху благодаря хорошей защите от увлажнения настилами проезжей части, как правило, менее подвержены гниению.

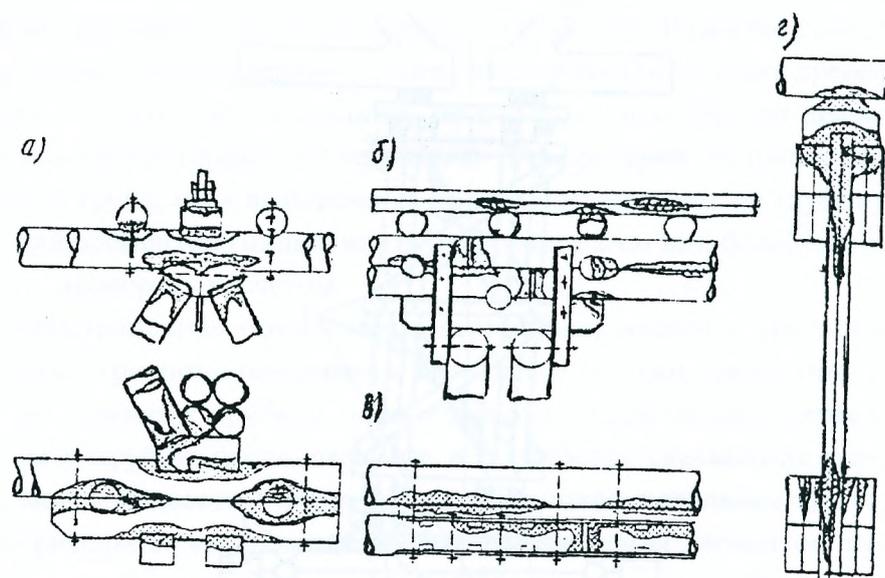


Рис 5.10 Места распространения гнили: а – в узлах ферм Гау-Журавского; б – в проезжей части и прогонах; в – в стыках на шпоночных накладках; г – дощатых фермах.

Вследствие большого количества швов и щелей быстро загнивают дощатые конструкции – дощато-гвоздевые фермы и дощатые арки (рис. 5.11)

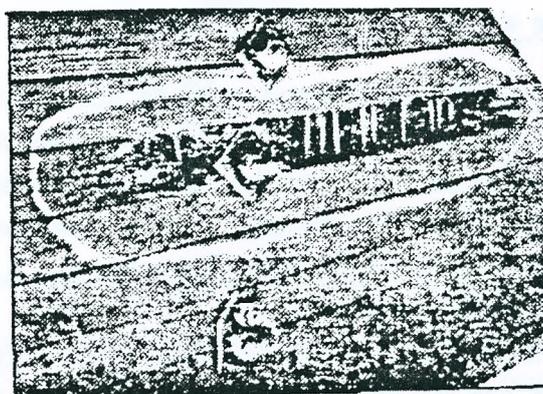


Рисунок 5.11 Загнивание дощатой арки.

Наиболее интенсивному гниению подвержены деревянные опоры и ледорезы, находящиеся в условиях переменного увлажнения. Сваи опор на пойменных участках мостов загнивают вблизи поверхности земли. В сухих песчаных грунтах гниение распространяется на глубину до 1,0-1,5 м от поверхности грунта, во влажных глинистых – на глубину 30-50 см. Сваи русловых опор и ледорезов поражаются гнилью вблизи уровня меженных вод. Легко загнивают укосины, стыки стоек, врубки схваток и т.д. Из-за полного отсутствия проветривания быстро поражаются гнилью ряжевые опоры в надводной их части и устои мостов.

Гниль обнаруживают внешним осмотром и остукиванием древесины, а также путем взятия проб из ее толщи.

Внешние признаки загнивания – появление на поверхности дерева плодовых тел грибов, изменение цвета древесины и наличие мелких трещин. Часто загнивает сердцевина брев-

вен, в то время как наружные слои кажутся здоровыми: в этом случае гниение обнаруживается по глухому звуку при простукивании молотком.

Степень поражения гнилые определяют, затесывая дерево топором, стамеской или про-сверливая буром: при сверлении стружка гнилого дерева имеет повышенную влажность, темно-бурый цвет и специфический грибной запах.

Для лабораторного анализа из древесины берут пробы. Пробы могут быть взяты пустотелыми бурами, которыми извлекают цилиндрики ненарушенной древесины, или же из дерева выпиливают образцы длиной 15-20 см и толщиной 1,5-2,0 см. Если ослабление сечения конструкции нежелательно, то снимают стамеской поверхностную стружку толщиной 4-6 мм. Образцы древесины тщательно упаковывают в восковую бумагу и отправляют в лабораторию для исследования.

Защита мостов от загнивания осуществляется конструктивными и химическими мерами. Конструктивные меры направлены на защиту древесины от увлажнения, а при химических – в древесину вводят антисептики, прекращающие жизнедеятельность гнилостных грибов.

Конструктивные меры защиты нужно применять на всех мостах. К ним, прежде всего, относится содержание в исправном состоянии проезжей части и водоотводных устройств. Для водонепроницаемости проезжей части рекомендуется по настилу укладывать асфальто-бетонное покрытие или битумный коврик, а также прокладывать между досками нижних и верхних настилов рубероид или толь по горячему битуму. Конструкцию мостов следует своевременно очищать от грязи, особенно опоры и ледорезы, на которых после прохода паводковых вод отлагаются ил и другие наносы, способствующие развитию гнилостных грибов.

Для предохранения от увлажнения торцов поперечин и боковых поверхностей крайних прогонов устраивают защитные козырьки (рис. 5.12 а). Верхние пояса ферм Гау-Журавского с ездой понизу, а также арочные пояса комбинированных ферм защищают от дождевой воды съемными крышами (рис. 5.12 б, в, г). В стыках поясов установку таких крыш следует считать обязательной. Нижние узлы ферм могут быть легко защищены от воды (стекающей по раскосам) просмоленными канатами, по которым вода отводится за пределы узловых подушек. Пояса дощатых ферм защищают от увлажнения козырьками, а крайние фермы – обшивкой тесом, оставляя в обшивке небольшие отверстия для проветривания. Заборные стенки устоев желательнее изолировать от воды глиной, а покрытие подходов на длине 5-8 м делать асфальтобетонным.

Более радикальная, но и более дорогая мера борьбы с гниением – антисептирование древесины маслянистыми или водорастворимыми (минеральными) антисептиками. Из маслянистых антисептиков применяют каменноугольное, креозотовое или антраценовое масло (карболинеум). Для лучшего проникания в древесину их смешивают с растворителем – зеленым маслом или керосином. Минеральные водорастворимые антисептики в своем составе содержат фтористый натрий и динитрофенол; промышленность выпускает приготовленные из них комбинированные антисептики – уралит и триалит. Фтористый натрий при соединении с цементом, известью или мелом теряет свои антисептические свойства, поэтому, при-

меня фтористые антисептики, необходимо тщательно очищать древесину от этих материалов.

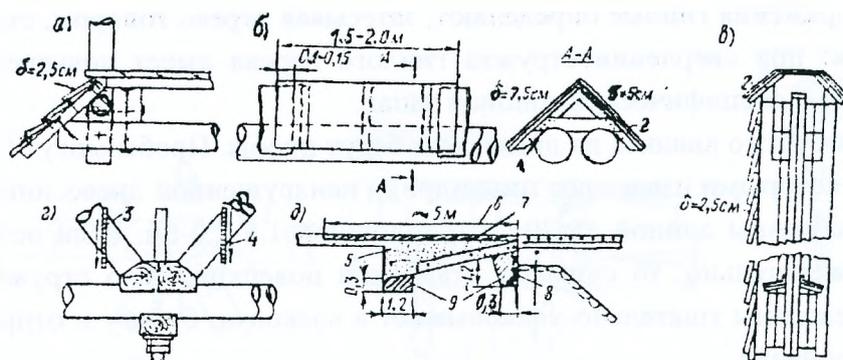


Рисунок 5.12 Защитные конструкции: а – козырек у прогона; б – крыша поясов ферм Гау-Журавского; в – обшивка дощатых ферм; г – предохранение узлов ферм от увлажнения; д – защита заборной стенки; 1 – ветровой крючок; 2 – рубероид; 3 – просмоленный канат; 4 – стекающая вода (стрелки); 5 – песок; 6 – деревянный щит; 7 – асфальтобетонное покрытие; 8 – заборная стенка; 9 – мятая глина.

В эксплуатационных условиях деревянные мосты антисептируют способом влажного поверхностного антисептирования или способом последующего действия.

При влажном поверхностном антисептировании на поверхность древесины наносят жидкие антисептики. Если влажность древесины не превышает 20-23%, применяют маслянистые антисептики, при влажности более 20-23% – водорастворимые (3-8%-ный водный раствор фтористого или кремнефтористого натрия). Антисептики наносят кистями или гидропультами. Маслянистые антисептики предварительно нагревают до 60-80 °С и покрывают ими боковые поверхности древесины за исключением торцов. Водорастворимыми антисептиками обрабатывают все поверхности древесины, включая торцы.

Влажное поверхностное антисептирование желательно осуществлять в конце лета, когда древесина имеет наименьшую влажность и трещины получают наибольшее раскрытие. До нанесения антисептиков конструкции должны быть очищены от грязи, цемента, извести и мела. Антисептики наносят на сухую поверхность дерева в два слоя с промежутком времени в 2-3 ч, необходимым для просушки первого слоя. Антисептиками заливают щели, трещины, врубки.

Поверхностное влажное антисептирование не обеспечивает глубокого проникания антисептиков в древесину и служит лишь временной защитой ее от гниения. Более эффективно антисептирование по способу последующего действия, основанного на том, что минеральные антисептики при влажности древесины более 40%, растворяются и по закону диффузии глубоко проникают в ее толщу. При этом антисептики действуют в течение длительного времени, усиливая свое действие с увеличением влажности древесины.

При способе последующего действия конструкции обмазывают антисептическими пастами (табл. 5.1) или закладывают антисептик внутрь древесины в сухом виде. Пасты (супер-

обмазки) составляют из антисептика – фтористого натрия, уралита или триалита – и клеевой основы из нефтяного битума, кузбасслака или блоклака (продукты каменного угля).

Пастами рекомендуется пользоваться весной, когда влажность дерева наибольшая. Древесину очищают, удаляют наружную гниль и затем покрывают водным раствором антисептика; трещины, неплотности во врубках, пазухи и другие места возможного скопления воды заполняют пастой, затем на поверхность древесины малярными кистями наносят пасту полужидкой консистенции, покрывая ею конструкции так, чтобы стекающая по ним вода встречала на своем пути антисептик (рис. 5.13).

Таблица 5.1

Наименование пасты	Состав	Содержание, % по весу
Битумная паста марки I	Битум БН-III и БН-IV	15
	Креозотовое масло	41
	Торфяная пыль	4
	Фтористый натрий	40
Битумная паста марки II	1. Битум БН-III	18
	Зеленое масло	28
	Торфяная пыль	4
	Фтористый натрий	50
	2. Битум БН-III	23
	Керосин	22
	Торфяная пыль	4
	Фтористый натрий	51
Кузбасшлаковая паста	Кузбасшлак	50
	Вода	10
	Фтористый натрий	40
Блоклаковая паста	Блоклак	42,5
	Вода	45
	Фтористый натрий	42,5

Примечание: Фтористый натрий может быть заменен уралитом или триалитом.

После высыхания пасту защищают от вымывания гидроизоляционным слоем, который приготавливают из тех же материалов, что и клеевую основу.

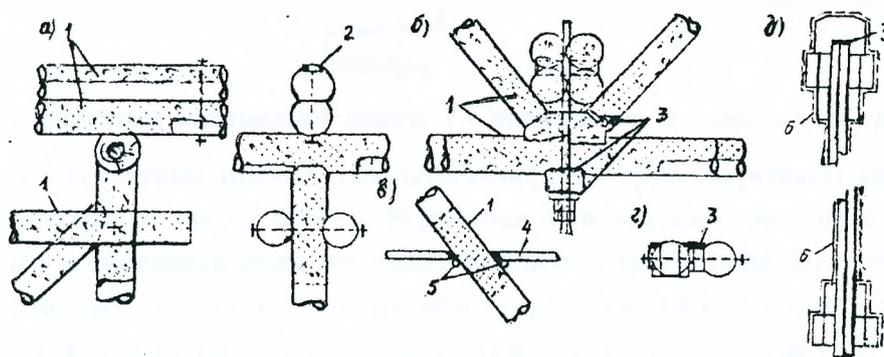


Рисунок 5.13 Антисептированные элементы пролетных строений: а – узлы балочных мостов; б – узлы фермы Гау-Журавского; в – сопряжение дощатого настила с раскосом фермы Гау-Журавского; г – стык поясов фермы; д – сопряжение стенки и поясов дощатых ферм; 1 – поверхность (заштрихованная), обмазанная пастой; 2 – антисептик; 3 – места заливки пастой; 4 – настил тротуара; 5 – просмоленный канат; 6 – поверхность (пунктир) обмазки.

В труднодоступных местах, а также в пакетных конструкциях, например дощатых арках, антисептик смешивают с балластом из опилок или соли и вводят в сухом виде. Для этого в конструкции просверливают глухие отверстия диаметром 12-25 мм, заполняют их антисептиком с балластом и закрывают деревянными пробками.

Опоры и ледорезы антисептируют по всей высоте колебания вод, а сваи, кроме того, защищают антисептическими бандажами (рис. 5.14).

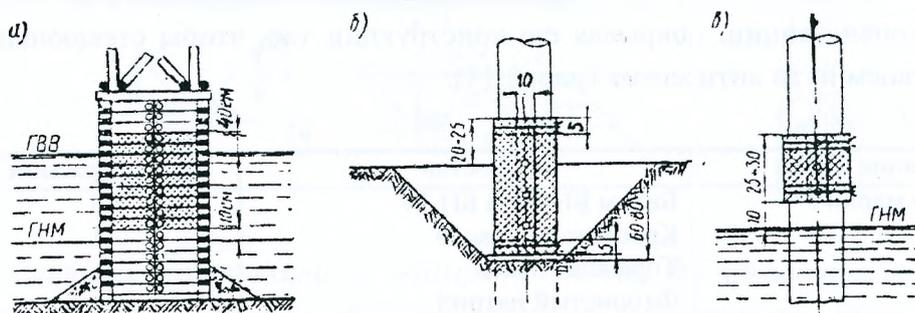


Рисунок 5.14 Антисептированные элементы опор: а – ряж; б – бандаж сваи пойменной; в – то же, русловой.

На поймах рек для установки бандажей сваи отрывают на глубину 60-80 см, очищают от грунта и гнили, обмазывают пастой или маслянистыми антисептиками и затем обертывают рубероидом, толем или картоном, внутреннюю поверхность которых также покрывают антисептиком. Рулонную изоляцию прибивают толевыми гвоздями, а сверху и внизу обвязывают проволокой. Снаружи бандажи покрывают горячим битумом, после чего сваю засыпают грунтом. Если свая находится в русле реки, то бандаж устанавливается на 10 см выше горизонта низкой межени.

Поверхностное влажное антисептирование возобновляют через 2-3 года, антисептирование пастами – через 8-10 лет.

При антисептировании следует руководствоваться специальными инструкциями и строго соблюдать санитарные нормы, так как антисептические материалы в той или иной степени ядовиты для людей.

6 Содержание, осмотр и ремонт водопропускных труб

6.1 Общие сведения о содержании водопропускных труб

Для беспрепятственного пропуска воды через трубы нужно содержать в исправном состоянии русла водотоков на протяжении не менее 100 м выше и 50 м ниже трубы. Русла должны быть спрямлены и достаточно укреплены, обнаруженные размывы заполнены камнем, а разрушенные укрепления около оголовков восстановлены, засорение русла хворостом, ветвями деревьев и другими предметами удалено.

Горизонты ливневых и паводковых вод на малых водотоках измеряют при помощи автоматической рейки (рис. 6.1) в виде деревянной трубы из досок или полиэтиленовой трубы, в стенках которой просверлены отверстия. Внутренние поверхности труб окрашивают мелом. Вода, проникая внутрь рейки, смывает меловую окраску, автоматически фиксируя наивысший горизонт. Высотное положение рейки привязывают к ближайшему реперу. Показания по рейкам берут после каждого подъема воды и заносят в Книгу искусственных сооружений.

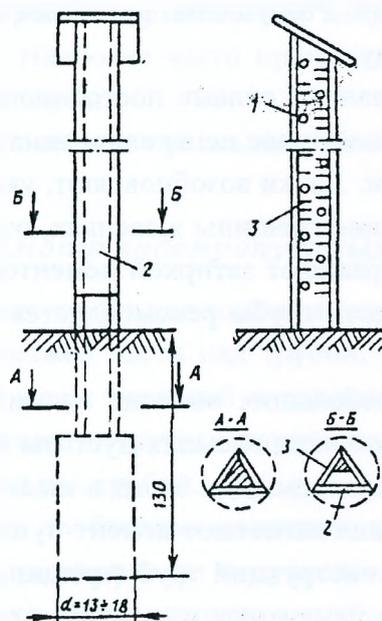


Рисунок 6.1 Конструкция водомерной рейки: 1 – отверстие; 2 – дверца; 3 – рейка.

Зимой при отсутствии зимних паводков отверстия труб закрывают хворостяными или соломенными щитами от заноса снегом. В районах с сильными оттепелями отверстия оставляют открытыми и систематически очищают трубы от снега и льда. Весной щиты убирают, лотки труб расчищают, с низовой и верховой сторон прорывают в снегу русловые канавы длиной 25-30 м для стока воды. Снег удаляют также с откосов насыпей у оголовков.

Водопропускные трубы осматривают и устанавливают их состояние после прохода весенних вод, продолжительных дождей и каждого ливня.

В трубах, построенных на сильно сжимаемых грунтах (торфяных, илистых, пластичных глинах и т.п.), часто наблюдаются неравномерные по длине трубы просадки звеньев. Максимальные просадки возникают в средних участках, где высота насыпи наибольшая. Просадки

могут быть вызваны также вымыванием грунта из-под фундаментов, если отверстие трубы недостаточно и вода фильтрует через грунт. Кроме вертикальных просадок, наблюдаются также продольные деформации труб – растяжка, при которой увеличиваются швы между звеньями.

Растяжка обычно сопутствует просадкам, но может быть следствием нарушения устойчивости насыпи и оползания откосов. Просадки и растяжка сопровождаются разрушением лотка, швов, а также самих звеньев.

При нарушении плотности швов вода постепенно вымывает грунт из тела насыпи, образуя за трубой пустоты. В результате насыпь проседает, разрушается дорожная одежда, из-за неравномерного давления грунта возникают в звеньях трещины и другие дефекты.

В трубах часто наблюдаются деформации и повреждения оголовков: отрыв оголовков от трубы, значительные трещины и т.д. Эти дефекты могут быть вызваны подмывом фундаментов, неравномерными осадками, увеличением давления грунта на открылки оголовков при увлажнении насыпи и другими причинами.

Со временем вода разрушает лоток труб. Поверхность его становится шероховатой, неровной, с местными углублениями. Разрушение протекает особенно интенсивно, если вода агрессивна по отношению к бетону.

Мелкие дефекты труб исправляют силами постоянного надзора. Швы между звеньями по мере надобности тщательно уплотняют пеньковым канатом, пропитанным в битуме, или заделывают цементным раствором. Лотки возобновляют, укладывая по нивелиру цементную стяжку или слой бетона. Небольшие трещины в звеньях, отслоения защитного слоя арматуры, сколы и другие дефекты исправляют затиркой цементом и штукатуркой. При агрессивных водах внутреннюю поверхность трубы рекомендуется защищать покрытиями из полимерных материалов.

Пустоты за трубами при небольших высотах насыпи заполняют грунтом, вскрывая сверху дефектный участок. При высоких насыпях пустоты заполняют песком или тощей цементно-песчаной смесью под давлением. Для этого в швах между звеньями устанавливают инъекторы и заполняющий материал нагнетают цемент-пушкой или растворомасосом.

Общие дефекты и пороки конструкций труб (трещины, сколы и пр.) исправляют торкретированием, инъектированием цементных и полимерных растворов и другими указанными выше способами.

Деформированные оголовки обычно перестраивают, принимая одновременно меры к ликвидации причин деформаций.

6.2 Распространенные повреждения труб

У каменных, бетонных и железобетонных труб наиболее распространенные повреждения – трещины, раскрытия швов, просадки отдельных звеньев или участков трубы, разрушение оголовков, нарушение гидроизоляции, расстройство и выветривание кладки, вымывание грунта около трубы. Трещины в кладке трубы могут быть поверхностные, глубокие и сквозные. Наиболее опасные продольные трещины – в зонах действия максимальных изгибающих моментов (в плоскости поперечного сечения) в кладке трубы. Такие трещины появляются в конструкциях с недостаточной прочностью вследствие давления грунта насыпи. Значитель-

ное влияние на возникновение и развитие продольных трещин могут оказывать динамическое воздействие временной нагрузки при небольшой толщине насыпи над замком свода, неравномерность осадки фундамента трубы.

Поперечные трещины с большим раскрытием, а так же раскрытие поперечных швов происходят вследствие: больших растягивающих продольных сил, возникающих от горизонтального давления грунта; действия больших изгибающих моментов в вертикальной плоскости, вызванных образованием пустот (вымоин) под грубой; пучения грунта или неравномерных просадок грунтов в основании трубы. Эти же причины могут вызвать образование трещин в оголовках трубы, а иногда отрыв их от звеньев трубы, взаимное смещение звеньев трубы. Расстройство швов и взаимное смещение звеньев труб, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, часто связано с пучением грунтов и образованием наледей в основании трубы.

У водопропускных труб из гофрированной стали основные повреждения – коррозия металла, трещины и разрывы в зонах болтовых и заклепочных соединений, сплющивание (чрезмерная деформация поперечного сечения трубы с изменением круглого очертания в эллипсовидное с меньшим диаметром в вертикальном направлении), неравномерные в продольном направлении просадки. Наиболее часто причиной этих повреждений является нарушение технологии сооружения трубы.

Во время паводков могут появляться размывы откосов насыпи, русл, подмыв оголовков, разрушение мощений.

6.3 Осмотр водопропускных труб

При осмотре водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог следует проверять состояние конструкции проезжей части над трубой, укрепления откосов насыпи, оголовков и открьлков, лотков и русла с верховой и низовой стороны трубы, видимой части конструкции трубы, а также положение трубы в горизонтальной и вертикальной плоскости, профиль насыпи и высоту засыпки над трубой.

На проезжей части и насыпи необходимо выявлять, неровности и трещины, места разрушения покрытия, обочин и откосов насыпи в пределах трубы, повреждение укрепления откосов, а также состояние кюветов, примыкающих к трубе.

Русло следует осматривать на участке 50 м выше и ниже трубы, проверяя спрямление русла перед трубой, выявляя участки разрушения укрепления дна русла, замусоренность и заиливание русла и лотков трубы, образование водоемов перед трубой и подмывы насыпи на этих участках.

Необходимо обращать особое внимание на режим работы трубы и толщину наносов в лотках. При наличии сплошной толщи наносов следует проверять правильность отметок лотка на входе и выходе трубы и по ее длине. Режим работы трубы целесообразно проверять в период паводковых вод или после продолжительных ливневых дождей.

При осмотре конструкции трубы следует определять состояние оголовков, звеньев, швов между звеньями, измерять вертикальные и горизонтальные диаметры круглых труб, высоту и ширину отверстия прямоугольных труб, размеры конструктивных швов (зазоров) между звеньями и деформационных швов между секциями труб.

В конструкциях оголовков и звеньев труб необходимо выявлять трещины и сколы в бетоне, мокрые пятна на бетонных поверхностях, следы коррозии арматуры, а также общие деформации элементов конструкции в виде просадок, смещений, растяжки труб (раздвижки звеньев), "сплющивание" элементов в вертикальной или горизонтальной плоскости.

Участки с поврежденной гидроизоляцией определяют по просачиванию воды через кладку и белым подтекам продуктов выщелачивания цементного камня. Наличие пустот за кладкой трубы можно определить простукиванием кладки молотком, по просадкам насыпи и другим признакам. Способы обнаружения и фиксации трещин аналогичны как и при обследовании железобетонных, бетонных и каменных пролетных строений и опор. За развитием трещин и различных смещений в необходимых случаях устанавливают длительные наблюдения. В конструкциях трубы за развитием трещин ведут наблюдения так же, как за трещинами в массивных опорах мостов. Взаимное смещение звеньев контролируют периодически измеряя специальными съемными приборами (например, деформометрами) расстояние между двумя фиксированными точками (марками), расположенными на взаимно смещаемых концах звеньев.

Для выявления положения трубы в вертикальной плоскости необходимо нивелирование трубы по лотку, а по другим точкам (например, по «замку») – только в случае больших наносов или большой глубине воды в трубе. Измерения нужно вести по точкам, позволяющим получить характерные изменения профиля лотка. В сборных конструкциях труб, когда наблюдаются смещения звеньев по лотку, точки для съемки рекомендуется выбирать так, чтобы учитывались резкие переломы профиля.

Положение трубы в горизонтальной плоскости (в плане) следует определять по точкам конструкции, соответствующим середине высоты звеньев (или стенки). Отчеты берутся по нивелирным рейкам с уровнем относительно проволоки, натянутой вдоль трубы на равном расстоянии от одного края первого и последнего звена. Для съемки плана трубы может быть использовано также горизонтальное нивелирование с помощью теодолита.

В трубах с круглым и опальным отверстием необходимо, прежде всего, выявить изменения размера вертикального диаметра и образования трещин в замке и пяте. Появление подобных дефектов в бетонных трубах – признак начала разрушения и необходимости длительного наблюдения за ними.

Осмотр выполняют обычно после паводков при помощи различных приборов и инструментов, предназначенных для выявления повреждений. Характер пропуска воды через трубу наблюдают во время высокого паводка.

6.4 Ремонт водопроводных труб

Текущее содержание водопропускных труб включает в себя укрепление русла, бетонных лотков, швов между звеньями (секциями), защитного слоя, выветрившейся кладки (бетона), восстановление вывалов отдельных камней, частичную перекладку оголовков. Эти работы выполняют бригады из 2-4 человек по содержанию искусственных сооружений под руководством бригадиров. Ремонт укреплений русла (бетонное, каменное мощение) у трубы, лотков должен быть закончен до паводка и ледохода. Швы между звеньями, секциями труб ремонтируют весьма тщательно и своевременно, так как прорвавшаяся вода через раскрытые

швы, особенно при напорном режиме работы трубы, может размыть насыпь, подмыть фундаменты и разрушить трубу, что представляет прямую угрозу безопасности движения.

В каменных трубах вывалы камней даже на небольших участках немедленно восстанавливают или временно подкрепляют зону вывала: через вывалы может высыпаться грунт насыпи, что вызовет образование в ней пустот и, как следствие, деформацию полотна.

Поврежденные швы (раскрытие, разрушение старого раствора и т. п.) заделывают цементно-песчаным раствором состава 1:2 с водоцементным отношением не более 0,5, приготовленным на высокомарочном цементе и песке с крупностью зерен 0,3-1,0 мм. Перед ремонтом швы предварительно расчищают специальным инструментом, не повреждая гидроизоляции трубы; кромки звеньев (секции) трубы очищают проволочной щеткой. Подготовленные к ремонту швы забивают паклей, смоченной в смоле или битуме. Швы раскрытием свыше 10 мм заделывают раствором (бетоном) поэтапно: сначала частично заполняют швы, а после схватывания раствора (бетона) окончательно заделывают. Для улучшения сцепления раствора со стенками шва их смачивают цементным молоком состава 1:5 (цемент, вода). Поверхностно затирать швы вместо заделки их паклей и цементно-песчаным раствором (бетоном) нельзя.

В районах с умеренным климатом, а также при непучинистых грунтах для ремонта укреплений русла труб и бетонных лотков применяют монолитный бетон. Его укладывают на слой песчано-гравийной или щебеночной подготовки толщиной не менее 5 см, устраиваемой после удаления поврежденного бетона. В теплых районах и при непучинистых грунтах подготовительный слой можно не делать. Уложенный бетон через 1 ч. смачивают водой, присыпают сухим цементом и заглаживают. При агрессивных по отношению к бетону водах, а также в засоленных грунтах применяют бетон с соответствующими добавками.

Каменное мощение русла у труб (обычно двойное) часто повреждается во время паводков и ледохода. При ремонте его укладывают два слоя камня на подготовительный слой мха толщиной 5 см или на слой щебня толщиной 10-15 см с подбивкой, трамбованием и расщебенкой пустот.

Способы, материалы и оборудование для ремонта водопропускных труб при текущем содержании применяются такие же, как при ремонте каменных, бетонных и железобетонных пролетных строений и опор.

Для капитального ремонта перестройки труб в насыпи устраивают прорезы или штольни. В зависимости от высоты насыпи прорезы могут быть выполнены без креплений (рис. 6.2. а) и с распорным креплением (рис. 6.2 б). Для обеспечения движения на дороге прорезы перекрывают деревянными или стальными пакетами с дощатым настилом. При большой высоте насыпи может оказаться выгоднее проходка насыпи штольной (рис. 6.2 б), как это практикуется в тоннельных работах.

При капитальном ремонте труб заменяют или устраивают гидроизоляцию, укрепляют кладку фундамента нагнетанием цементного раствора, перекадывают оголовки, устраивают внутреннюю железобетонную оболочку, торкретируют поверхность, расшивают разрушающиеся швы.

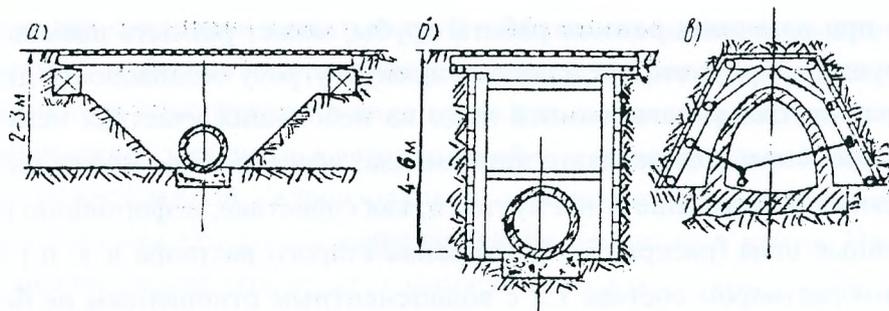


Рисунок 6.2 Прорези и штольня для капитального ремонта труб.

На трубах укладывают двухслойную оклеечную изоляцию по всему ее своду под инвентарным пролетным строением или разгрузочными пакетами с частичным раскрытием насыпи по обе стороны от оси дороги (рис. 6.3 а).

Длина пакетов зависит от размеров поперечного сечения трубы и высоты насыпи. Концевые участки трубы (у оголовков) изолируют, не раскрывая насыпь: ее частично срезают у оголовков без крепления откосов (рис. 6.3 б), а в тяжелых случаях (например, короткая труба) насыпь укрепляют стенкой (рис. 6.3 в). Технология, материалы, применяемые при ремонте изоляции труб, такие же, как при устройстве изоляции на пролетных строениях. По верху изоляционного покрытия укладывают слой жирной мятой глины толщиной 20 см. Изоляцию можно ремонтировать изложенным способом без ограничения скорости движения транспорта.

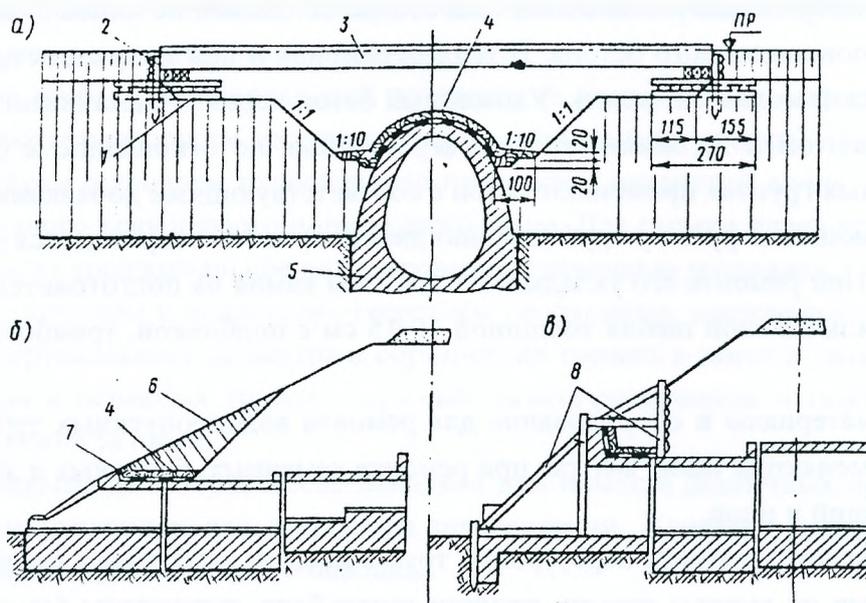


Рисунок 6.3 Устройство гидроизоляции на одноочковой трубе: а – с перекрытием участка работ инвентарным пролетным строением; б – без крепления откосов насыпи, в – с креплением откосов насыпи; 1 – подушка; 2 – стенка; 3 – инвентарное пролетное строение; 4 – слой мятой глины; 5 – труба; 6 – зона раскрытия насыпи; 7 – изоляция; 8 – подкрепляющая стенка.

Способом цементации укрепляют кладку (кирпичную, каменную, бетонную) фундаментов труб для восстановления прочности и герметичности при образовании в ней трещин, пустот, приводящих к фильтрации воды через кладку. Работы по цементации выполняют на

основании проектов, составляемых по материалам обследования кладки. Работы производятся по технологическим правилам цементации кладки мостов. Глиняный экран в шпунтовом ограждении (рис. 6.4) устраивают при проникновении воды под фундамент трубы на входе.

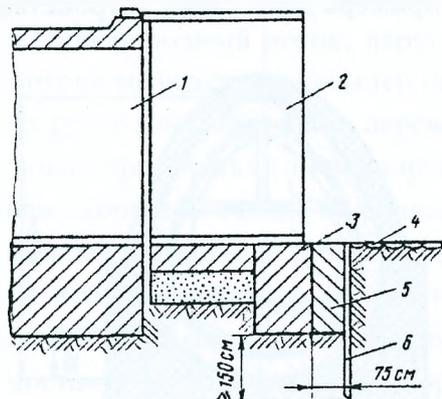


Рисунок 6.4 Устройство глиняного экрана перед трубой: 1 – труба; 2 – оголовок; 3 – фундамент; 4 – каменное мощение; 5 – глиняный экран; 6 – шпунтовое ограждение.

Цементируют кладку фундаментов и устраивают глиняные экраны без перерыва и ограничения скорости движения транспорта.

Оголовки труб переукладывают (иногда переустраивают) при деформациях (наклонах) стенок, глубоких трещинах, низком качестве кладки, изменении формы оголовка. Эти работы выполняют под защитой землеградительных стенок, поддерживающих насыпь (рис. 6.5), без перерыва и ограничения скорости движения транспорта.

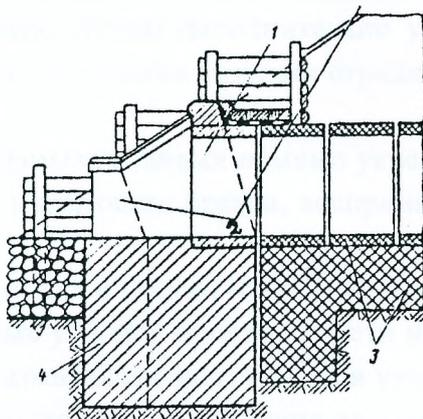


Рисунок 6.5 Устройство раструбного оголовка взамен разрушенного порталного: 1 – порталный оголовок; 2 – раструбный оголовок; 3 – старая кладка; 4 – новая кладка.

Монолитные железобетонные оболочки (бетон класса по прочности В20) толщиной 15-25 см сооружают при повреждении кладки трубы на глубину 10-15 см, выпадении отдельных камней. Арматуру в виде замкнутого по периметру трубы контура из кольцевых стержней диаметром 12-16 мм (через 20 см) и продольным диаметром 8-10 мм (через 30 см) прикрепляют к металлическим штырям: их забивают в швы кладки с шагом до 60 см поперек оси и 100-200 см вдоль оси трубы. Оболочку сооружают в такой последовательности: устанавливают кружала опалубки и вяжут арматурный каркас, бетонируют оболочку до верха

прогона кружал с закладкой досок опалубки по мере бетонирования. Верхнюю часть свода оболочки бетонируют с торца (на себя) по секциям длиной 50 см. При сооружении оболочек в трубах с большим отверстием (более 2 м) прорабатывают организацию доставки материалов к месту работ. В качестве примера дана схема устройства оболочки каменной трубы отверстием 3,62 м (рис. 6.6).

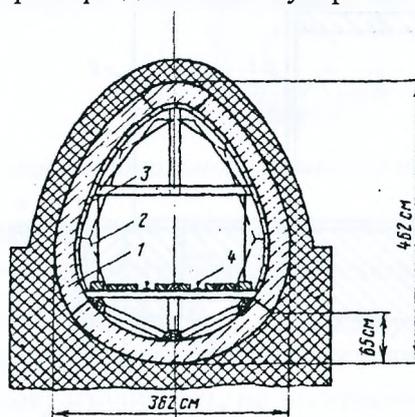


Рисунок 6.6 Устройство железобетонной оболочки трубы: 1 – оболочка; 2 – кружала; 3 – опалубка; 4 – узкоколейный путь для подачи материалов.

Торкретирование "внутренней" поверхности труб делают при наличии трещин, раковин, выветрившихся участков. Если площадь повреждений кладки небольшая и глубина раковин до 20 мм, торкретируют без металлической сетки. При более крупных повреждениях кладки, а также для создания более прочного покрытия, торкретируют по сетке.

7 Содержание, осмотр и ремонт регулиционных сооружений

7.1 Содержание подходов к мостам и регулиционных сооружений

Автомобильная дорога, пересекая водный поток, нарушает его естественный бытовой режим. Из-за сжатия водяного потока возведением насыпей на пойменных участках больших и средних рек и сооружения в их русле мостовых опор, перевода малых водотоков в иные по сравнению с естественными условия протекания (по водопропускным трубам, лоткам, дюкерам), а также по другим причинам скорости течения и уровни воды в зоне искусственных сооружений, особенно во время паводка и ледохода, могут существенно возрасти по сравнению с бытовыми. Проявлением неблагоприятного воздействия повышенных скоростей и уровней паводковых вод на искусственные сооружения являются размывы.

Поэтому за подходами к мостам и регулиционными сооружениями необходим постоянный надзор и уход.

Разрушение насыпей подходов происходит главным образом вследствие их увлажнения, фильтрации воды и размыва проточной водой и волнами.

Для защиты откосов насыпей и струенаправляющих дамб от разрушения их укрепляют дерном, мощением, бетонными плитами. Особое внимание должно быть обращено на состояние укреплений головных частей регулиционных дамб и конусов насыпей, находящихся в наиболее тяжелых условиях. Если обнаруживаются в реке косые течения и размывы берегов, то регулиционные сооружения усиливают или перестраивают.

Катастрофические паводки могут проходить выше постоянных укреплений откосов насыпей подходов. В этих случаях откосы дополнительно укрепляют наброской камня или мешками с песком, а при угрозе затопления возводят оградительные валы из грунта, глины в мешках и других материалов.

Для защиты откосов от размыва волнами помимо укреплений вдоль насыпи устанавливают буны в виде зачаленных плавающих бревен, воспринимающих удары волн и гасящих их энергию.

Верхнее покрытие на подходах к мостам нужно содержать в исправном состоянии, следить за сохранением поперечных уклонов проезжей части и обочин, не допускать просадок, колеи и других неровностей, вызывающих застой воды и увлажнение насыпи.

Наиболее слабое место подходов – сопряжение насыпей с конструкцией мостов. Здесь обычно возникают просадки и образуются пороги. Особенно большие просадки возникают в первые годы эксплуатации, когда грунт насыпи еще не уплотнился в полной мере, а также у деревянных мостов, заборные стенки которых не всегда обеспечивают достаточную прочность сопряжения. Просадки насыпей у въездов на мост своевременно устраняют подсыпкой грунта или щебня с тщательным уплотнением.

Опыт показал: большая часть нарушений нормальных условий эксплуатации дорог, связанных с пропуском паводка через искусственные сооружения, приходится на переходы через малые водотоки. Малые искусственные сооружения как водопропускные системы требуют к себе повышенного внимания, так как паводки на малых водотоках формируются в основном при выпадении дождей или ливней, поэтому их трудно заранее предсказать.

Основные виды повреждений переходов через малые водотоки в период паводков – размывы земляного полотна и выходных русел сооружений. Главная причина этих повреждений – возникновение при пропуске паводковых вод чрезмерного подпора перед малыми мостами и трубами из-за недостаточности их отверстий или отложений наносов в сооружениях и водоотводах. При переливе воды происходят наиболее опасные размывы земляного полотна. Насыпь в этом случае разрушается быстро, на период восстановительных работ приходится закрывать движение.

Опасный подпор воды в зоне малых искусственных сооружений может возникнуть из-за недостаточного возвышения низа пролетных строений над расчетным уровнем воды. По современным нормам проектирования низ пролетных строений должен возвышаться над расчетным уровнем воды в зависимости от категории дороги не менее чем на 0,50-0,75 м, над максимальным уровнем – на 0,25 м, а на водотоках с карчеходом это возвышение должно быть еще большим.

Напорный режим работы водопропускных труб в паводковый период – основной признак опасности разрушения земляного полотна: перелив вод через насыпь при недостаточной ее высоте, усиленная фильтрация подпертой воды сквозь земляное полотно. Регулярная эксплуатация труб в таком режиме не разрешается даже при расчетном расходе водотока.

Большие и средние мосты частично перекрывают водоток в его естественном состоянии, значительная часть его пойм пересыпается земляным полотном. Из-за сжатия потока воды скорость течения под мостом возрастает – происходит размыв русла. Одновременно с общим размывом, в результате которого увеличивается суммарное живое сечение под мостом, могут возникать локальные местные размывы в зоне обтекания водотоком таких местных препятствий, как русловые опоры мостов, головные участки регуляционных сооружений, пойменные насыпи.

Местные размывы русла, вызывающие подмыв промежуточных опор мостов, особенно опасны для сооружения, так как могут приводить к обрушению опор. Местные размывы растут с увеличением глубины водотока, ширины опоры, с уменьшением ее обтекаемости, увеличением косины течения водотока по отношению к боковым граням опоры. Переливы через насыпи у больших мостов – явление редкое. Земляное полотно в этих условиях размывается продольным течением водотока. Элементы регуляционных сооружений – струенаправляющие дамбы и отбойные траверсы – также могут повреждаться паводковыми водами.

Вредное воздействие льда на мосты в значительной мере определяется местными условиями района их расположения и по своему характеру меняется за период времени от образования льда на водотоке до окончания весеннего ледохода. Зимой на ряде рек и, особенно в зоне водохранилищ, возможны изменения уровня горизонта ледяного покрова. Примерзший к опорам лед может повреждать их кладку, а в ослабленных сооружениях вызывать и более опасные повреждения. Весенние подвижки ледяных полей вниз по течению и ледоход, проходящий на отметках, близких к горизонту высоких вод, могут вызвать (особенно при образовании вблизи моста ледяных затворов) механические повреждения и подмывы мостовых опор, конусов насыпи и регуляционных сооружений. Поэтому проводятся систематические наблюдения за режимом водотока и состоянием его русла, предусматриваются меры по безопасному пропуску высоких вод и ледохода и исправлению возникших повреждений.

Характерные отметки уровня воды определяют по водомерным рейкам, закрепляемым на опорах с верховой их стороны, или по водомерной шкале, нанесенной масляной краской на опорах.

В период паводка отметки воды замеряют 2 раза в сутки в определенные часы. Замеренные в процессе эксплуатации сооружения наиболее высокие горизонты паводка наносят краской на одной из опор моста или на выходном оголовке трубы и указывают дату паводка.

На реках с тяжелым ледоходом изучают и систематизируют данные о ледовом режиме водотока, о возможности и времени образования шуги, донного льда, зажоров, осеннего ледохода, ежегодно фиксируют время первой подвижки льда, начало, продолжительность, характер и горизонт весеннего ледохода, измеряют толщину льда специальными рейками (рис. 7.1). Данные ежегодных наблюдений за горизонтами воды, ледохода, паводка заносят в Книгу искусственного сооружения.

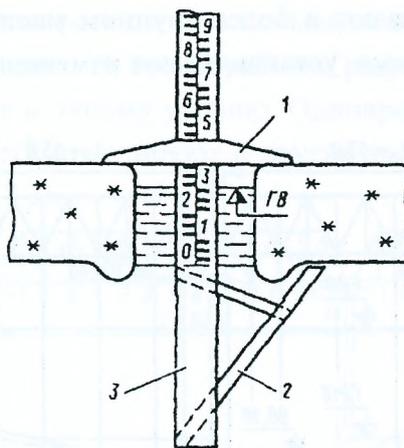


Рисунок 7.1 Рейка для измерения толщины льда: 1 – передвижная планка; 2 – подкос; 3 – рейка.

Для выявления причин нарушения нормального состояния подмостового русла и неудовлетворительной работы регулиционных сооружений нужно иметь статистические данные об условиях протекания воды, паводках, ледоставе и ледоходе. Условия протекания характеризуются горизонтами воды (высоким, межennым) и соответствующими им скоростями и направлением течения. При обследовании подмостового русла проверяют его положение в плане и профиле, наличие отклонения. Особенно опасны различного рода подмывы опор и берегов вблизи насыпи и регулиционных сооружений.

Во время наблюдений за профилем дна реки обычно промеряют глубину русла: по оси моста и на 25 м выше и ниже по течению зимой перед паводком и весной, после спада высокой воды. Если русло устойчивое, то глубину промеряют только по оси моста, если неустойчивое – на большем числе створов и вокруг опор. В каждом створе точки промеров выбирают таким образом, чтобы можно было получить ясное представление о профиле дна реки. При отверстиях моста более 50 м глубину промеряют приблизительно через 10 м, а менее 50 м – через 5 м. Для лучшей привязки точки промера глубины рекомендуется выбирать в створе узлов ферм.

Глубину русла измеряют с моста или лодки различными способами: при большой глубине – тонким тросом или веревкой с привязанным на конце грузом, при очень большой глу-

бине и сильном течении – эхолотом. Принцип работы этого прибора основан на определении времени прохода отраженной от дна реки радиоволны или звуковой волны. Зная скорость распространения радио- и звуковых волн в воде, можно определить глубину. На тросе или веревке, предназначенных для определения глубины, через каждые 20 см закрепляют специальные метки. При небольшой глубине реки промеры делают рейкой, на нижнем конце которой укреплен поддон, что предотвращает погружение ее в грунт при установке на дно. Для фиксации точек измерения глубины при небольшой ширине реки натягивают проволоку или веревку, а при большой ширине визируют с лодки на вешки, установленные в створе на обоих берегах реки, и на узлы ферм пролетных строений. Положение створов отмечают специальными свайками. На незатопленных участках профиль русла в створе снимают при помощи нивелира. Результаты промеров привязывают к реперам и представляют в виде поперечных профилей русла реки (рис. 7.2) которые для наглядности вычерчивают в разном масштабе: по высоте размеры откладывают в более крупном масштабе, чем по длине. Сравнивая профили, снятые в различное время, устанавливают изменения и выявляют места и величину размывов и наносов.

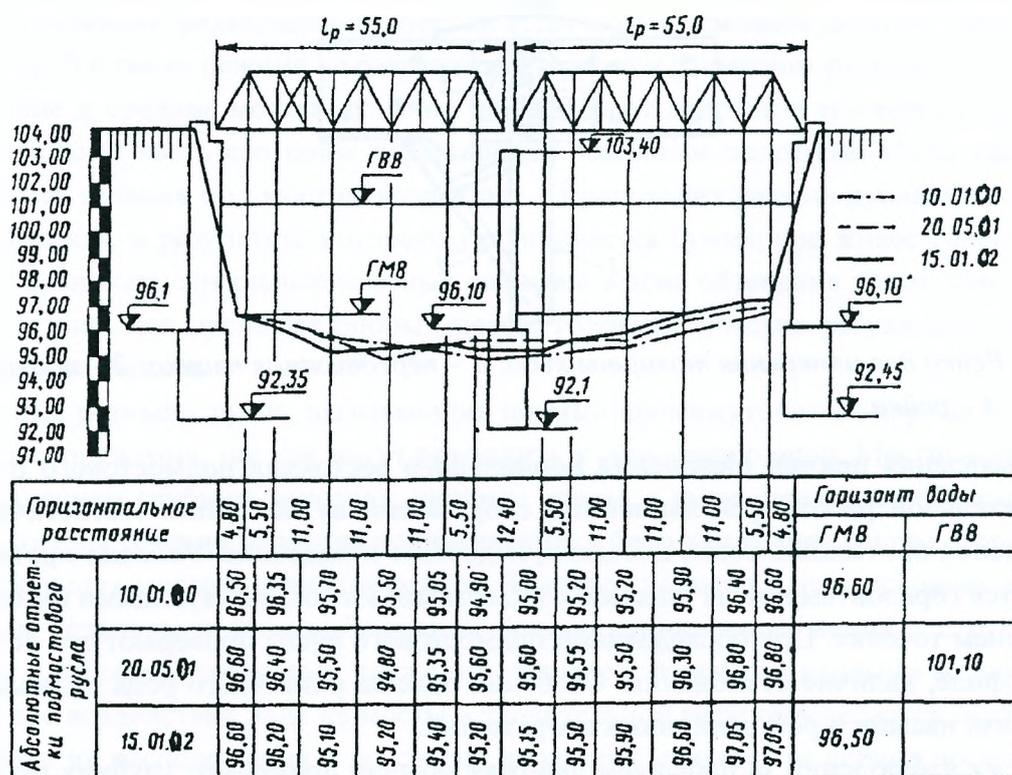


Рисунок 7.2 Поперечный профиль русла по оси моста.

Съемку плана и профиля моста производят при приемке и периодически повторяют в процессе его эксплуатации. На основании характеристик плана и профиля моста, полученных после завершения строительства или реконструкции, оценивается правильность положения элементов моста в пространстве, качество его сооружения. Сравнение результатов съемки, полученных в различные периоды эксплуатации сооружения, дает возможность проследить за изменениями положения отдельных частей сооружения в пространстве, получить материал для

ности движения, устанавливают за мостом специальные наблюдения. При незначительных изменениях в профилях эксплуатируемых мостов рекомендуется тщательно проанализировать причину и оценить возможность их дальнейшего развития.

План главных ферм снимают теодолитами, нивелирами или с помощью натянутой по оси моста проволоки, от которой отмеряют расстояния в поперечном направлении до проверяемых точек. За ось пролетного строения принимают линию, соединяющую средние точки в опорных поперечниках. План пролетных строений обычно снимают по узлам поясов главных ферм, в плоскости которых расположена проезжая часть. Целесообразно снимать план в плоскости верхних и нижних поясов, так как это позволяет установить размер и характер поперечных перекосов пролетных строений. Результаты съемки плана главных ферм представляют, как показано на рис. 7.3 а.

Правильность положения главных ферм в плане зависит, главным образом, от точности изготовления и сборки пролетного строения. В случае резких отклонений отдельных узлов ферм от проектного положения обследуют поперечные и продольные связи и их прикрепления. При значительных отклонениях элементов пролетного строения в плане необходимо проверить расчетом их влияние на изменение условия работы (перегрузки) элементов конструкции, а при езде понизу, кроме того, – выполнение требований габарита.

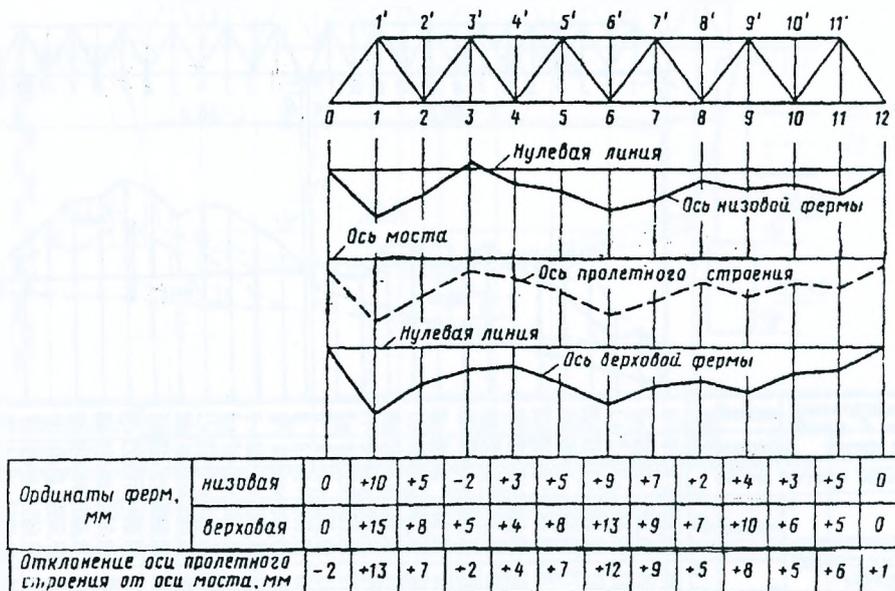


Рисунок 7.3 а План главных ферм.

7.2 Осмотр русла и поймы реки

На основании ознакомления с технической документацией и осмотра выявляются изменения, которые имели место за период с момента строительства или предшествующего осмотра в условиях судоходства, в режиме реки, а также в состоянии русла, берегов и поймы реки непосредственно под мостом, а также на участке влияния мостового перехода (приблизительно две ширины разлива вверх и вниз по течению).

Дефекты русла и пойм реки следует подразделять на следующие группы:

- недостаточное отверстие моста;
- общий размыв русла, превышающий расчетный;

- местный размыв у русловых опор, превышающий расчетный;
- местный размыв у пойменных опор, превышающий расчетный;
- местный размыв у голов струенаправляющих дамб и траверс, превышающий расчетный;
- сосредоточенный размыв;
- зарастание пойменной части отверстия моста кустарником;
- изменение положения русла в плане, не учтенное проектом;
- пересыпание отверстия моста дамбами, остатки грунта в отверстии после завершения строительства, остатки насыпей объездных путей;
- сужение и стеснение русла растительностью, посторонними предметами и остатками конструктивных элементов ранее существовавших сооружений (деревянные сваи, ледорезные кусты и пр.);
- подмыв и истирание берегов;
- разрушение и повреждение конструкции укрепления берега.

Режим реки у мостового перехода (направление и скорость течения в паводок и межень, уровни воды реки в паводок и межень, интенсивность ледохода, наличие подпора) устанавливается по данным водомерных постов и Книги искусственного сооружения, а также по наблюдениям и измерениям в период осмотра моста.

Для получения информации о наиболее высоком уровне воды или интенсивности ледохода разрешается пользоваться сведениями старожилов.

7.3 Осмотр подходов и регуляционных сооружений

На подходах к мостам следует проверять состояние земляного полотна и покрытия проезжей части, а также ограждений, лестничных сходов, подпорных стен и дорожных знаков. Необходимо уделять особое внимание водоотводу с проезжей части и обочин и состояние поверхности откосов насыпей. Осмотр подходов к мостам необходимо производить на участке в пределах границы подтопления при РУВВ.

К дефектам подходов следует относить:

- отсутствие видимости при въезде на сооружение;
- отсутствие уширения насыпи перед сооружением;
- отсутствие сплошного ограждения на подходах или длина существующего ограждения $< 18\text{м}$;
- разрушение покрытия ездового полотна;
- разрушение укрепления обочин и откосов насыпи;
- подмывы насыпи на мостовых переходах;
- отсутствие опасного сопряжения ограждения на сооружении и на подходах;
- размыв конусов;
- разрушение либо сползание укрепления конусов;
- отсутствие уплотнения тела конуса;
- отсутствие дренирующего слоя под укреплением конуса;
- вымывание грунта из-под покрытия на сопряжении подходов с мостом.

При осмотре русла, берегов, поймы следует обращать особое внимание на подмывы берегов и наносы в русле, образование новых протоков, изменение основного русла под мостом, сужение и стеснение русла растительностью и посторонними предметами, подмывы опор и насыпи конусов, разрушение берегоукрепительных устройств.

Характер и глубину подмыва опор, а также профиль русла необходимо устанавливать с помощью измерений глубин в разных точках поперек реки в створе моста с низовой стороны, а также на расстоянии 25 м от моста вверх и вниз по течению. В случае возникновения опасности подмыва опор необходимо также произвести промеры по контуру опоры. Если на реке по данным многолетних наблюдений русло устойчиво, промеры нужны только в створе моста.

При осмотре берегов и их укреплений следует выявлять места подмывов, фильтрации воды через насыпь, а также повреждения, истирание и разрушение берегов и откосов насыпей, конусов, берм, рисберм, выемок и пр.

В плитных укреплениях из сборного и монолитного железобетона следует выявлять коррозию арматуры в стыках, разрушения швов, трещин в плитах и их продавливание (обычно в местах подмыва грунта под плитой), а также участки смещения плит и другие дефекты.

Дефекты регуляционных сооружений следует подразделять на следующие группы:

- разрушение укрепления откосов дамб и траверс;
- подрезку регуляционных сооружений при прокладке временных дорог;
- перелив воды через гребень дамб и траверс;
- струенаправляющие дамбы не обеспечивают безотрывное течение потока под мостом.

Выявление перечисленных дефектов производят визуально и с помощью инструментальной съемки.

На регуляционных сооружениях производят нивелировку струенаправляющих дамб поверху (голова, середина, хвост) и траверс, замеры ширины дамбы поверху.

7.4 Подготовительные работы к пропуску ледохода и высоких вод

Ответственный момент содержания мостового перехода – обеспечение безопасного пропуска паводка и ледохода. Это требует выполнения комплекса мероприятий, включающего в себя подготовительные работы, наблюдения во время паводков и ледохода, устранение возникших повреждений.

В подготовительный период на основании данных обследований, анализа опыта предыдущих лет, в зависимости от состояния сооружений, их категории устанавливают перечень опасных мест, разрабатывают план мероприятий, определяют количество нужных для ремонта материалов и места для их складирования.

Подготовка малых мостов и труб к пропуску паводка включает в себя:

- расчистку от снега на полное сечение отверстий малых искусственных сооружений, устройство вдоль русла канавы протяжением не менее 20 м в верховую и в низовую стороны;

- расчистку русла под мостами и на протяжении не менее 30 м выше и ниже моста от кустарника (кроме случаев, когда кустарник выполняет роль укрепления против размыва или регулирует водный поток);
- установку специальных ограждений у входных оголовков (например, в виде столбиков из старогодных рельсов) для защиты трубы от засорения плавущими предметами;
- ремонт и укрепление от размывов выходных русел мостов и труб;
- устранение неисправностей труб, из-за которых вода может проникнуть в насыпь и размывать земляное полотно, и др.

В условиях слабых разжиженных грунтов опасные подмывы опор в процессе эксплуатации моста можно предотвратить укладкой вокруг опор фашинных тюфяков с каменной пригрузкой (рис. 7.4).

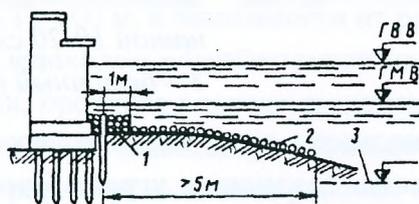


Рисунок 7.4 Укрепление опоры от размыва фашинным тюфяком с каменной пригрузкой:
 1 – фашинный тюфяк толщиной 30-75 см; 2 – каменная пригрузка толщиной 15-35 см; 3 – отметка размыва дна.

Опоры на реках с высокими скоростями течения защищают габионами (ящиками прямоугольной формы из проволочной сетки, заполненными камнем). При небольших объемах работ габионы собирают на проезжей части пролетных строений и сбрасывают по наклонным направляющим с верховой стороны моста; при больших объемах работ и интенсивном движении, их доставляют к укрепляемой опоре и сбрасывают в зону размыва.

Откосы насыпей и регуляционных сооружений укрепляют от размыва и подмыва текущей водой и разрушающего воздействия волн в зависимости от местных условий различными видами одерновки, каменной наброски (рис.7.5), габионов (рис. 7.6) и специальных железобетонных конструкций (рис. 7.7).

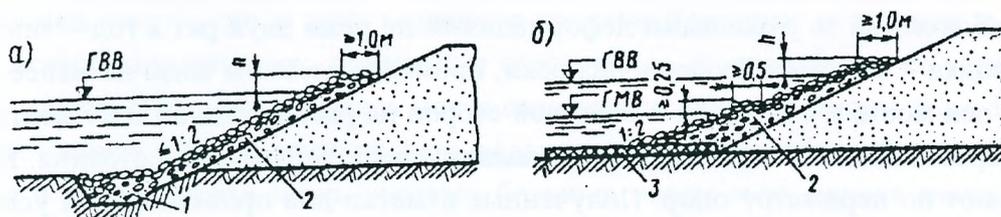


Рисунок 7.5 Укрепление откоса каменной наброской с защитой основания откоса упорной призмой (а) и тюфяком (б): 1 – упорная призма; 2 – горная масса с камнями; 3 – тюфяк ($h = \text{подпор} + \text{высота набега волны на откос} + 0,5 \text{ м}$).

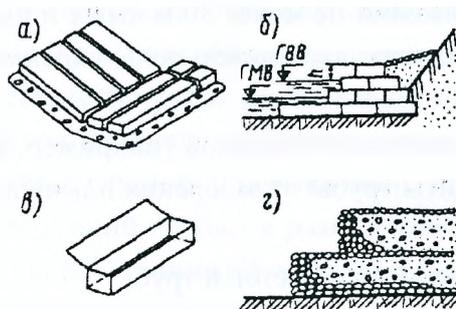


Рисунок 7.6 Укрепление габионами откосов насыпи (а), берега (б) и детали конструкции: в – габионный ящик; г – укладка камней у наружных граней габиона ($h = \text{подпор} + \text{высота набега волны на откос} + 0,5 \text{ м}$).

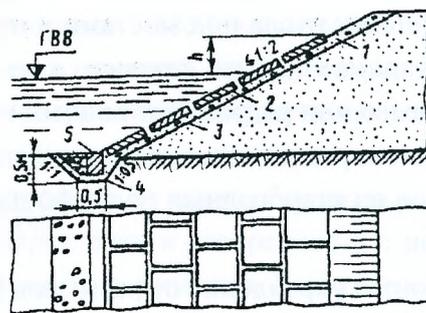


Рисунок 7.7 Укрепление откосов бетонными плитами: 1 – облегченное покрытие; 2 – сборные бетонные плиты толщиной 16-20 см; 3 – щебеночная или гравийная подготовка толщиной 10-20 см; 4 – то же толщиной 10 см; 5 – бетонный упор сечением 40x50 см.

Разрушения укреплений, подмывы опор, конусов, откосов насыпей и регулиционных сооружений и другие повреждения, создающие угрозу безопасности движения, нужно исправлять немедленно. Остальные повреждения устраняют в плановом порядке до наступления следующего паводка.

Для обеспечения безаварийного пропуска высоких вод и ледохода на мостовых переходах ведут систематические наблюдения за водяным и ледовым режимом рек и русловыми деформациями.

Уровни воды в реке наблюдают по водомерной рейке с нанесенными на ней сантиметровыми делениями. Рейку закрепляют на одной из опор моста с низовой стороны, связывают с условным нулевым репером, к которому привязывают наблюдаемые горизонты. Наблюдение за горизонтом воды ведут систематически в течение всего года, а во время паводков – не реже одного раза в сутки. Горизонт самых высоких вод наносят несмываемой краской на поверхности опоры и указывают дату его наблюдения. Горизонты ледоходов и ледоставов определяют также по водомерной рейке. Толщину льда измеряют через лунки простейшими измерительными приспособлениями. Лунки располагают в местах средних скоростей течения, в противном случае измеренные толщины льда не будут характерными.

Для наблюдений за русловыми деформациями не реже двух раз в год – зимой и после прохода паводка – снимают профиль дна реки, промеряя глубины воды не менее чем в трех створах: по оси моста и с низовой и верховой сторон на расстоянии 50 м от моста. Глубины измеряют через каждые 10 м, а в местах размывов – через меньшие расстояния. Кроме того, дно промеряют по периметру опор. Полученные отметки дна привязывают к условному реперу.

Результаты наблюдений за водным режимом рек и русловыми деформациями оформляют, вычерчивая графики колебаний уровня воды и профили живого сечения (очертания дна) по створам.

Зимой и незадолго до вскрытия реки в районе моста выполняют ряд мероприятий по ослаблению действия льда на опоры. Особое внимание при этом уделяют деревянным мостам.

На реках с зимним колебанием уровня воды и подвижками льда вокруг деревянных опор и ледорезов прорубают прорезы (рис. 7.8 а) шириной 0,5-1,0 м и защищают их от замерзания в течение всей зимы, утепляя хворостом, торфом, снегом и т.д. Такими прорезями предохраняют сваи от смерзания со льдом, от расшатывания и выдергивания при подъеме воды в реке. В районе с суровым климатом устройство прорезей желательно и вокруг массивных опор.

Перед ледоходом ледяной покров ослабляют, разрабатывая майны (рис. 7.8 б) и борозды и раздробляя ледяные поля. Борозды прорубают вдоль реки перед каждой опорой для уменьшения давления льда при первой подвижке. Ширина борозд должна быть несколько шире ледорезов и опор, а длина 10-100 м, в зависимости от режима реки.

На реках с интенсивным ледоходом разрабатывают майны (см. рис. 7.8 б). Разработку их начинают с низовой стороны, прорубая вначале поперечную прорезь шириной 0,5-1,0 м. По мере раскалывания льда отдельные льдины проталкивают под лед вниз по течению. Для безопасности работ по кромке прорези укладывают рабочий настил из досок.

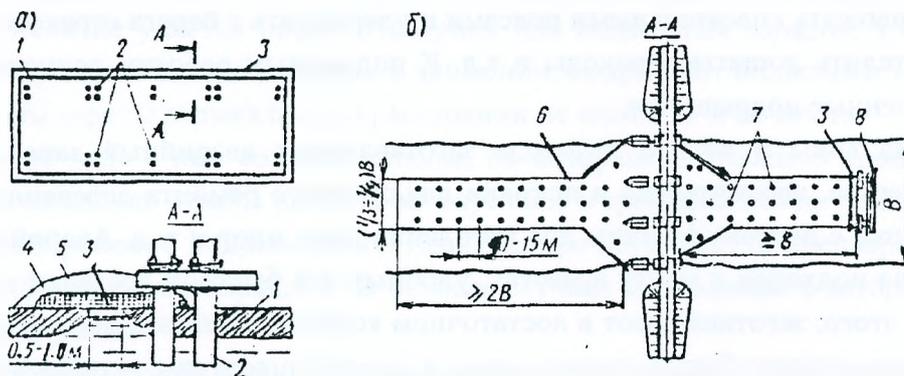


Рисунок 7.8 Прорезы и маньны: 1 – лед; 2 – сваи; 3 – прорезь; 4 – хворост; 5 – снег; 6 – майна; 7 – лунки; 8 – дощатый настил; В – ширина реки.

На реках со средней интенсивностью ледохода ограничиваются ослаблением ледяных полей, дробя их на отдельные карты на протяжении 200-1000 м выше моста и, кроме того, в более удаленных местах, где за зиму создаются прочные и мощные скопления льда. К таким местам относятся извилины рек, пойменные озера, места стоянок барж, не убранных своевременно в затоны и т.д. Весной здесь могут создаваться опасные заторы льда. При заторах лед заполняет живое сечение реки; уровень воды при этом резко в течение нескольких часов повышается и вода, прорвав затор, увлекает большие массы льда, нанося значительные повреждения мостам, расположенным ниже по течению реки. Подъем воды может вызвать повреждения мостов, расположенных и выше затора.

Ледокольные работы обычно ведут подрывными средствами. Для зарядов применяют водоустойчивые аммиачно-селитровые взрывчатые вещества (ВВ) – аммониты и аммоналы. Заряды ВВ погружают в лунки под лед, привязывая их к шестам, опущенным в воду, или подвешивая шпагатом к рейке (рис. 7.9) уложенной поперек лунки.

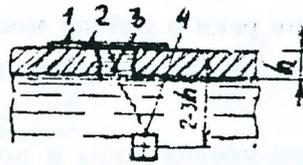


Рисунок 7.9 Расположение заряда ВВ: 1 – рейка; 2 – лед; 3 – штагат; 4 – заряд.

Вес заряда (в кг) для заданной интенсивности разрушения льда определяют по формуле

$$Q = k_1 k_2 \cdot \omega^3,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий сорт ВВ и равный 1,0-0,8; k_2 – коэффициент, зависящий от степени раздробления льда и равный 0,3-0,9 кг/м³; ω – глубина опускания заряда в воду (считая от дневной поверхности льда), обычно назначаемая равной 2-3 толщины льда, м.

Расстояние между зарядами принимают 5-15 м. Вес зарядов и расстояние между ними уточняют пробными взрывами. Если подводный взрыв не удастся, то прибегают к наружным зарядам. Подрыв наружными зарядами менее эффективен и требует значительно большего расхода ВВ.

Работая на льду, нужно соблюдать правила техники безопасности: лунки отмечать вежами, рабочих снабжать спасательными поясами и удерживать с берега страховочными канатами, на льду стелить дощатые проходы и т.д. К подрывным работам допускаются только специально обученные подрывники.

До подъема воды и начала ледохода заготавливают аварийный запас материалов: взрывчатые вещества, лесоматериал и поковки для срочного ремонта деревянных конструкций, камень, мешки с песком, фашины для крепления дна у опор и т. д. Аварийный запас сосредоточивают на подходах к мосту в местах, удобных для быстрой доставки их в русловые пролеты. Кроме этого, заготавливают в достаточном количестве лодки, спасательные средства, тачки, носилки, а также багры, пешни, ломы и другой инвентарь; устанавливают лестницы с пролетных строений на опоры, а на деревянных мостках устраивают легкие переходы между опорами и ледорезами (рис. 7.10).

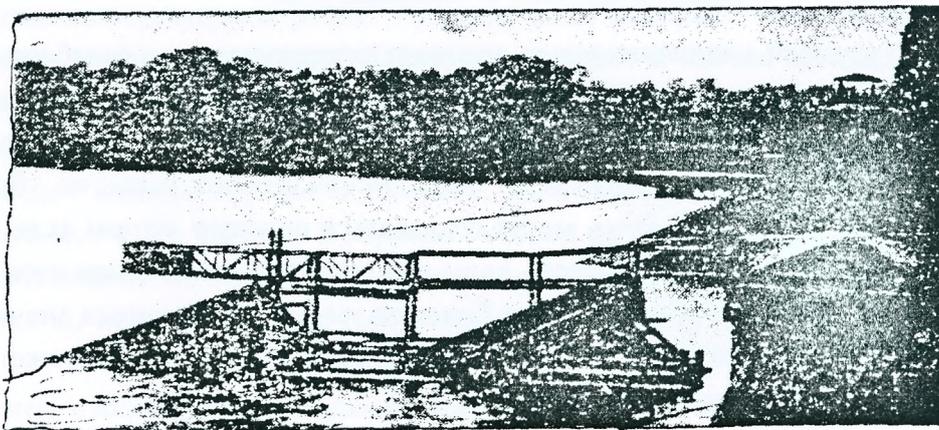


Рисунок 7.10 Мостик между ледорезом и опорой деревянного моста.

У опор нужно иметь лотки для сбрасывания камня при размыве дна. Также заблаговременно организуют рабочие бригады по 5-7 человек, закрепляют за ними определенные уча-

стки работы на мосту и в местах ожидаемых заторов льда. С наступлением ледохода устанавливают круглосуточные дежурные посты. Посты, удаленные от моста, по возможности обеспечивают телефонной связью или световой сигнализацией.

До начала ледохода работы по ремонту опор должны быть закончены, а деревянные опоры и ледорезы обшиты пластинами; на реках с сильным ледоходом их дополнительно нужно обшить листовой сталью толщиной 2-3 мм в пределах колебания горизонта ледохода с запасом в 0,5 м.

7.5 Пропуск льда и высокой воды

Во время ледохода обеспечивают безопасный проход льда под мостом. Большие льдины разбивают пешнями и ломami или подрывают наружными зарядами ВВ весом до 2 кг. Мелкие заряды бросают с ледорезов в воду под плывущий лед. Отдельные льдины направляют в отверстие моста баграми и пешнями, не давая им сталкиваться с опорами. Льдины, застрявшие между опорами, немедленно раскалывают.

Ледяные поля взрывают до приближения их к мосту. Для этого подрывники, подъезжая к льдине на лодке с верховой стороны, высаживаются на лед, опускают подводные заряды на глубину двойной-тройной толщины льда и после зажигания их немедленно отъезжают вверх по течению. Если не удастся прорубить лунки для подводных зарядов, то применяют поверхностные заряды. Лед, находящийся в движении, подрывают большими зарядами с таким расчетом, чтобы заряды взрывались на расстоянии не менее 50 м от моста.

При заторе льда в нем создают каналы, по которым постепенно пропускают льдины. Для образования канала заряды по 10-25 кг опускают в трещины между льдинами на глубину 1,5-2,0 м и одновременно подрывают их. Если лед прочно спаян, то предварительно разрабатывают колодцы мелкими зарядами. В особых случаях для борьбы с заторами привлекают авиацию и артиллерию.

При проходе высоких вод следят за размывами дна у опор, промеряя глубины шестами или лотами. Лоты и шесты на концах пригружают подручным материалом, чтобы они не уносились течением и не наклонялись. Обнаруженные размывы забрасывают камнем весом не менее 10 кг или мешками с песком. Камень и мешки с песком рекомендуется спускать по лоткам, опущенным в воду как можно глубже.

7.6 Особенности контрольно-инструментальных измерений при осмотре мостов, путепроводов и эстакад

При съемке профиля проезжей части, поясов балок и ферм необходимо пользоваться нивелирами, а при съемке их плана – теодолитами.

Нивелирование проезжей части ведется вдоль ее оси по точкам, позволяющим получить все характерные изменения профиля, в том числе на опорах и середине пролета. На подходах к мосту следует нивелировать участок длиной 20-25 м, который определяет плавность сопряжения моста с насыпью. Поперечный профиль проезжей части снимается в характерных сечениях по трем точкам (у бордюров и по оси).

Продольный профиль пролетных строений следует снимать по поясам балок и ферм в точках, расположенных в сечениях по осям узлов ферм, поперечных балок, связей и диафрагм, в опорных сечениях и середине пролета.

В железобетонных бездиафрагменных пролетных строениях нивелирование балок ведется обычно по точкам – опорных сечениях, середине и четверти пролета. В исключительных случаях, когда невозможно выполнить съемку главных балок пролетных строений из-за сложности доступа к ним, нивелирование ведут по маркам, устанавливаемым на бордюре. Такая съемка дает косвенное представление о провисании (или выгибе) пролетных строений.

Фермы с ездой поверху и балки сплошного сечения рекомендуется нивелировать по нижнему поясу, а фермы с ездой понизу – по верхнему и нижнему поясам, во всех случаях прикладывая рейки вертикально к горизонтальным поверхностям поясов. При этом необходимо делать поправки в отсчетах, на разность толщин пояса в различных сечениях по длине пролета.

Съемку плана следует производить с помощью нивелирования реек, расположенных горизонтально, по тем же точкам, что и при съемке продольного профиля. Рейки прикладываются к вертикальной стенке у поясов. В отсчетах по рейке также учитываются изменения толщины стенки по длине пролета.

Положение опор: высотное необходимо фиксировать нивелированием верха подферменной площадки; в плане – измерением расстояния от оси опоры до оси моста, между осями опор и между осями колонн и стоек опоры; в вертикальной плоскости – измерением угла отклонения опор от вертикали вдоль и поперек моста.

Нивелирование следует вести по маркам, закладываемым на верхних гранях ригелей или подферменных площадок. Точки нивелирования должны быть отмечены краской при первом обследовании, и рейку необходимо ставить каждый раз на эти же точки.

Отклонения опор от вертикали предварительно нужно определить по отвесу. Действительный угол наклона опоры следует определять с помощью теодолита, установленного вдоль граней опоры. Плоскость визирования должна быть вертикальной.

По рейкам, приложенным горизонтально к граням опоры вверху и внизу, делают отсчеты. Угол наклона α оси опоры от вертикали можно определить из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{[(a - b) - (a_1 - b_1)]}{2 \cdot H},$$

где $a, a_1; b, b_1$ – отсчеты по рейкам внизу и вверху; H – расстояние между уровнями приложения реек к опоре.

При проверке подмостового габарита путепроводов и эстакад следует провести съемки продольных и поперечных профилей пересекаемых дорог. Подмостовой габарит определяется нивелировкой или прямым измерением расстояния между низом балок и покрытием пересекаемых дорог не менее чем в 3 точках.

Все отметки нивелирования необходимо вычислять каждый раз от одного постоянного репера, который должен быть установлен вне пределов сооружения в период строительства или перед обследованием сооружения. Репер может иметь абсолютную или относительную (условную) отметку.

Места установки реек должны быть зафиксированы на конструкции (отмечены краской или иным способом). Перед проведением работ необходимо очистить эти места от грязи.

При съемках и измерениях следует фиксировать условия погоды, температуру воздуха и материала конструкции, а также тип применяемого инструмента для измерений, его точность, места измерений и установки реек и пр.

Измерения рекомендуется выполнять в несолнечное время, когда освещенность, и нагрев всех конструкций практически одинаковые.

7.7 Охрана труда и техника безопасности

При осмотре и испытании искусственных сооружений необходимо соблюдать указания по охране труда, изложенные в нормативных документах по технике безопасности.

В период работы на мосту (путепроводе) лица, участвующие в этих работах, должны быть в монтажной каске, а при отстукивании поверхности бетона, древесины и заклепок должны пользоваться предохранительными очками с небьющимися стеклами.

При производстве работ, связанных с передвижением по воде и вблизи акваторий, рабочие должны быть обеспечены спасательными средствами.

На действующей сети автомобильных и железных дорог осмотр и контрольные измерения путепроводов должны производиться с обеспечением безопасности движения транспорта с установленными скоростями, при этом должны соблюдаться меры, гарантирующие полную безопасность работы на путепроводе.

При работах на высоте свыше 1,6 м и отсутствии перильных ограждений необходимо пользоваться предохранительными поясами.

8 Исследования эксплуатируемых сооружений

8.1 Задачи и методы исследования эксплуатируемых сооружений

Эксплуатируемые искусственные сооружения периодически подвергают обследованию и испытаниям для выявления и оценки их состояния и грузоподъемности. Вновь построенные мосты и трубы обследуют и испытывают перед сдачей в эксплуатацию.

При обследовании сооружение тщательно осматривают с целью выявления износа и разного рода дефектов, определяют механические характеристики материалов, из которых оно построено, определяют действительное положение и размеры его частей, проверяют соответствие сооружения проекту, качество строительных работ и т.д. Обследуют не только конструктивные элементы моста или трубы, но и весь переход в целом, включая земляные подходы, регуляционные сооружения и русла водотоков.

Испытания состоят в загрузке сооружения нагрузками и измерении возникающих при этом деформаций и напряжений. Испытания бывают статическими и динамическими, т.е. сооружение загружают нагрузками статической и динамической (переменной во времени нагрузкой, вызывающей колебания сооружения).

Обследованию подлежат все сооружения после их постройки, реконструкции или ремонта. Кроме того, сооружения обследуют периодически в процессе эксплуатации, а также при необходимости проуска отдельных тяжелых грузов, на которые сооружение не рассчитывалось. Кроме обследования, как правило, мосты подвергают статическим и динамическим испытаниям, трубы же только обследуют, так как для них влияние временных грузов невелико. Испытания приходится проводить иногда и в процессе постройки сооружения. К ним относятся определение несущей способности грунтовых оснований и свай, контроль предварительного напряжения арматуры, регулирование внутренних усилий при раскруживании конструкций и т. д.

Обследование и испытания обычно выполняют мостовые лаборатории, мостостанции или научно-исследовательские институты, оснащенные достаточным количеством точных приборов и инструментов для различных измерений.

Статические и динамические испытания в большой степени обогащают наши знания о работе мостов, позволяя вносить существенные коррективы в их расчеты и конструкцию. Однако в процессе испытания мостов все же не удастся всесторонне изучить их работу, так как испытания занимают ограниченный отрезок времени и подробно исследовать все элементы конструкции невозможно, конструкции не могут быть доведены до разрушения, невозможно исключить большое число факторов, влияющих на работу конструкций (неоднородность строительных материалов, качество выполнения конструкции, атмосферные воздействия и пр.). Поэтому в последнее время получает большое развитие экспериментальное изучение конструкций в лабораториях на моделях. Модели могут быть изготовлены в необходимых масштабах, вплоть до натуральной величины, и подвергнуты подробным исследованиям под воздействием как кратковременных, так и долговременных грузов. Модели могут быть доведены до разрушения, что позволяет определить истинную несущую способность конструкций. Наконец, на моделях можно проверить новые методы расчета сооружений, новые конструкции, материалы и т. д.

В процессе исследования сооружений измеряют линейные и угловые перемещения, взаимные смещения (сдвиги) отдельных частей и деталей, деформации (напряжения). Для этого используют разнообразные приборы. По принципу устройства, приборы могут быть механическими, оптическими, акустическими, электрическими, магнитными и комбинированными.

8.2 Обследование сооружений

Обследование дает основной материал для суждения о состоянии и грузоподъемности того или иного сооружения. Оно проводится путем тщательного осмотра и инструментальных съемок положения отдельных его частей. В необходимых случаях исследуют прочностные характеристики материалов, из которых сооружение построено.

Обследование следует начинать с подробного ознакомления с технической документацией, обращая особое внимание на отступления от утвержденного проекта, полноту документов по приемке отдельных видов работ, особенно скрытых, а также документов, характеризующих качество строительных материалов и соответствие их требованиям проекта и утвержденным нормативам. Конструкции, изготовленные на заводах, должны иметь соответствующие сертификаты и быть приняты заводской инспекцией. Необходимо ознакомиться с записями в Книгах искусственных сооружений и с актами предыдущих обследований и испытаний.

Сооружения осматривают со смотровых приспособлений и легких подмостей, обеспечивающих безопасный доступ к элементам сооружения. В необходимых случаях для осмотра скрытых конструкций вскрывают отдельные места, например покрытие проезжей части, защитный слой, арматуру, камни облицовки. Основное внимание обращают на дефекты, снижающие грузоподъемность и долговечность сооружений.

Осматривая деревянные пролетные строения и опоры, прежде всего, выявляют наличие и степень загнивания древесины, а также механические дефекты, снижающие прочность и долговечность сооружения и отдельных его узлов: трещины и сколы, неплотности во врубках и примыканиях отдельных элементов, состояние металлических креплений и т.д. Особенно тщательно осматривают наиболее ответственные элементы и узлы – стыки поясов, узловые подушки, нагели в дощато-гвоздевых фермах и пр.

В железобетонных, бетонных и каменных сооружениях осмотром выявляют трещины и сколы, участки пористого бетона, раковины и пустоты, места обнажения арматуры, выщелачивания цементного раствора и т. д. Тщательно осматривают производственные швы бетонирования, швы омоноличивания сборных конструкций, места анкеровки предварительно напряженной арматуры. Натяжение арматуры, качество инъектирования каналов и другие скрытые работы проверяют по соответствующей технической документации на их приемку.

При осмотре металлических конструкций проверяют прямолинейность стержней главных ферм и связей; выявляют местные деформации (погнутости, вмятины, выпучины и пр.) и трещины в металл; осматривают и проверяют простукиванием заклепочные соединения, особенно в стыках и узлах; осматривают сварные швы и прилегающий к ним металл; устанавливают состояние окраски металла и выявляют его коррозию. В болтовых соединениях проверяют плотность сплачивания соединяемых элементов, наличие шайб, их форму и раз-

меры, а также в выборочном порядке натяжение болтов. В сталежелезобетонных пролетных строениях, проверив состояние плит, убеждаются в плотном опирании их на металлические конструкции и проверяют качество омоноличивания плит с балками.

Осматривая опорные части, выясняют правильность их расположения (с учетом температуры воздуха во время осмотра), плотность взаимного опирания отдельных элементов, надежность анкеровки, наличие загрязнения, коррозии, трещин и пр.

Кроме того, осматривают покрытие проезжей части и тротуаров, выясняют состояние гидроизоляции, водоотводных средств, деформационных швов, перильных ограждений.

При обследовании фундаментов и подводных частей опор обычно ограничиваются изучением документации о производстве скрытых работ. В документах должны быть указаны исчерпывающие сведения о грунтах в основаниях опор, глубине погружения и отказах свай, отметках подошвы фундаментов и другие данные, характеризующие соответствие проекту. Если возникают сомнения в прочности и устойчивости фундаментов, то фундаменты частично откапывают для осмотра, бурят кладку и грунты основания, а для осмотра подводных частей привлекают водолазные станции (желательно с аппаратурой для подводного фотографирования).

При обследовании элементов мостового перехода проверяют фактическое заложение откосов насыпей и конусов, выявляют подмывы насыпей, конусов и струенаправляющих дамб, дефекты креплений откосов, состояние дорожной одежды на подходах, состояние сопряжения моста с насыпями. В необходимых случаях промерами выявляют размывы русел рек у опор.

Все замеченные дефекты замеряют, заносят в дефектную ведомость и отмечают мелом или краской на поверхности конструкций. В дефектной ведомости указывают место расположения дефекта, приводят краткие его описания и схематический чертеж с характерными размерами. В процессе осмотра в выборочном порядке проверяют и сравнивают с проектными размеры сечений элементов и сопряжений – глубины врубок, расстояние между заклепками, размеры швов и пр. Для измерения элементов конструкций и их дефектов пользуются простейшими инструментами: рулеткой, мерной стальной линейкой, штангенциркулем, толстомером. Мелкие трещины измеряют при помощи лупы с 10х увеличением, на стекле которой нанесены деления через 0,1 мм, а также при помощи микроскопа Бринелля с 24х увеличением.

Положение моста и отдельных его частей в плане и профиле проверяют инструментальной съемкой.

План проезжей части и главных ферм снимают теодолитом. Для этого в опорных сечениях пролетного строения отмеряют перпендикулярно одной из главных ферм одинаковые отрезки и закрепляют концы их гвоздями. Над одной из этих точек устанавливают теодолит и закрепляют его трубу, визируя на другую точку. План проезжей части снимают горизонтальной рейкой, один конец которой упирают в бордюр в заранее зафиксированных точках. Положение противоположного бордюра определяют промерами рулеткой расстояний между бордюрами. Аналогично снимают план верхних поясов главных ферм при езде понизу. В пролетных строениях с ездой поверху снимают план нижних поясов, располагая теодолит под мостом. При съемке плана поясов устанавливают рейки в узлах ферм или в местах при-

соединения поперечных связей, отмечая места установки реек гвоздями, стальными марками или несмывающейся краской. Полученные съемкой планы вычерчивают на бумаге.

Профили пролетных строений снимают нивелиром. Результаты нивелирования привязывают к основным реперам сооружения для сравнения профилей, снятых в разное время. Нивелируют полотно проезжей части по бордюрам и оси моста и пояса главных ферм. Отметки берут по осям узлов ферм, устанавливая рейки в местах, не подверженных местным деформациям. В железобетонных пролетных строениях обычно ограничиваются отметками по осям опорных частей, серединам пролетов и в местах перелома упругой линии (шарниров). В результате нивелирования по каждому пролетному строению составляют продольные профили, привязывая их к прямой линии, соединяющей опорные узлы главных ферм.

Съемка планов и профилей пролетных строений дает весьма важный материал для оценки состояния сооружения. По плану пролетных строений можно судить об их смещениях в горизонтальной плоскости, о прямолинейности поясов главных ферм, о выпучивании сжатых поясов, о наклонах главных ферм и других дефектах. В профиле пролетные строения должны располагаться по плавной кривой соответственно строительному подъему. Все отступления от кривой строительного подъема, особенно общее провисание ферм, резкие переломы в отдельных узлах и другие отклонения, указывают на некачественное выполнение строительных работ или плохое состояние эксплуатируемых пролетных строений. Важное значение для оценки состояния конструкции имеют данные сопоставления инструментальных съемок в течение ряда лет. Сравнивая планы и профили, снятые в разное время, легко установить развитие общих и местных деформаций во времени и тем самым оценить состояние сооружения.

В необходимых случаях инструментальной съемкой определяют величины кренов, осадок и сдвигов опор мостов. Для этого на опорах устанавливают соответствующие марки, при помощи которых и измеряют величины деформаций.

Для определения перемещений во времени обычно используют прогибомеры с проволоочной связью.

Прогибомер с проволоочной связью (рис. 8.1) состоит из цилиндрического корпуса 1, на лицевой стороне которого под стеклом расположены три шкалы с соответствующими стрелками. Стрелка C_1 по большой шкале указывает прогибы в 0,01 мм, C_2 – прогибы в 1 мм, а C_3 – прогибы в 1,0 см.

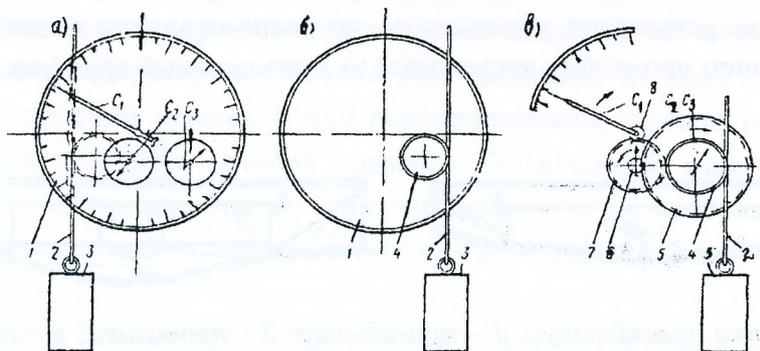


Рисунок 8.1 Прогибомер с проволоочной связью: а – лицевая сторона; б – тыльная сторона; в – кинематическая схема.

С тыльной стороны прибора расположен ролик 4, вокруг которого в один-два витка обгибается стальная проволока 2, диаметром 0,4 мм. Один конец проволоки закрепляют за исследуемую конструкцию, к другому подвешивают грузик 3 весом 1,0 кГ, натягивающий проволоку. При прогибе конструкции проволока под тяжестью грузика опускается вместе с конструкцией и, увлекая во вращение ролик 4, приводит в движение механизм прибора, и стрелки показывают величину прогиба.

Ролик 4, шестеренка 5 и стрелка C_3 посажены на общую ось. Шестеренка 5 своими зубцами входит в зацепление с малой шестеренкой (трибкой) 6, на ось которой насажена стрелка C_2 . Трибка 8 и большая стрелка C_1 приводятся во вращение шестеренкой 7, насаженной на общую ось с трибкой 6. Диаметры шестеренок подобраны так, чтобы стрелки прибора показывали прогибы с указанной точностью; поворот ролика на 360° соответствует прогибу в 10 см. Точность прибора 0,2-0,5%.

Для закрепления в рабочем положении прибор снабжен выступом с шаровой головкой и струбциной (рис. 8.2).

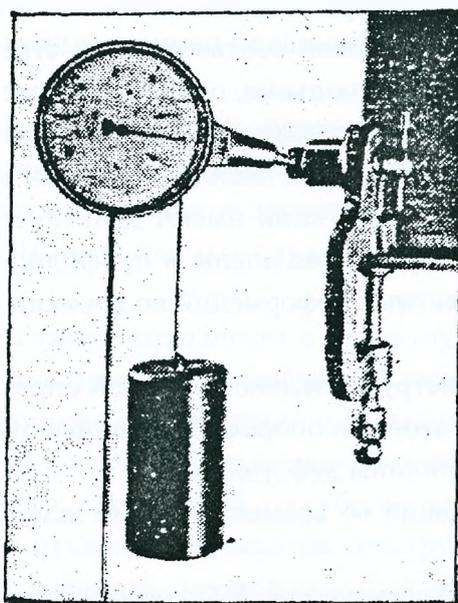


Рисунок 8.2. Общий вид прогибомера.

Если позволяют местные условия, то для удобства наблюдений прогибомер располагают под испытываемой конструкцией, закрепляя его, например, за свайку, забитую в грунт (рис. 8.3, а); если так установить невозможно, то располагают на испытываемой конструкции, а свободный конец проволоки закрепляют за неподвижный груз (рис. 8.3 б), опущенный на грунт.

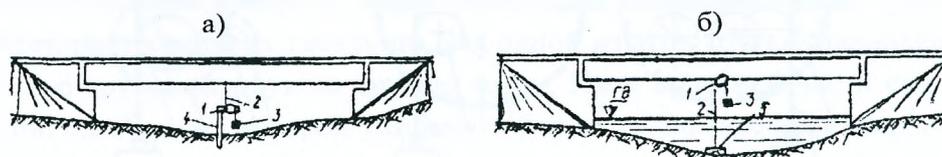


Рисунок 8.3 Установка прогибомера: 1 – прогибомер; 2 – проволока; 3 – грузик; 4 – свайка; 5 – груз.

Недостатки прогибомеров с проволочной связью – невозможность установки его в пролетах моста с интенсивным судоходством, а также влияние на показания прибора температурных удлинений проволоки и ее вибраций, вызываемых ветром, течением воды, ударами плывущих по реке предметов и т. д.

При обследовании труб тщательно осматривают конструкцию, состояние стыков сборных элементов и сопряжения тела труб с оголовками, состояние лотков. Геометрические размеры труб и уклоны лотков проверяют инструментальной съемкой. Также осматривают насыпи, покрытие проезжей части, русла водотоков, их крепления, уклоны.

8.3 Определение механических характеристик и качества материала сооружения

Для оценки грузоподъемности и надежности мостов необходимо знать механические характеристики материалов. При отсутствии технической документации на материал или явном несоответствии его качества проектным данным основные механические характеристики, а иногда и химический состав материала определяют в процессе обследования и испытания мостов. Оценить прочностные характеристики и качество материала можно в лабораторных и полевых условиях. Лабораторные исследования дают наиболее полные и надежные результаты. Однако для их проведения требуется больше времени, а также взятие проб материала, что нередко связано с повреждениями конструкции. Полевые методы контроля позволяют быстро получить прочностные характеристики материала, но они менее полны и точны.

В эксплуатируемых мостах можно встретить элементы, изготовленные из различного материала: чугуна (опорные части), сварочного железа, литого железа и современных сталей (малоуглеродистые, низколегированные и др.). При обследовании важно установить род металла. Предварительно это можно сделать по виду свежего излома снимаемой зубилом стружки. Для литого железа характерна светлая мелкозернистая структура в изломе. Аналогичный вид излома у современных сталей. В изломе сварочного железа хорошо наблюдается слоистая структура серого цвета. Стружка чугуна легко ломается и в изломе имеет крупнозернистую структуру серого цвета. В сомнительных случаях род металла определяют металлографическими исследованиями образцов в лаборатории.

Основные механические характеристики и химический состав металла определяют при испытании образцов в лаборатории. Образцы изготавливают из проб (заготовок), вырезанных из пролетных строений ножовкой или высверливанием, газовой резкой так, чтобы не сильно ослабить рабочую часть сечения элемента. Ослабленные участки перекрывают накладками. Следует помнить, что при изготовлении образцов из заготовки, вырезанной газовой резкой, рабочая поверхность образца от кромки реза должна быть удалена не менее чем на 10 мм.

Предел прочности (временное сопротивление), предел текучести, относительное удлинение или сужение стали определяют на стандартных образцах, чаще всего на пятикратных гагаринских (рис. 8.4 а). Для определения ударной вязкости изготавливают образцы с надрезом (рис. 8.4 б). Число образцов каждого типа должно быть не менее трех. Минимальное число образцов изготавливают из заготовки размерами 130x40x10 мм, из нее же можно взять пробы

для химического анализа: 50 г стружки или кусочек с плоской поверхностью площадью не менее 2 см (для спектрального анализа).

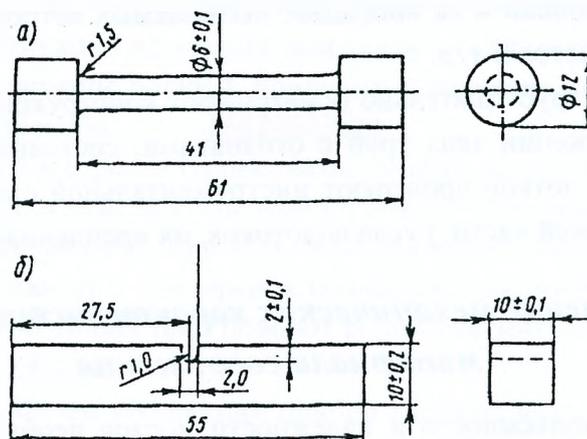


Рисунок 8.4 Образцы для определения механических характеристик металла: а – пятикратный гагаринский; б – с надрезом для испытания на ударную вязкость.

Прокатный металл обладает различными механическими характеристиками вдоль и поперек прокатки, поэтому образцы строго ориентируют по направлению прокатки или передачи усилия. Направления показывают на заготовках.

Из полевых методов оценки прочностных характеристик стали наиболее широко распространен метод вдавливания шарика в испытуемый материал. По этому методу определяют твердость металла, а по ней – предел прочности. Эти характеристики обладают наиболее устойчивой связью между собой. Определение предела текучести по твердости или пределу прочности дает значительные погрешности. Ошибка при определении предела прочности по твердости составляет примерно $\pm 7\%$; при переходе от предела прочности к пределу текучести погрешность достигает $\pm 30\%$.

Твердость стали, а по ней прочность определяют прибором Польди (рис. 8.5).

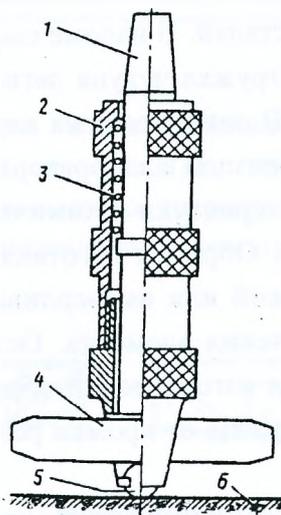


Рисунок 8.5 Прибор Польди: 1 – боек; 2 – трубка; 3 – пружина; 4 – эталон; 5 – шарик; 6 – испытуемый элемент.

Прибор состоит из трубки 2, в которую вставляется боек 1, прижимаемый пружиной 3 к эталону 4 квадратного сечения. Твердость материала эталона H_3 известна (определяют в лаборатории заранее). Эталон зажимают между бойком и шариком 5. При испытании прибор устанавливают шариком нормально к предварительно зачищенной поверхности и по бойку наносят удар молотком: получают два отпечатка шарика – один на эталоне, другой на поверхности элемента. По размерам полученных отпечатков определяют твердость металла элемента.

Формула имеет вид

$$H_6 = H_3 \frac{D \sqrt{D^2 - d_3^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}},$$

где D – диаметр шарика; d_3, d – диаметры отпечатков шарика соответственно на эталоне и элементе.

Более точные результаты получают в том случае, когда твердость материала эталона и элемента примерно одинаковы.

Предел прочности (МПа) по твердости определяют по эмпирической зависимости

$$\sigma_B = k \cdot H_6,$$

где k – постоянный коэффициент для данного металла; H_6 – твердость металла, МПа.

Для углеродистой стали $k=0,36$. По твердости можно приблизительно определить содержание углерода C в незакаленной углеродистой стали:

Содержание C , %.....	0,05	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
Твердость металла, МПа.....	1100	1200	1350	1560	1650	1800

Прочность бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций определить сложно, так как бетон – неоднородный материал, прочность которого зависит от многих факторов и может значительно различаться в пределах одного элемента.

Для лабораторных испытаний из конструкций вырезают керны для изготовления образцов. Наиболее удобный способ взятия проб – выбуривание цилиндров диаметром 70-150 мм. Пробы имеют большие размеры, поэтому взять их из элементов железобетонных конструкций не всегда возможно. Таким методом прочность бетона можно оценивать лишь в отдельных зонах массивных элементов. Широко применяются неразрушающие методы, позволяющие оценивать прочность бетона без разрушения. Неразрушающие методы по подготовке к испытаниям можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, в которых прочность бетона определяют по значению усилия, затрачиваемого на выдерживание заранее забетонированных в тело бетона стержней или установленных в шпур, высверленные в бетоне конструкции. Ко второй группе относятся методы определения прочности бетона: 1) по отпечаткам на поверхности от удара молотком, зубилом, шариком или другим бойком – метод пластических деформаций; 2) по отскоку бойка; 3) по скорости прохождения ультразвука.

Метод пластических деформаций основан на наличии связи между прочностью бетона K и значением косвенного показателя, характеризующего внедрение сферического индектора

в бетон при определенной энергии удара. Этот метод реализуется при помощи различных устройств, например молотков Кима, Кашкарова и др.

Принцип действия эталонного молотка К.П. Кашкарова (рис. 8.6) аналогичен прибору Польди, с той разницей, что удар наносится взмахом самого эталонного молотка.

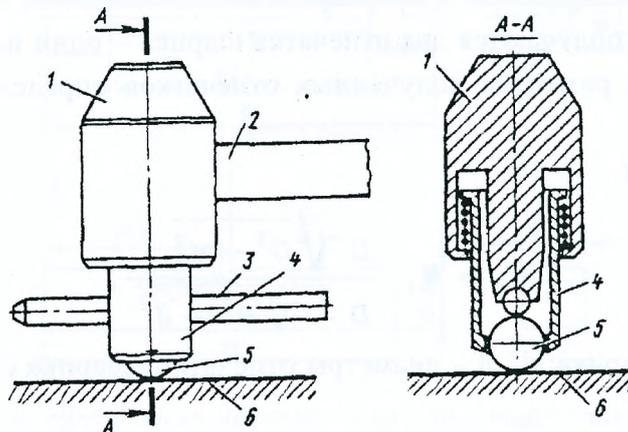


Рисунок 8.6 Молоток К.П. Кашкарова: 1 – головка; 2 – рукоятка; 3 – эталонный стержень; 4 – стакан; 5 – стальной шарик; 6 – испытуемый элемент.

При ударе боек (стальной шарик диаметром 15 мм) оставляет на поверхности бетона вмятину диаметром d_6 , а на эталонном стержне (круглого сечения из Ст3 диаметром 10 мм) – отпечаток диаметром $d_{ст}$. Для 10 ударов, нанесенных по проверяемому элементу, определяется усредненное отношение $d_6/d_{ст}$, прочность бетона оценивается по корреляционной зависимости между $d_6/d_{ст}$ и пределом прочности бетона на сжатие, устанавливаемой экспериментально. При этом должны учитываться конкретные условия изготовления конструкции и твердения бетона, сроки испытаний, шероховатость, влажность и другие особенности состояния поверхности конструкции и т. п. Для эксплуатируемых сооружений указанную зависимость уточняют на образцах, взятых из соответствующих элементов.

Склерометр Шмидта получил широкое распространение при испытании мостов (метод отскока бойка). Принцип работы прибора заключается в следующем. Легким нажатием на головку ударного стержня 2 (рис. 8.7 а) снимают блокировку 11, при этом стержень выдвигается из корпуса, нажимают ударным стержнем на исследуемую поверхность 1, предварительно зачищенную наждачным камнем. Как только стержень почти полностью войдет в корпус, ударяет молот 13. В момент удара прибор должен находиться строго перпендикулярно к поверхности исследуемой конструкции. После удара молот 13 отскакивает назад, перемещая движок 6 по градуированной шкале 5. Отсчет положения движка 6 дает значение обратного перемещения Δ молота 13, по которому определяется прочность конструкции по графику изображенному на корпусе прибора (рис. 8.7 б).

Измерения производят в 10 точках обработанной поверхности. За расчетное принимают среднее значение прочности. Прибор эталонирован в горизонтальном положении. Если склерометр устанавливается на наклонных или горизонтальных поверхностях, то размер обратного хода и нужно корректировать (рис 8.8). При исследовании старых бетонов поверхностный слой снимают на глубину до 10 мм и проводят 5-10 измерений.

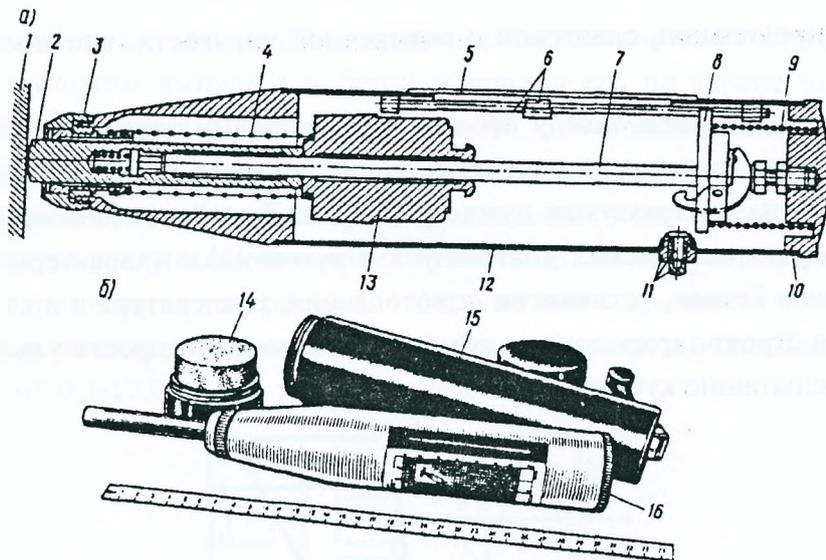


Рисунок 8.7 Склерометр Шмидта: а – продольный разрез; б – общий вид; 1 – исследуемая конструкция; 2 – ударный стержень; 3 – колпачок; 4 – ударная пружина; 5 – окно со шкалой; 6 – движок со стержнем; 7 – направляющий стержень; 8 – направляющая шайба; 9 – нажимная пружина; 10 – крышка; 11 – стопорная кнопка; 12 – корпус; 13 – молот; 14 – крышка с наждачным камнем; 15 – футляр; 16 – прибор.

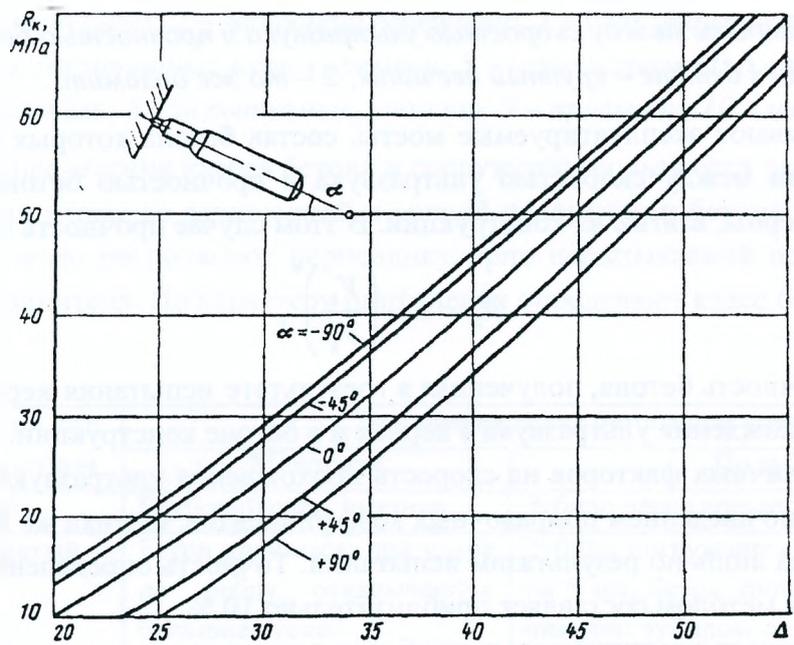


Рисунок 8.8 Зависимость показаний склерометра Шмидта Δ от кубиковой прочности бетона на сжатие.

Метод определения прочности бетона по скорости прохождения ультразвука основан на зависимости между прочностью бетона R и скоростью V распространения в бетоне ультразвука. Ультразвуковые волны распространяются под действием внутренних сил упругости бетона. Колебания могут быть продольными, совпадающими с направлением ультразвука, и поперечными, перпендикулярными к этому направлению. Скорость распространения ультра-

звук – функция продольной, сдвиговой и поперечной упругости, плотности и геометрической формы.

Отсутствие прямой связи между прочностью (упругими характеристиками) материала и скоростью прохождения через него ультразвука существенно осложняет оценку прочности. При испытании бетона ультразвуком нужно учитывать факторы, влияющие на зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью (характеристики заполнителей, их содержание в бетоне, технология изготовления, температура и пр.). Для учета влияния этих факторов строят тарировочные кривые зависимости скорости ультразвука от прочности бетона по испытанию кубиков (рис. 8.9).

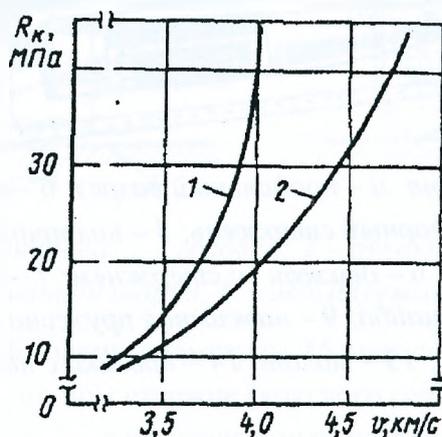


Рисунок 8.9 Зависимость между скоростью ультразвука и прочностью бетона: 1 – заполнитель в бетоне – крупный песчаник; 2 – то же доломит.

Если испытывают эксплуатируемые мосты, состав бетона которых неизвестен, то для установления связи между скоростью ультразвука и прочностью бетона можно дополнительно испытать керны, взятые из конструкции. В этом случае прочность бетона

$$R_k = R'_k \cdot \left(\frac{V_k}{V'_k} \right)^4,$$

где R'_k – прочность бетона, полученная в результате испытания кернов на прессе; V'_k , V_k – скорости прохождения ультразвука в кернах и в бетоне конструкции.

Влияние различных факторов на скорость прохождения ультразвука можно учитывать дифференцированно введением поправочных коэффициентов. Оценка же влияния отдельных факторов возможна лишь по результатам испытаний. Точность определения прочности бетона на ультразвуковым методом составляет приблизительно 10 %.

Существует много ультразвуковых приборов для определения прочности бетона, работающих по принципиальной схеме электронного осциллографа со ждущей разверткой.

Рассмотрим схему ультразвукового импульсного прибора (рис. 8.10). Импульсы тока, возбуждаемые высокочастотным генератором 1, периодически подаются на излучатель 10, в котором они преобразуются в ультразвуковые и посылаются в испытуемый элемент. Одновременно поступает электрический сигнал в блок ждущей развертки 3, и происходит ее запуск. Пройдя через испытуемый элемент, ультразвуковые импульсы попадают в приемник 9, в котором снова преобразуются в электрические и поступают на усилитель 7, а с него – на

электронно-лучевую трубку, вызывая вертикальное отклонение электронного луча. Моменты посылки ультразвукового импульса в бетон и приема его на экране электронно-лучевой трубки отмечаются «всплесками» на осциллограмме 5. Расстояние между ними в определенном масштабе соответствует времени t прохождения импульса через испытуемый элемент. На экране электронно-лучевой трубки при помощи блока 4 наносится шкала времени b , по которой определяется время t . По величине t и толщине l исследуемого элемента устанавливается скорость прохождения ультразвука: $v=l/t$, а по ней – прочность бетона по тарировочным кривым. Современные ультразвуковые приборы позволяют испытывать бетонные конструкции толщиной 0,1-12,0 м.

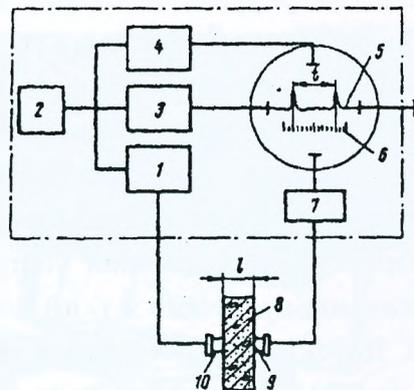


Рисунок 8.10 Блок-схема ультразвукового импульсного прибора: 1 – высокочастотный генератор импульсов; 2 – задающий генератор, 3 – блок ждущей развертки; 4 – блок масштабных меток времени; 5 – осциллограмма; 6 – шкала времени; 7 – усилитель; 8 – испытуемый элемент; 9 – приемник; 10 – излучатель.

Для грубого определения класса бетона в сооружении пользуются также молотком или зубилом, нанося ими удары по зачищенной и ровной поверхности бетона. При ударе молотком по зубилу его жало располагают перпендикулярно испытываемой поверхности, минуя зерна крупного заполнителя. По характеру разрушения определяют класс бетона (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Класс бетона	Звук при ударе молотком	Вид повреждения бетона при ударе	
		Молотком	По зубилу
Менее 7	Глухой	Глубокий след, вмятина	Зубило легко врезается в бетон
7–10	Глуховатый	Бетон крошится; при ударе по ребру откалываются большие куски	Зубило погружается в бетон примерно на 5 мм; бетон крошится; при прочерчивании зубилом остается след глубиной 1,0-1,5 мм
10–20	Чистый	Заметный след; откалываются тонкие лещадки	Откалываются тонкие лещадки; при прочерчивании остаются тонкие следы
Более 20	Звонкий	Мало заметный след; при ударе по ребру откалываются тонкие лещадки	Слабый след без отделения лещадки; при прочерчивании следы мало заметны

8.4 Методы выявления скрытых дефектов и повреждений

Внутри элементов мостовых конструкций и их соединения могут быть дефекты или повреждения (трещины, раковины, пустоты, поры, инородные включения и др.), снижающие эксплуатационную надежность. Такие дефекты выявить визуально нельзя. Для обнаружения скрытых дефектов и повреждений широко применяют дефектоскопы, основанные на использовании акустических и магнитных методов, радиоактивных излучений и рентгеновских лучей.

Акустический метод основан на использовании упругих волн широкого частотного диапазона. В зависимости от частоты упругие колебания делятся на инфразвуковые (до 20 Гц), звуковые (от 20 Гц до 20 кГц) и ультразвуковые (от 20 кГц и более). Из этих частот при контроле акустическими методами используют звуковой и ультразвуковой диапазоны. Упругие волны в ультразвуковом диапазоне излучаются в непрерывном или импульсном режиме. Использование ультразвука позволяет осуществлять неразрушающий контроль разных узлов и элементов конструкций, изготовленных из различных материалов. Работа дефектоскопа основана на частичном отражении и рассеянии ультразвуковых волн нарушениями сплошности (трещинами, расслоениями, пустотами и т. п.) или однородности строения материала исследуемой конструкции. Дефектоскоп посылает в контролируемое изделие ультразвуковые волны частотой от 0,5 до 25 МГц и регистрирует параметры волн, прошедших через конструкцию (сквозное прозвучивание) или отраженных от поверхностей, на которых акустические характеристики материала испытывают изменения (эхо-метод).

Для возбуждения упругих колебаний в различных материалах используют пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи. Ультразвуковые волны вводятся исследателем (пьезоэлектрическим преобразователем) в контролируемую конструкцию преимущественно контактным способом со смазкой.

Скрытые дефекты в металлических и железобетонных конструкциях чаще всего определяют *эхо-методом* с импульсным излучением. В простейшем эхо-дефектоскопе (рис. 8.11) реализуется свойство преломления и отражения ультразвуковых волн от границ раздела двух различных сред.

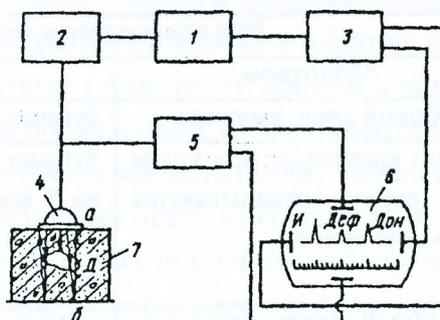


Рисунок 8.11 Блок-схема простейшего эхо-дефектоскопа: а – поверхность ввода ультразвука; б – донная поверхность; Д – дефект; И – изображение на экране ЭЛТ; И – начальный зондирующий сигнал; Дон – донный эхо-сигнал; Деф – эхо-сигнал от дефекта; 1 – хронизатор; 2 – генератор импульсов; Л – генератор развертки

ки; 4 – искатель; 5 – приемный тракт; 6 – индикатор (электроннолучевая трубка–ЭЛТ); 7 – контролируемая конструкция.

Если на пути ультразвукового сигнала окажется дефект (например, трещина, раковина, шлаковое включение), акустическое сопротивление которого отличается от обычного для данного материала, то произойдет преломление и отражение волны и на экране электроннолучевой трубки появится дополнительный импульс. Определив время, скорость и направление прохождения ультразвука, можно установить место дефекта. На рис. 8.12 показан дефектоскоп ДУК-66ПМ, применяемый для обнаружения скрытых дефектов. Для оценки качества бетона его прозвучивают.

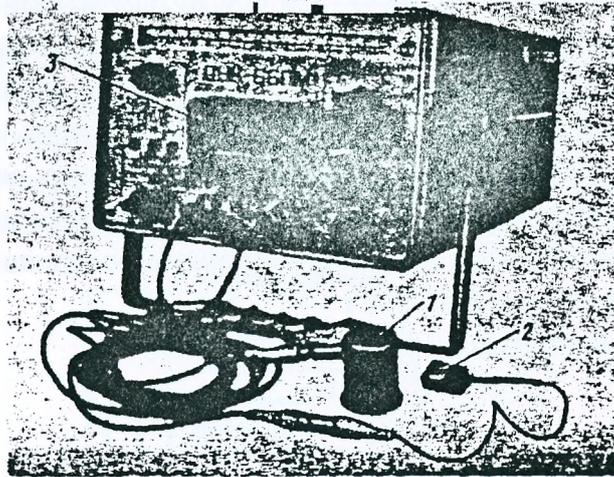


Рисунок 8.12 Ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66ПМ: 1 – излучатель; 2 – искательная головка; 3 – экран визуального наблюдения.

По резкому изменению скорости распространения ультразвука в отдельных частях конструкции можно установить снижение плотности бетона, наличие пустот, трещин и т. д.

Наличие дефектов и повреждений в сварных швах устанавливают при помощи призматических щупов-излучателей с углами наклона ультразвуковой волны $30-60^\circ$ (рис. 8.13).

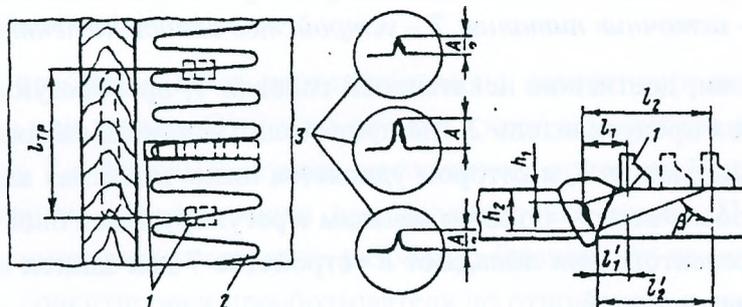


Рисунок 8.13 Схема определения дефектов в шве: 1 – щуп-излучатель; 2 – траектория движения щупа-излучателя; 3 – характер импульсов на экране электронно-лучевой трубки при указанных положениях щупа-излучателя.

Щуп перемещают по волнообразной траектории вдоль шва. При обнаружении дефекта на осциллограмме электронно-лучевой трубки появляется импульс («всплеск»). Одновременно подается звуковой или световой сигнал. Для определения границ дефекта щуп перемещают в разные стороны от положения, в котором зарегистрирован импульс, до тех пор,

пока его амплитуда A на экране не уменьшится примерно вдвое. Это положение щупа соответствует границе дефекта. Зная координаты положения щупа, наклона ультразвукового луча, можно определить границы повреждения.

Импульсный ультразвуковой метод удобно использовать при длительных наблюдениях за изменением структуры и прочности бетона.

Метод акустической эмиссии используется для обнаружения повреждений в мостовых конструкциях, получения информации о процессах, протекающих внутри материала, для неразрушающего контроля. Метод основан на регистрации акустических волн, возникающих в твердых телах при пластической деформации и появлении микротрещин. Фиксируя волны эмиссии, можно обнаружить опасные дефекты и прогнозировать работоспособность отдельных элементов конструкций. Сущность метода заключается в следующем. На поверхность исследуемой конструкции устанавливают одну или несколько искательных головок, чувствительных к сдвиговым деформациям или поверхностным волнам, работающим на частоте 1-3 МГц. В процессе работы или испытания в конструкции могут развиваться значительные деформации и появляться трещины. Их появление сопровождается вспышками эмиссии волн напряжений, носящими импульсный характер. Эти волны воспринимаются искательной головкой и по ним определяется дефект.

Рассмотрим схему эмиссионной установки (рис. 8.14)

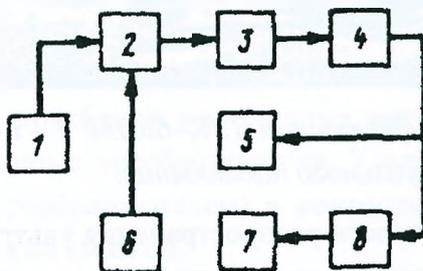


Рисунок 8.14 Блок-схема акустической эмиссионной установки: 1 – искательная головка; 2 – предусилитель; 3 – электронный фильтр; 4 – усилитель; 5 – регулирующий блок; 6 – источник питания; 7 – устройство записи на ленту; 8 – селектор.

Вспышки эмиссии, достигшие искательной головки 1, преобразуются в электрические сигналы и подаются на предусилитель 2, где происходит усиление сигнала, затем они проходят через электронный фильтр 3, в котором удаляется низкочастотная информация, и поступают в усилитель 4, после этого – по двум каналам в регулирующий блок 5 и на дискриминатор и селектор 8. С селектора они попадают в устройство 7 для записи на магнитной ленте. Прибор питается от источника 6.

Магнитными методами обнаруживают дефекты и повреждения в ферромагнитных материалах, определяют толщину защитного слоя и расположение арматуры в железобетонных конструкциях, толщину антикоррозийных покрытий стальных конструкций и др. Обнаружение дефектов и повреждений в виде трещин, пор, инородных включений в элементах из ферромагнитных материалов основано на выявлении образующихся в их зоне полей рассеивания магнитного потока.

Для выявления полей рассеивания, а, следовательно, дефектов в простейшем случае используют магнитный порошок или его смеси с маловязкой жидкостью (например, керосином) нанося их на поверхность исследуемого элемента. При действии магнитного поля эти частицы образуют своеобразный узор в зоне расположения дефекта. Более надежные результаты получают при наложении на исследуемые участки магнитной пленки. После намагничивания расшифровывают зарегистрированные на пленке поля рассеивания.

Другой, более эффективный метод фиксации полей рассеивания основан на использовании магнитных щелевых головок магнитофонного типа, устанавливаемых в плоскости П-образного электромагнита. Магнитная головка представляет собой кольцевой разомкнутый сердечник со щелью шириной 7-20 мкм с обмоткой. Основное магнитное поле создается П-образным магнитом. При установке такого устройства на поверхность элемента над дефектом возникает поле рассеивания, которое наводит ЭДС в магнитной головке. Наведение ЭДС подается на регистрирующий прибор, по которому судят о дефекте в элементе.

Рассмотрим схему прибора индукционного типа (рис. 8.15) для определения положения арматуры в железобетоне, толщины защитного слоя и диаметра стержней.

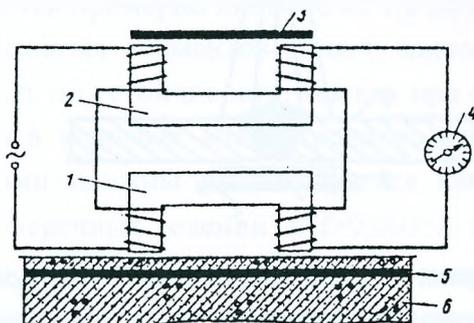


Рисунок 8.15 Индукционный прибор для проверки положения и диаметра арматуры и толщины защитного слоя: 1 – выносной индуктивный преобразователь; 2 – преобразователь в корпусе прибора; 3 – стержень для регулирования индуктивного сопротивления; 4 – гальванометр; 5 – арматурный стержень; 6 – железобетонный элемент.

Индуктивный преобразователь передвигается по поверхности исследуемой железобетонной конструкции или детали. Отдельно от него в корпусе прибора расположен аналогичный преобразователь 2 с ферромагнитным смещаемым элементом 3, предназначенным для изменения индуктивного сопротивления при балансировке схемы. По мере приближения преобразователя к арматурному стержню разбаланс (зависит от толщины защитного слоя, диаметра стержня и ориентировки преобразователя по отношению к его направлению) будет уменьшаться. Шкала гальванометра проградуирована в миллиметрах защитного слоя для арматурных стержней разного диаметра. Установив расположение стержней, передвигают преобразователь вдоль контролируемого стержня до положения, соответствующего минимальному отсчету, следя за тем, чтобы преобразователь находился между пересечениями арматуры. Записав толщины защитного слоя по шкалам всех диаметров, повторяют отсчет, поместив между бетоном и преобразователем прокладку толщиной 10 мм из диамагнитного материала. Диаметр арматуры будет соответствовать той шкале, по которой разность отсчетов окажется равной 10 мм.

Рентгенографические и гаммаграфические методы позволяют обнаруживать дефекты и повреждения в металлах, бетоне и железобетоне, полимерах и других материалах. Этими методами можно определять положение арматуры, ее размеры в железобетонных и других армированных конструкциях. Эти методы основаны на использовании рентгеновских, γ -лучей или других для фотографирования скрытых дефектов и повреждений. Исследуемый элемент просвечивают лучами при помощи специальных установок (рис. 8.16). Проникающая способность этих лучей зависит от плотности материала, толщины элемента и др. В зонах с порами, раковинами, трещинами проникающая способность лучей будет выше. В зависимости от интенсивности прошедшего излучения на фотопленке получаются участки с различной затемненностью. По наличию затемненных мест и степени затемнения судят о характере и размерах дефектов и повреждений.

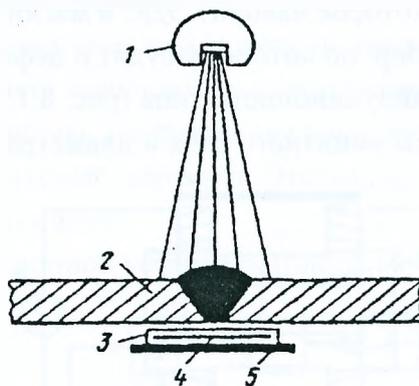


Рисунок 8.16 Схема просвечивания сварного элемента: 1 – источник излучения; 2 – сварной элемент; 3 – кассета; 4 – фотопленка; 5 – защитная свинцовая пластинка.

Для регистрации излучения применяют ксерорадиографические пластинки из металлических подложек, покрытых тонким слоем аморфного селена. В темноте селен способен воспринимать и удерживать электрический заряд, утечка которого пропорциональна интенсивности падающего луча. После экспонирования на поверхности пластинки остается часть заряда, интенсивность которого можно выявить напылением мелкого порошка, заряженного электрическим зарядом противоположного знака. По распределению этого порошка на пластинке определяют наличие дефектов и повреждений.

Источниками излучения могут служить рентгеновские трубки, бетатроны или радиоактивные изотопы. Рентгеновские лучи возникают в результате бомбардировки металлической мишени высокоскоростными электронами, ускоренными за счет разности потенциалов между катодом и мишенью. В бетатронах в отличие от рентгеновских трубок электроны ускоряются под воздействием пульсирующего магнитного поля. Источники γ -лучей – радиоактивные изотопы, по сравнению с рентгеновскими установками более компактны, не требуют источников питания. При использовании γ -лучей нужно иметь надежную радиационную защиту. В качестве радиоактивных изотопов часто применяют кобальт-60 (Co^{60}) с энергией лучей, равной (1,17-1,33) МэВ и цезий-137 (Cs^{137}) с энергией 0,794 МэВ. Метод γ -излучений обладает меньшей чувствительностью, чем рентгенографический.

При работе с источниками излучения нужно очень строго соблюдать правила техники безопасности.

8.5 Учет влияния поврежденных элементов на их несущую способность

При определении грузоподъемности мостов должны учитываться повреждения элементов, обнаруженные при обследовании. При расчетах на прочность и устойчивость принимаются фактические геометрические характеристики сечений с учетом ослабления их коррозией. Одновременно с расчетом сечений, в которых действуют максимальные усилия, необходимо классифицировать и другие опасные сечения элементов, наиболее ослабленные коррозией. Неравномерная по поверхности элемента и его длине коррозия металла вызывает концентрацию напряжений в отдельных локальных зонах и тем самым может снижать несущую способность по выносливости. Исследования показали: коррозионные язвы снижают усталостную прочность металла при их глубине, превышающей 0,4 мм. При язвах глубиной около 1,6 мм влияние коррозии на усталостную прочность металла максимальное при дальнейшем увеличении глубины язв – практически стабилизируется.

Влияние коррозионных язв на величину γ учитывается соответствующими эффективными коэффициентами концентрации напряжений β , значения которых при глубине язв от 0,4 до 1,6 мм и более изменяются примерно линейно от 1,0 до 2,2.

Несущая способность сжатых элементов может снижаться из-за их искривления – уменьшается грузоподъемность по устойчивости, так как при общем искривлении со стрелой f элемент начинает работать в условиях внецентренного сжатия. Исследования показали: элементы с такими дефектами должны рассчитываться как внецентренно сжатые, если $f > 0,143\rho$ (для П-образных поперечных сечений) и $f > 0,0025l_0$ (для всех остальных типов поперечных сечений). Здесь ρ – ядровое расстояние по направлению, противоположному искривлению (эксцентриситету), l_0 – свободная длина элемента.

Если в составном сжатом элементе стрела искривления отдельной ветви превышает $0,004l_0$, то в рабочую площадь элемента включается только площадь неискривленных частей. Сжатые элементы с местными искривлениями листов или уголков со стрелой, превышающей ρ , рассчитываются без учета искривленных частей сечения.

Уменьшение несущей способности составных сжатых стержней может быть вызвано также искривлением элементов соединительной решетки или соединительных планок.

Пробоины, вмятины и трещины должны учитываться при определении геометрических характеристик поперечных сечений элементов. В рабочую площадь сечения, ослабленного пробойной, вводится неповрежденная часть металла, начало которой принимается на расстоянии 3-5 мм от границы погнутых краев пробойны. При наличии трещин с засверленными концами рабочую площадь считают от края отверстия. Если сжатый или растянутый элемент ослаблен трещиной или пробойной, выходящей на его край, то учитывается также и эксцентricность передачи усилия на неповрежденную часть сечения.

При определении грузоподъемности изгибаемых балок пробойны, вмятины и трещины учитываются в зависимости от места их расположения. Повреждения в зоне 1 (рис. 8.17) незначительно влияют на несущую способность балки, и поэтому ими можно пренебречь. Если повреждение расположено в зоне 2, балку следует проклассифицировать в ослабленном сечении по нормальным напряжениям от изгибающего момента. В случае если балка повреждена в зоне 3, ослабленное сечение проверяют на действие поперечной силы.

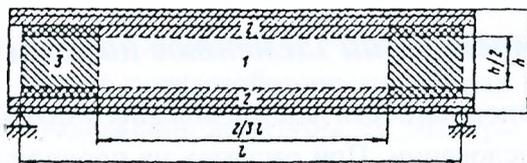


Рисунок 8.17 Разделение балки на зоны по степени опасности повреждений.

9 Испытание мостов

9.1 Общие сведения об испытаниях мостов

Общие сведения. Цель испытаний – выявить характер действительной работы моста или отдельных его элементов при воздействии эксплуатационной нагрузки. Действительная работа конструкции может существенно отличаться от расчетных предпосылок из-за несоответствия расчетных схем действительным условиям работы, идеализации свойств материалов, точности расчетов, отклонения действительных характеристик материала от расчетных и др. Кроме того, при длительной эксплуатации мостов в них могут протекать процессы, которые приводят к изменению условий работы конструкции, характера напряженного состояния и свойств материала. Эти несоответствия и изменения наиболее полно устанавливаются на основании испытаний. На основании результатов испытаний совершенствуются методы оценки грузоподъемности и надежности сооружений.

Мосты испытывают:

- при приемке новых сооружений в эксплуатацию с целью установления действительной грузоподъемности и регистрации характеристик: прогибов, перемещений опорных частей, периодов и амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний, напряженного состояния в наиболее характерных зонах и т.п. Эти данные сопоставляются с расчетными, а в дальнейшем – с результатами последующих испытаний для выявления изменений, происшедших в процессе эксплуатации сооружений;
- если необходимо уточнить расчеты грузоподъемности сложных систем эксплуатируемых мостов;
- после усиления, для оценки его эффективности;
- периодически, в процессе эксплуатации, для выяснения изменений в работе конструкции;
- в специальных случаях с целью накопления данных для уточнения расчетов мостовых конструкций, решения отдельных задач и проведения научно-исследовательских работ.

Испытания проводят по заранее разработанной программе и методике, в которых ясно сформулированы цель и задачи испытаний; подробно указаны очередность испытаний, способы измерения, виды нагрузок и места их установки или скорости движения, тип и размещение приборов и измерительной аппаратуры и их обслуживание, меры по технике безопасности и др.

Испытания мостов делятся на три основных этапа: подготовительный, собственно испытания, обработка и анализ результатов испытаний.

На первом – подготовительном этапе детально анализируется техническая документация сооружения, результаты его обследования, разрабатываются методики испытаний с учетом всех факторов, влияющих на достоверность результатов испытаний; заранее устанавливается порядок величин, характер изменения ожидаемых деформаций и перемещений (используют расчетные данные или результаты испытаний аналогичных конструкций) и на их основе выбирается аппаратура и приборы для испытаний. На выбор аппаратуры и приборов значительное влияние оказывают сроки и объем работ в процессе испытаний. Для сокраще-

ния времени испытаний и повышения качества измерений целесообразно использовать аппаратуру и приборы с автоматической регистрацией измеряемых величин. Нередко для проведения испытаний конструируют различные приспособления и приборы, удовлетворяющие требованиям испытаний данной конструкции. Эти приборы должны пройти метрологическую проверку.

Перед испытаниями разрабатывают детальную схему установки измерительных приборов и обосновывают их выбор. Для записи показаний приборов во время испытаний составляют специальные журналы. Сроки подачи и вид испытательных нагрузок на мост заранее согласовывают. При испытаниях эксплуатируемых мостов должны быть заблаговременно согласованы графики движения на время испытаний.

Второй этап испытаний выполняется непосредственно на мосту. Испытание моста – это комплекс работ, включающий в себя измерения характеристик напряженно-деформированного состояния сооружения или отдельных элементов, различных силовых и других воздействий, оценку качества материала конструкции. Испытания начинают с установки приборов и аппаратуры и проверки их работы. После этого измеряют различные характеристики: напряжения, деформации, перемещения и др. от испытательных нагрузок и воздействий. При этом размеры нагрузок и воздействий строго оценивают и регламентируют. В процессе испытания с целью исключения грубых ошибок в измерениях выборочно сравнивают расчетные характеристики с измеренными. Иногда для детального исследования качества материала конструкции из ее элементов берут пробы (вырезают куски материала), которые исследуют в лаборатории.

Третий этап – последний, проводится после завершения полевых и лабораторных испытаний. Результаты испытаний тщательно обрабатывают, анализируют, сравнивают с расчетными и дают заключение о грузоподъемности, надежности и условиях эксплуатации моста. На их основании составляют технический отчет, который передается в организации, связанные с эксплуатацией (а в отдельных случаях и проектированием) испытанного сооружения. Следует помнить, что испытания моста – весьма ответственная и дорогостоящая операция, для успешного выполнения которой требуются тщательная подготовка и высокая организованность, строгое соблюдение правил техники безопасности.

Виды испытаний. При испытаниях мостовых конструкций в основном измеряют или регистрируют: общие перемещения, характеризующие работу конструкций в целом (угловые и линейные перемещения пролетных строений или отдельных их элементов, опор и т. д.); местные деформации, по которым определяют напряженное состояние элементов конструкций; динамические характеристики сооружения в целом или отдельных его элементов.

В зависимости от места проведения различают натурные и лабораторные испытания. Натурные испытания мостов носят обычно кратковременный характер (исключая длительное наблюдение), включают в себя последующую обработку и анализ результатов испытаний, а в некоторых случаях – дополнительные лабораторные исследования. В процессе натуральных испытаний оценивается соответствие действительной работы конструкции принятой в расчете, несущая способность моста в целом или отдельных его элементов, определяются жесткость пролетных строений (иногда отдельных его элементов), характеризуемая общими прогибами от эксплуатационной или испытательной нагрузки, динамические и другие характеристики.

При лабораторных испытаниях оценивается усталостная прочность материала пролетных строений или соединений, исследуется на моделях характер напряженно-деформированного состояния отдельных узлов пролетных строений или конструкций в целом, особенности перераспределения усилий в элементах пролетных строений в зависимости от характера и типа нагрузки, определяются физико-механические характеристики материала, его химический состав, способы защиты от коррозии и т.д. При проведении лабораторных испытаний учитываются масштабные и силовые факторы, скорость нагружения, очередность приложения и снятия нагрузок, продолжительность их выдерживания и т. п.

По характеру внешнего силового воздействия на мосты различают два вида испытаний: статические и динамические. В процессе статических испытаний оценивается деформативно-напряженное состояние конструкции или отдельных ее элементов под воздействием статических нагрузок, а при динамических испытаниях – динамические характеристики пролетных строений (период, частота колебаний пролетных строений в целом или отдельных его элементов, собственные и вынужденные колебания, скорость затухания колебаний, динамический коэффициент и др.).

9.2 Методика проведения динамических испытаний

Основные динамические характеристики моста – частота и форма собственных и вынужденных колебаний, скорость затухания колебания и значения динамических коэффициентов подвижных нагрузок, обращающихся по мосту.

В подавляющем большинстве случаев динамические процессы в наибольшей степени возникают в пролетных строениях, опоры же, в особенности массивные, слабо реагируют на динамические воздействия. Это позволяет подвергать динамическим испытаниям только пролетные строения и лишь в исключительных случаях опоры.

Колебания пролетных строений могут быть вертикальными и горизонтальными. В автодорожных мостах обычно ограничиваются изучением вертикальных колебаний; необходимость в исследовании горизонтальных колебаний может возникнуть при небольшой горизонтальной жесткости моста, например моста с относительно малой шириной и высокими узкими опорами, а также висячих систем. Для возбуждения колебаний пролетное строение подвергают воздействию динамических нагрузок, которыми могут быть удар груза, нагрузка из движущихся автомобилей, тракторов, колонн людей, а также специальные вибрационные машины.

Ударная нагрузка создается сбрасыванием на проезжую часть с высоты 0,5-2,0 м груза в виде железобетонных плит, обрезков железобетонных свай, чугунных или стальных отливок весом от 300 до 2000 кг. Груз сбрасывают, поднимая его краном, копром или другими средствами. Чтобы собственные колебания крана не накладывались на колебания пролетного строения, краны ставят на проезжую часть жестко (на аутригеры). В месте падения груза укладывают песчаную подушку толщиной 10-20 см; подушка предохраняет проезжую часть от повреждений и исключает подсакивание груза после удара. Место удара совмещают с сечением, в котором возникают наибольшие прогибы – с серединой прилета, концом консоли и т.д. Груз сбрасывают несколько раз, постепенно увеличивая высоту сбрасывания. Испытания

ударной нагрузкой дает наиболее четкие диаграммы собственных колебаний пролетных строений.

Для исследования колебаний, возбуждаемых подвижной нагрузкой, по мосту пропускают груженные колесные или гусеничные машины с разной скоростью, начиная с 10-15 км/ч. Заезды проводят как одной машиной, так и колоннами с разными интервалами между машинами. В широких мостах заезды могут иметь разное число рядов машин. Для увеличения динамического воздействия и имитации неровности покрытия проезжей части в некоторых заездах нагрузку пропускают через порожек из доски толщиной 5-8 см, уложенной поперек движения. Для этого на проезжую часть укладывают пять досок толщиной 4 см, на взаимном расстоянии, равном базе автомашины, чтобы передняя и задняя оси одновременно 4 раза создали удар по пролетному строению и этим вызывали более интенсивное его колебание.

Значительное динамическое воздействие может оказать колонна людей, движущаяся по мосту организовано (в ногу) или неорганизованной толпой. Такие испытания проводят на пешеходных мостах, а также мостах с частотой собственных колебаний, близкой к частоте шага.

Для более глубокого и всестороннего изучения динамики мостов применяют испытания вибромашинами. Устройство вибромашины основано на использовании инерционных сил эксцентрично вращающихся масс: центробежные силы, возникающие при вращении масс, создают силовые воздействия на пролетное строение с периодами, зависящими от скорости вращения масс машины. Эти испытания позволяют исследовать выносливость пролетных строений, создать условия, близкие к резонансным и т.д. В настоящее время для автодорожных мостов этот вид испытаний не получил еще применения, т.к. необходимые для нужд эксплуатации автодорожных мостов динамические характеристики могут быть получены более простыми средствами.

Динамические испытания начинают с определения частот собственных колебаний. Для этого, кроме ударной нагрузки, обычно пользуются подвижными, записывая колебания пролетного строения после пропуска по нему машин (по возможности через порожек). Дальнейшими испытаниями подвижной нагрузкой возбуждают вынужденные колебания, по которым определяют динамические коэффициенты при различных скоростях движения. Как показывает опыт, вынужденные колебания пролетных строений обычно совпадают с собственными колебаниями машин.

Собственные колебания машины слагаются из колебаний надрессорных и подрессорных масс. Эти колебания, периодически изменяя давление на оси, вызывают вынужденные колебания пролетных строений. Для отечественных марок грузовых автомобилей период колебаний надрессорной массы лежит в пределах 0,3-0,7 с, а подрессорной – 0,10-0,16 с. Динамические воздействия гусеничных нагрузок вызываются ударами звеньев гусениц, ударами роликов и колебаниями надрессорной массы. Период ударов звеньев равен расстоянию между звеньями, деленному на скорость движения машины; удары роликов происходят в 3 раза реже ударов звеньев, период колебаний надрессорной массы составляет 0,3-0,33 с. Организованная колонна людей вызывает колебания с периодом 0,4-0,7 с, неорганизованная – до 1,5 с.

Для записи диаграмм колебаний на пролетном строении устанавливают самопишущие приборы которые располагают в середине пролетов, а также в других характерных сечениях,

где можно ожидать наибольших прогибов и напряжений. При установке нескольких приборов их включают в одну электрическую цепь отметок времени для последующего анализа и сравнения записанных диаграмм. Положение движущейся нагрузки (въезд на исследуемое пролетное строение, съезд с него, прохождение шарниров и пр.) желательно отмечать на диаграммах. Для этого на проезжей части устанавливают связанные с приборами-электропроводами нажимные контакты, через которые проходят машины, или же наблюдатели, пользуясь электрической связью, передают сигналы в нужные моменты на самопишущие приборы.

В процессе динамических испытаний ведут учет нагрузок, скоростей их движения, числа заездов и других данных, занося все в полевой журнал испытаний и непосредственно на диаграммы. В журналах и на диаграммах указывают порядковый номер испытаний, масштаб записи колебаний, а также краткие характеристики испытательной нагрузки.

9.3 Измерение перемещений и прогибов при динамических испытаниях

Общие сведения. При динамическом воздействии нагрузки (движение по мосту, воздействие ветра, ледохода и др.) деформированное состояние мостовых конструкций характеризуется сравнительно быстрым изменением деформаций, линейных и угловых перемещений. Динамические характеристики элементов моста определяются на основании функций изменения деформаций и перемещений во времени, которые получают при испытаниях (виброграммы, прогибограммы, осциллограммы, углограммы и т. п.).

Линейные перемещения во времени измеряют виброметрами, а угловые – торсиомерами. Амплитуды непосредственно при испытаниях измеряют амплитудомерами, частоты колебаний при различных скоростях движения – частотомерами.

Существуют два принципа измерения колебаний – кинематический и динамический. При кинематическом принципе измерения измерительное устройство жестко связано с внешней независимой неподвижной системой, поэтому перемещение колеблющегося элемента (точки) измеряют непосредственно.

Динамический принцип измерения применяют в том случае, если нельзя создать неподвижную систему. По этому принципу перемещения измеряют относительно условно неподвижной системы – массы, закрепленной на пружинах. Приборы и приспособления для динамических испытаний можно разделить на три группы: механические, электрические и оптические. В механических приборах запись изменения деформаций выполняется механическими устройствами. В электрических приборах изменения деформаций регистрируют датчики с записью на осциллографе или магнитографе.

Оптические приборы – это специальные устройства, преобразующие и регистрирующие наблюдаемые деформации и их изменения с использованием оптических методов.

При динамических испытаниях используют электрические и механические приборы.

Электрические приборы. Эти приборы представляют собой датчики-преобразователи, которые работают в сочетании с электроизмерительными устройствами. Они могут преобразовывать в соответствующие электрические величины взаимные перемещения отдельных элементов конструкций, фибровые деформации, скорости и ускорения перемещений отдельных точек конструкции и т.д. Для измерения некоторых динамических характеристик конструкций могут быть использованы тензорезисторы.

При динамических испытаниях мостов для измерения колебаний используют датчики-преобразователи в виде консольных балочек или стальных колец с наклеенными на них тензорезисторами. В качестве примера показаны схемы измерения вертикальных прогибов пролетного строения датчиками-преобразователями в виде консольной балочки и стальных колец (рис. 9.1 а, в) и включения тензорезисторов в электрический мост (рис. 9.1 б, г).

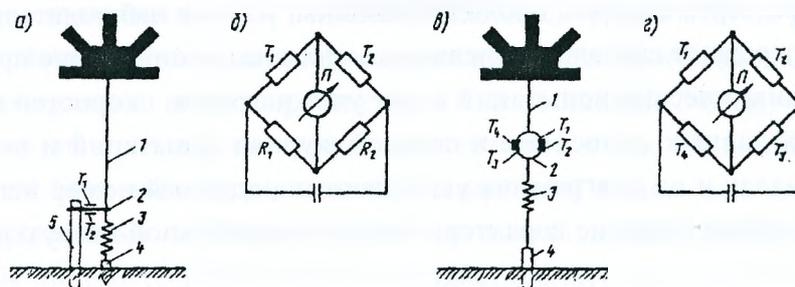


Рисунок 9.1 Схемы измерения прогибов с помощью датчиков-преобразователей: а, в – в виде консольной балочки кольцевого преобразователя; б, г – схемы включения тензорезисторов; 1 – проволоочная связь; 2 – консольная балочка стальное кольцо; 3 – пружина; 4 – анкерный кольшечек; 5 – свайка; T_1, T_2, T_3, T_4 – рабочие тензорезисторы; П – регистрирующий прибор (осциллограф).

Изменения прогиба (силы тока в диагонали электрического моста) при динамических испытаниях регистрируются осциллографами. Датчиками-преобразователями можно измерить перемещения и при статических испытаниях. В этом случае изменение силы тока в диагонали электрического моста можно измерить гальванометром. Масштаб записи определяется тарировкой. При тарировке надо учитывать характер передачи измеряемых перемещений на датчик-преобразователь.

В консольной балочке измеряемое перемещение полностью передается на конец консоли, а в кольцевых датчиках-преобразователях деформация кольца (изменение расстояния между точками закрепления кольца) составляет некоторую часть измеряемого перемещения, остальная воспринимается пружиной. Поэтому при тарировке датчиков-преобразователей типа консольной балочки цена деления устанавливается по действительному прогибу балки в месте закрепления связи, а кольцевых – по совместной деформации кольца и пружины. При использовании проволоочной связи учитывают влияние температурных деформаций. Датчиками-преобразователями можно регистрировать и угловые перемещения при статических и динамических испытаниях, используя рычажное устройство.

Универсальный прибор Гейгера. Прибор может работать с проволоочной или жесткой связью между колеблющейся и неподвижной точками (кинематический принцип измерения) и без нее (динамический принцип измерения). В первом случае прибор используется как деформограф: по записи, сделанной на ленте, можно определить деформации, амплитуды и частоты колебаний; во втором случае – как виброграф. Относительно неподвижная система в нем обеспечивается дополнительной массой (маятником) с пружиной. По записи, сделанной на ленте вибрографа, с достаточной точностью определяют амплитуды и частоты колебаний. При перестройке деформографа в виброграф заменяется приемная часть (регистрирующая остается).

Рассмотрим схему работы деформографа с проволочной связью (рис. 9.2).

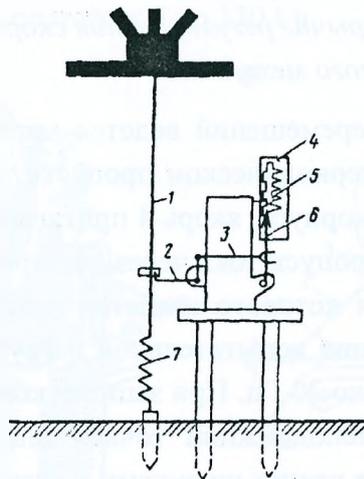


Рисунок 9.2 Схема работы деформографа: 1 – проволока; 2 – Г-образный рычаг; 3 – передаточная игла; 4 – бумажная лента; 5 – отметчик времени; 6 – перо-рычаг; 7 – пружина.

Изменения прогиба фермы через проволочку 1, натянутую пружиной 7, передаются на Г-образный рычаг 2 далее через передаточную иглу 3 на перо-рычаг 6, которое записывает их на ленте 4. Одновременно на ленте ведется запись времени специальным отметчиком 5. Регистрирующая часть прибора Гейгера (рис.9.3) состоит из корпуса 1. Внутри корпуса смонтирован механизм, который приводит в движение бумажную ленту шириной 50 мм. Скорость перемещения ленты можно регулировать от 0,2 до 10 м/мин. Лента при записи перематывается с барабана 8 через столик 5 на барабан 7. Запись выполняется пером-рычагом 3, которое захватом соединяется с передаточной иглой 9. Соединяя перо 3 с иглой 9 в различных точках по его длине, изменяют масштаб записи (увеличение) в 3, 6, 12 и 24 раза. Масштаб записи изменяется (увеличивается или уменьшается) при изменении соотношения плеч Г-образного передаточного рычага. Общий масштаб записи прибора изменяется от 0,5:1 до 72:1.

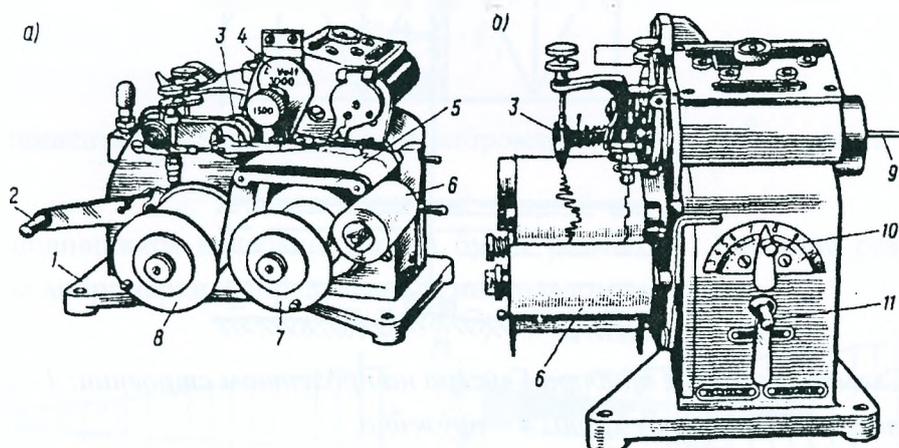


Рисунок 9.3 Универсальный прибор Гейгера: а – вид спереди; б – вид сбоку; 1 – корпус; 2 – рычаг завода лентопротяжного механизма; 3 – перо-рычаг; 4 – магнитный якорь маркировки времени; 5 – столик для записи; 6 – ролик промокательной

бумагой; 7 – намоточный барабан; 8 – смоточный барабан; 9 – передаточный стержень-игла; 10 – рычаг регулирования скорости подачи ленты; 11 – рычаг пуска лентопротяжного механизма.

Одновременно с записью перемещений ведется запись времени специальным пером, прикрепленным к якорю 4. При периодическом пропуске тока через катушку электромагнита, помещенную в верхней части корпуса, якорь 4 притягивается и перо вычерчивает ступенчатую линию на кромке ленты. Пропуск тока через электромагнит регулируется контактным прерывателем, период замыкания которого известен (обычно равен 1с). Прибор оснащен устройством для отметок положения испытательной нагрузки. Деформограф записывает перемещения с частотой колебаний до 20 Гц. При записях колебаний пролетных строений прибор можно устанавливать на «неподвижной точке» или непосредственно на пролетном строении. В первом случае прибор крепят шурупами к специальному столику под пролетным строением. Колеблющаяся и неподвижная точки соединяются проволокой: один конец проволоки крепится к пролетному строению, а другой через пружину – к земле. Пружина, поддерживая проволоку в постоянном натяжении, обеспечивает передачу колебаний узла фермы на Г-образный рычаг прибора. С Г-образным рычагом проволока соединяется «собачкой», прикрепляемой к ней винтами.

На пролетном строении (рис. 9.4) прибор закрепляется струбцинами или другими приспособлениями. Если под пролетным строением вода, то связь с неподвижной точкой (землей) осуществляется при помощи опущенного на дно груза не менее 10 кг. Верхний конец проволоки через пружину 4, расположенную выше прибора 3, крепится к пролетному строению. Проволока 2 ниже пружины во время испытаний остается неподвижной, а прибор относительно ее перемещается. При расположении прибора в «неподвижной точке» получается более качественная запись по сравнению с полученной при закреплении прибора на испытуемой конструкции, так как исключаются влияния колебания самого прибора.

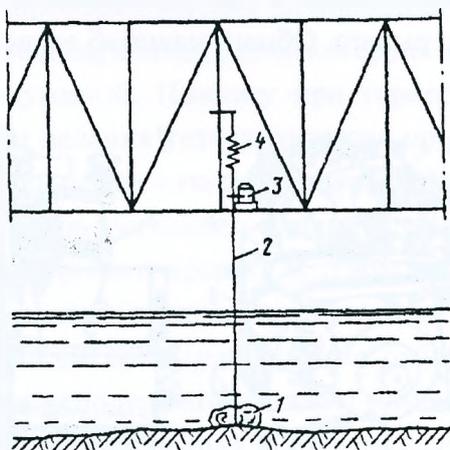


Рисунок 9.4 Схема установки прибора Гейгера на пролетном строении: 1 – груз; 2 – проволока; 3 – прибор Гейгера; 4 – пружина.

Если прибор используют в качестве вибрографа, к регистрирующей части прикрепляется маятник 5 с пружиной (рис.9.5). Маятник при колебании прибора из-за большой массы остается практически неподвижным. Перемещения корпуса прибора относительно маятника

передаются для записи через рычаги 3 и 4 и передаточную иглу 2 на перо 1. Вибрографом можно записывать колебания с частотой от 5 до 330 Гц.

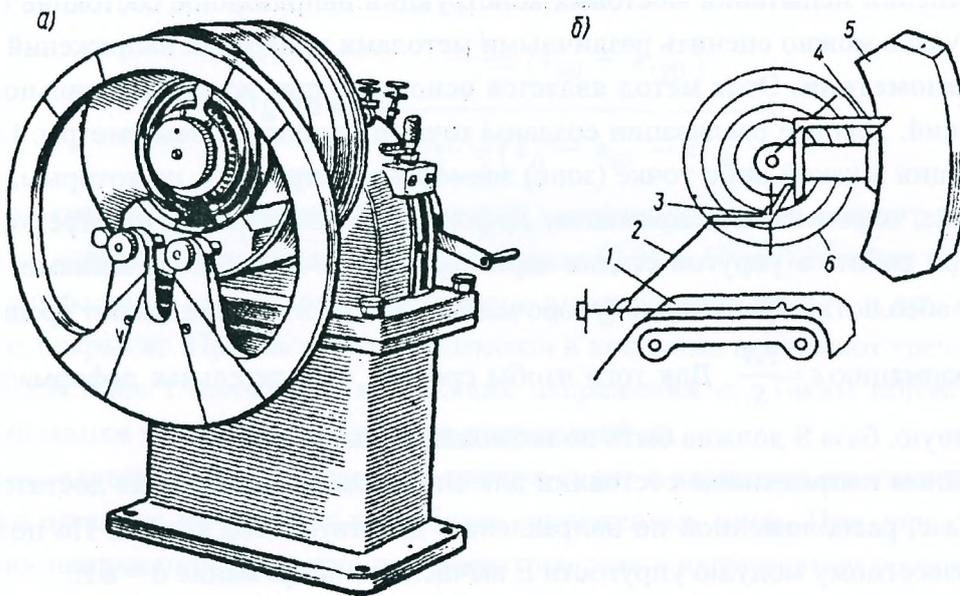


Рисунок 9.5 Виброграф Гейгера: а – общий вид; б – схема; 1 – перо-рычаг; 2 – передаточный стержень-игла; 3, 4 – рычаги; 5 – маятник; 6 – пружина.

Колебания можно записать ручным вибрографом ВР-1. Прибор при записи колебаний держат в руках, прижимая шток к колеблющейся конструкции. Приборы этого типа позволяют записывать колебания с частотой от 5 до 300 Гц.

Для ускоренной приближенной оценки размаха колебаний установившегося режима можно использовать вибромарки. Вибромарку вычерчивают в виде острого клина (рис.9.6.а) и наклеивают на конструкцию так, чтобы основание клина располагалось по направлению колебаний. Наблюдателю, находящемуся вне объекта, при 500 колебаниях в минуту и выше вибромарка кажется раздвоенной, четко видны крайние положения вибромарки и темный клин между ними (рис.9.6.). Размах колебаний

$$C = \frac{h}{L} \cdot \ell,$$

где $\frac{h}{L}$ – отношение основания к высоте вибромарки $\frac{h}{L} \approx \frac{1}{10}$; ℓ – высота темного клина.

При неустановившихся колебаниях клин будет размытый. Хорошие результаты дает фотографирование вибромарки с определенным интервалом выдержек.

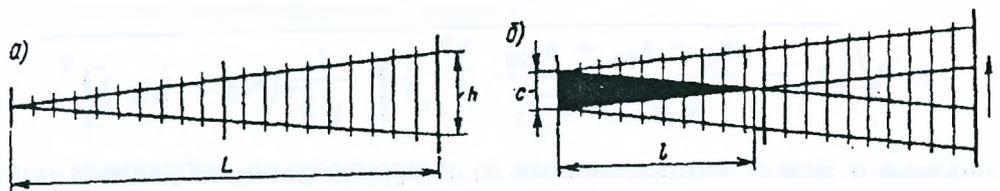


Рисунок 9.6 Вибромарка: а – в состоянии покоя; б – при вибрации.

9.4. Методы измерения напряжений

При проведении испытаний мостовых конструкций напряженное состояние отдельных элементов или узлов можно оценить различными методами измерения напряжений.

Метод тензометрии. Этот метод является основным при экспериментальном определении напряжений. Для его реализации созданы точные приборы – тензометры. Прибор измеряет деформации в какой-либо точке (зоне) элемента конструкций, по которым, используя зависимость Гука, определяют напряжения. Деформации, измеряемые на отрезке, называемом базой S , при работе в упругой стадии характеризуются малыми значениями. Тензометрами измеряют абсолютное удлинение (укорочение) ΔS и по ним определяют среднюю относительную деформацию $\varepsilon = \frac{\Delta S}{S}$. Для того чтобы средняя относительная деформация точнее отражала истинную, база S должна быть по возможности меньшей.

При линейном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерить ΔS – на базе, расположенной по направлению действующего усилия. По полученному значению ε и известному модулю упругости E вычисляют напряжение $\sigma = \varepsilon E$.

В случае плоского напряженного состояния в данной точке измеряют деформации в двух или трех направлениях.

Если известны направления главных напряжений σ_1 , и σ_2 , то достаточно провести измерения на базах, расположенных по направлению ε_1 и ε_2 . По измеренным деформациям определяют главные относительные деформации ε_1 и ε_2 и вычисляют главные напряжения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2 &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1) ; \\ \sigma_1 &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) ; \end{aligned} \right\}$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Если направления главных напряжений неизвестны, то нужно получить данные о деформациях в трех направлениях. Обычно одно из направлений выбирают произвольно, а два других – под углами 45° и 90° или 60° и 120° к нему. Относительные деформации обозначают соответственно $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$ или $\varepsilon_0, \varepsilon_{60}, \varepsilon_{120}$. По измеренным в трех направлениях деформациям можно определить главные относительные деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1,2} &= \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2} ; \\ \varepsilon_{1,2} &= \frac{1}{3} (\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}) \pm \\ &\pm \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}) \right]^2} . \end{aligned}$$

Угол наклона α между направлениями σ_1 и произвольно выбранным определяют по формулам:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{\varepsilon_n - \varepsilon_{90}};$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\frac{l}{\sqrt{3}}(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{\varepsilon_0 - \frac{l}{3}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}.$$

Метод хрупких покрытий. Суть метода хрупких покрытий состоит в следующем. На поверхность исследуемого элемента тонким слоем (0,05-0,10 мм) наносят специальный лак, твердые канифольные смолы, оксидированную алюминиевую фольгу и др., которые образуют хрупкое покрытие. При нагружении элемента в покрытии возникают трещины, перпендикулярные действию главных растягивающих напряжений σ_1 . Таким образом, полученные трещины являются траекториями главных напряжений σ_2 .

По последовательности появления трещин судят о характере изменения напряженного состояния в процессе нагружения и наиболее напряженных зонах. При определении главных сжимающих напряжений покрытие на элемент наносят в нагруженном состоянии. После высыхания покрытия элемент разгружают. В процессе разгрузки в покрытии появляются трещины, перпендикулярные действию главных сжимающих напряжений, возникающих при нагружении элемента. Трещины совпадают с траекторией σ_1 . Следовательно, по трещинам в покрытии можно построить траектории главных напряжений. Главные напряжения определяют непосредственным тензометрированием или по тензочувствительности покрытия – относительному удлинению $\varepsilon_{тр}$, при котором в нем образуется трещина. При непосредственном тензометрировании (после испытаний на образование трещин в покрытии) измеряют главные напряжения в наиболее характерных точках. Этот способ дает достаточно надежные результаты по значениям напряжений и позволяет выявить общую картину распределения главных напряжений.

Точность определения главных напряжений по тензочувствительности покрытия зависит от качества покрытия, значений и стабильности $\varepsilon_{тр}$. У применяемых в настоящее время покрытий $\varepsilon_{тр} = 3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-4}$, что соответствует напряжению в стали 6-60 МПа. Определяют $\varepsilon_{тр}$ экспериментально: тарировочную консольную балочку или специальный элемент с покрытием нагружают до появления первой трещины; нагрузку P_T соответствующую появлению трещины, фиксируют. На основании этих испытаний определяют $\varepsilon_{тр}$.

При испытании на консольной балочке

$$\varepsilon_{тр} = \frac{6 P_T l}{E_T b h^2};$$

при испытании на растягиваемом элементе

$$\varepsilon_{тр} = \frac{P_T}{E_T F},$$

где l – расстояние от точки приложения нагрузки на консоли до трещины; E – модуль упругости материала, тарировочного образца; b, h – ширина и высота сечения консольной балочки в зоне появления трещины; F – площадь поперечного сечения.

Элементы с покрытиями при испытаниях нагружают постепенно, давая выдержку после увеличения нагрузки на определенную ступень, значение которой составляет не более 10 % максимальной испытательной нагрузки. Фиксируют значение нагрузки $P_{тр}$, при которой появилась трещина в покрытии, т.е. деформация в этой зоне достигла $\epsilon_{тр}$, и фотографируют характер расположения трещин с указанием последовательности их развития (рис. 9.7).



Рисунок 9.7 Трещины в лаковом покрытии сжатой зоны балки, полученные методом разгрузки.

В упругой стадии работы относительная деформация в точках на поверхности испытуемого элемента под соответствующими трещинами в покрытии от произвольной нагрузки P

$$\epsilon_{\max} = \frac{P}{P_{тр}} \epsilon_{тр}$$

При линейном напряженном состоянии напряжение от нагрузки P в этих точках

$$\sigma = \frac{P}{P_{тр}} \epsilon_{тр} E$$

При плоском напряженном состоянии нужно учитывать влияние σ_2 на относительную деформацию ϵ_{\max} . Точность оценки напряжений по этому методу сравнительно низка. Погрешности могут достигать 10-15 %.

Поляризационно-оптический метод. Среди экспериментальных методов исследования сложного напряженного состояния поляризационно-оптический метод является основным. Этот метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, целлулоид, материалы, полученные на основе эпоксидных смол и др.) приобретать под действием напряжений (деформаций) способность двойного лучепреломления, величину которого измеряют оптическими приборами при просвечивании модели поляризованным светом. Свойство поляризации и свойство двойного лучепреломления – оптические явления, лежащие в основе поляризационно-оптического метода.

Для исследования напряженного состояния из оптически активного материала изготовляют модель узла или детали конструкции, которую просвечивают в специальной установке – полярископе (рис. 9.8).

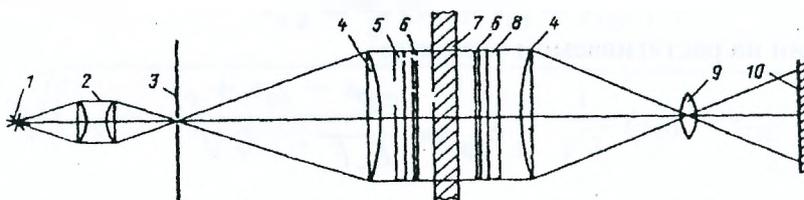


Рисунок 9.8 Схема полярископа: 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – линзы; 5 – поляризатор; 6 – слюдяные пластинки; 7 – исследуемая модель; 8 – анализатор; 9 – линза камеры; 10 – экран.

Просвечивают пучком плоскополяризованного света, в котором световые колебания, в отличие от пучка естественного света, происходят в одной плоскости.

Для поляризации естественный луч света (рис.9.10) пропускают через поляризатор, например призму Николя, изготовленную из кристаллов исландского шпата, или специальные поляриды. Кроме поляризатора, в полярископе есть анализатор, аналогичный по конструкции поляризатору.

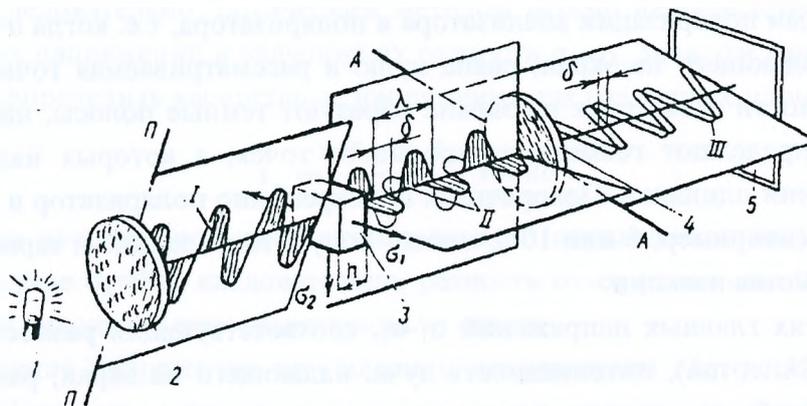


Рисунок 9.10 Схема прохождения луча света в полярископе: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – модель; 4 – анализатор; 5 – экран; I – плоскополяризованный луч; II – плоскополяризованные лучи в плоскостях действия главных напряжений; III – плоскополяризованный луч, выходящий из анализатора.

В зависимости от взаимного расположения плоскостей поляризации поляризатора П–П и анализатора А–А освещенность экрана, расположенного за анализатором, будет меняться: при их совпадении – освещенность максимальная; при взаимно перпендикулярном расположении прошедший сквозь поляризатор луч будет полностью погашен анализатором. Такое явление наблюдается в том случае, если между поляризатором и анализатором нет модели или она есть, но не нагружена. Если модель нагрузить в ее плоскости, то плоскополяризованный луч, проходя сквозь нее, из-за двойного преломления разложится на два луча, плоскости колебания у которых взаимно перпендикулярны и совпадают с направлением главных напряжений. Оптические свойства материала зависят от значений главных напряжений, поэтому скорости лучей и время прохождения их через модель различны. Экспериментально установлено: разность скоростей лучей пропорциональна разности главных напряжений. Закон фотоупругости в количественном отношении выражается уравнением

$$\delta = C_{\lambda} h (\sigma_1 - \sigma_2),$$

где δ – разность хода лучей; C_{λ} – оптическая постоянная, зависящая от длины волны монохроматического луча от источника света и от оптических свойств материала модели; h – толщина модели.

Выходящие из модели два луча с разностью хода δ не могут интерферировать (складываться в соответствующие им колебания). Проходя через анализатор, они поляризуются и интерферируются. При этом амплитуда суммарных колебаний зависит от разности хода. Интенсивность луча пропорциональна квадрату амплитуды. Интенсивность луча, вышедшего из анализатора

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi \delta}{\lambda},$$

где I_0 – интенсивность луча, падающего на модель; α – угол поворота плоскостей поляризации анализатора А-А и поляризатора П-П, которые взаимно перпендикулярны относительно направлений главных напряжений; λ – длина волны.

Из уравнения видно, что при совпадении направлений главных напряжений в данной точке с плоскостями поляризации анализатора и поляризатора, т.е. когда $\alpha=0, \pi/2, \pi, \dots$, интенсивность луча, падающего на экран, равна нулю и рассматриваемая точка на экране будет темной. Совокупности этих точек на экране образуют темные полосы, называемые изоклинами, которые определяют геометрическое место точек, в которых наклон направлений главных напряжений одинаков. Поворачивая одновременно поляризатор и анализатор на определенный угол (например, 5 или 10°), можно получить на экране и зарисовать или сфотографировать семейства изоклин.

При разностях главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$, соответствующих разностям хода лучей δ , кратным λ ($\delta = \lambda, 2\lambda, \dots, m\lambda$), интенсивность луча, падающего на экран, равна нулю. Это состояние на экране будет отмечено сливающимися в темные полосы. Условие затухания $\sigma = m \cdot \lambda$ не может быть выполнено сразу для всех составляющих белого цвета, поэтому полосы получаются цветными. Каждой полосе будет соответствовать свое целое число m – порядок полосы. Эти полосы называются изохромами. Изохромы фотографируют или зарисовывают с экрана. Каждая полоса соответствует постоянному значению $\sigma_1 - \sigma_2$, разность главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0$, вызывающая разность хода лучей, равную длине волны, называется ценой полосы.

Значение σ_0 определяют по формуле

$$\sigma_0 = \frac{\lambda}{C_\lambda h}$$

Разность главных напряжений для полосы порядка m

$$\sigma_1 - \sigma_2 = m\sigma_0.$$

Цену полосы σ_0 определяют экспериментально. Для этого в моделях создаются напряжения известных значений и ведутся наблюдения за вызванной ими картиной полос. На рис. 9.11 показана фотография изохром, полученных при загрузке сосредоточенной силой модели пролетного строения коробчатого сечения.

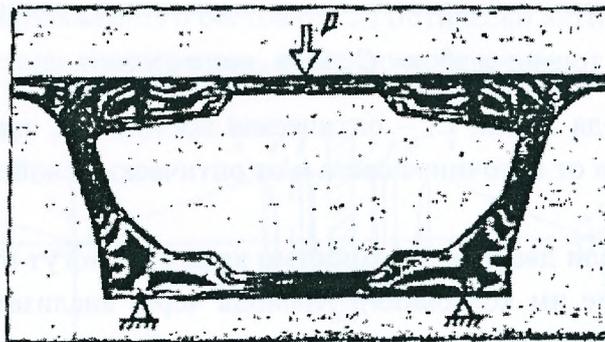


Рисунок 9.11 Изохром в модели коробчатого пролетного строения при загрузке сосредоточенной силой P .

Для отделения на экране изохром от изоклин за поляризатором и анализатором ставят скрещенные слюдяные пластинки в «четверть волны». Плоскости поляризации пластинок располагают под углом 45° к плоскостям поляризации анализатора и поляризатора, а толщину пластинок подбирают так, чтобы плоскополяризованный луч с длиной волны λ раскладывался пластинкой на два луча с разностью хода $\lambda/4$. Тогда возникает так называемая круговая поляризация, вызывающая быструю смену изображению изоклин, практически незаметных на экране. Следовательно, оптическим методом можно непосредственно получать направления главных напряжений и значение их разности $\sigma_1 - \sigma_2$. Зная эти данные, в любой точке модели можно определить касательные напряжения для различных площадок

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha.$$

При линейно напряженном состоянии задача по определению напряжений решается просто. В этом случае $\sigma_2 = 0$ и, следовательно, разность $\sigma_1 - \sigma_2$ равна самому напряжению σ_1 , значение которого находится непосредственно из опыта.

Для определения напряжений при плоском напряженном состоянии существуют различные методы. Например, один из экспериментальных методов основан на измерении изменения толщины модели при ее нагружении. На основании обобщенного закона Гука относительная поперечная деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2),$$

откуда

$$\sigma_1 + \sigma_2 = - \frac{\Delta h E}{h \mu},$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона материала модели; Δh – изменение толщины модели.

Изменение толщины модели в интересующих точках можно измерить различными приборами, например, индикаторами. Зная сумму и разность главных напряжений, определяют каждое из них. Из числа вычислительных методов определения главных напряжений наиболее удобны методы численного интегрирования вдоль траектории главного направления или вдоль прямых, проведенных параллельно координатным осям.

Важный момент – переход от модели к элементу. Из теории упругости известно, что распределение напряжений в элементе, находящемся в плоском напряженном состоянии, не зависит от модуля упругости и коэффициента Пуассона. Поэтому в геометрически подобных моделях и элементах, выполненных из разных материалов и имеющих подобие в нагрузке, закон распределения деформаций и напряжений будет одинаков. Формула перехода от напряжений в модели σ_m , к напряжениям в элементе имеет вид

$$\sigma = \frac{h_m}{h_s} \cdot \frac{S_m}{S_s} \cdot \frac{P_m}{P_s} \cdot \sigma_m,$$

где $\frac{h_m}{h_s} \cdot \frac{S_m}{S_s} \cdot \frac{P_m}{P_s}$ – отношения: толщин модели и элемента, линейных размеров контура

модели и элемента, нагрузок на элемент и модель.

Поляризационно-оптический метод широко применяется при исследовании объемно-напряженных деталей. При этом используют «замораживание» или составные модели. «Замораживание» основано на свойствах некоторых материалов (синтетических смол и др.) сохранять оптическую анизотропию, вызванную деформацией, благодаря специальной термической обработке («замораживанию»). Процесс исследования заключается в следующем. Загружают нагретую объемную модель из оптически активного материала, затем, не снимая нагрузки, охлаждают в термостате при определенном режиме. После этого модель разрезают алмазными фрезами на тонкие пластинки и строго фиксируют их положение в модели. Обычно пластинки из одной зоны вырезают таким образом, чтобы они располагались в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Эти пластинки исследуют в полярископе изложенным ранее способом. Получив данные о напряженном состоянии в пластинках, определяют компоненты напряжений в пространственной модели и затем переходят к элементу. При переходе от модели к элементу возникают трудности, связанные с тем, что материалы модели и элемента имеют разные коэффициенты Пуассона. Опыт показал: по этой причине погрешность в оценке значений главных напряжений может составлять до 15 %.

Поляризационно-оптический метод начали применять для исследования напряженного состояния в поверхностных слоях деталей и элементов, изготовленных из обычных материалов – металла, бетона и др. Исследуемый участок элемента покрывают тонким слоем оптически активного материала – фотоупругим покрытием. Покрытие, изготовленное на основе эпоксидных смол, воспроизводит деформации верхнего слоя элемента при его нагружении.

При облучении покрытия поляризованным пучком света, который отражается от поверхности элемента, получается картина полос, как при просвечивании прозрачных моделей. Этим методом можно исследовать напряженное состояние натуральных элементов конструкций в лаборатории и непосредственно в сооружениях. Покрытия на конструкции сохраняются длительное время, что дает возможность наблюдать за изменениями в работе конструкций.

Метод муаровых полос. Этим методом получают картину распределения перемещений и деформаций сразу на всей поверхности модели или элемента конструкции. Суть метода: на поверхность конструкции до ее нагружения наносят сетку линий с частотой в 5-100 линий на 1 мм. После нагружения конструкции внешней нагрузкой сетка деформируется. Совмещая изображения сетки до и после деформации, получают картину деформаций. Деформированную сетку наблюдают через эталонную или проектируют на экран, где образуется, так называемый, муаровый эффект. Анализируя картину муаровых полос, можно получить качественную и количественную характеристики распределения перемещений и деформаций. Преимущество метода муаровых полос – этот метод можно применять при значительных деформациях, независимо от того, носят они упругий или упруго-пластический характер.

Голографический метод. Голография – метод получения изображения объекта, основанный на интерференции волн, позволяет исследовать форму, деформации и перемещения пространственных объектов. На фотопластинку одновременно с «сигнальной» волной, рассеянной объектом, направляют «опорную» волну от того же источника света – возникает голограмма, т.е. зафиксированная на фотопластинке интерференционная картина. Если голограмму облучить лучом лазера в той же оптической системе, то возникает пространственное

изображение предмета. Совмещение голограмм объекта исследований до и после загрузки порождает картину полос, по которой можно судить о деформированном состоянии объекта. В настоящее время этот метод интенсивно развивается.

Магнитометрический метод. Этот метод основан на использовании явления магнитной анизотропии (магнитострикции и магнитоупругости), возникающей в материале конструкции при изменении напряженного состояния. Эффект магнитострикции заключается в изменении формы и размеров ферромагнитных материалов при их намагничивании. Сущность эффекта магнитоупругости состоит в изменении намагниченности ферромагнитного материала в зависимости от действующих механических напряжений. Зависимость между напряжением σ , магнитной проницаемостью μ , магнитной индукцией B_s и удельным значением магнитострикции λ_s имеет вид

$$\sigma = \frac{\Delta\mu}{\mu} \cdot \frac{B_s^2}{2\mu\lambda_s},$$

где $\Delta\mu$ – приращение магнитной проницаемости в результате действия механических напряжений σ .

Магнитометрическим методом можно измерить напряжения в элементах конструкций из неферромагнитных материалов (бетон, дерево, пластмассы и др.). С этой целью на поверхность испытуемого элемента в зонах измерения напряжений наклеивают тонкие пластинки из ферромагнетика. От измеренных деформаций в пластинках переходят к напряжениям в испытуемом элементе с учетом разницы в упругих постоянных.

Для оценки напряженного состояния металла по его магнитным характеристикам можно использовать «магнитные метки»: внешним магнитным полем наводится остаточная намагниченность в отдельные локализованные зоны исследуемого металла. При изменении его напряженного состояния меняется намагниченность «меток» – своеобразных индикаторов механических напряжений. Наведение и индикация намагниченности «меток» выполняется переносными приборами.

9.5 Измерение напряжений механическими, струнными и электрическими тензомерами

Механические тензомеры. При испытаниях статическими нагрузками напряжения (деформации) нередко измеряют механическими тензомерами. Наиболее широко применяют двухрычажные тензомеры различных конструкций (Гугенбергера, Аистова и др.) с простой кинематической схемой (рис.9.12).

На жесткой станине с левой стороны расположены острая неподвижная ножка, а с правой – треугольный вырез для опирания призмы, которая является малым плечом рычага первого рода 4. Верхняя часть этого рычага с плечом А шарнирно при помощи коромысла 2 соединена с другим рычагом (стрелкой) второго рода 3, прикрепленным шарнирно к станине 1. Расстояние между неподвижной ножкой и подвижной призмой – база S. При установке острая ножка и призма струбциной прижимаются и врезаются в поверхность элемента. Нижний конец рычага 4 (призма) при деформации элемента переместится на ΔS , что вызовет перемещение n нижнего конца рычага 3 (стрелки), которое определяется по шкале с миллиметро-

выми делениями. Отношение $\frac{n}{\Delta S} = m$ называется передаточным числом, или коэффициентом увеличения тензометра. Значение m для различных моделей прибора составляет от 800 до 2000. На шкале обычно нанесено 40-50 миллиметровых делений. Следовательно, максимальное значение ΔS , которое может быть измерено без перестановки стрелки, приблизительно равно, $\frac{50}{m}$ мм.

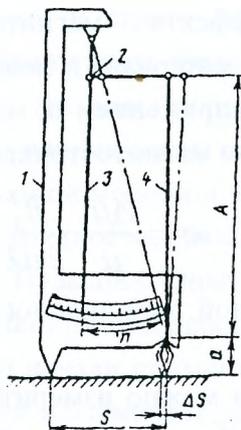


Рисунок 9.12 Кинематическая схема двухрычажного тензометра: 1 – станина; 2 – коромысло; 3 – рычаг (стрелка) второго рода; 4 – рычаг первого рода; a – малое плечо рычага 4; A – большое плечо рычага 4; n – перемещение стрелки по шкале; S – база тензометра; ΔS – измеряемая деформация.

Для установки тензометра пользуются различного рода струбцинами и приспособлениями. От качества установки тензометра зависит его работа. Тензометр должен быть прижат к испытываемой поверхности силой 20-30 Н. Чрезмерное прижатие прибора может привести к выкрашиванию ножей призмы и ножек и другим повреждениям, слабое – к проскальзыванию. Правильность установки тензометра проверяют, отклоняя стрелку прибора на 2-4 деления в сторону: если прибор установлен правильно, то стрелка не «ползет» по шкале, а после нескольких колебаний возвращается в первоначальное положение. Измеряемую деформацию (напряжение) определяют по разности отсчетов по шкале прибора до и после нагружения конструкции (элемента). Механические тензометры благодаря простоте их конструкции, малой массе, сравнительно высокой точности и надежности измерений, а также возможности быстрой подготовки к измерениям удобны при статических испытаниях мостов.

Однако тензометры со стрелками не лишены недостатков: ограничена возможность измерения больших деформаций без перестановки стрелки, сложно работать на открытом воздухе в ветреную погоду, значительный «мертвый» ход в шарнирных соединениях. Таких недостатков практически нет в тензометрах ТА-2 с электроконтактом и переменной базой измерения.

Струнные тензометры. Принцип работы этих приборов основан на зависимости между частотой собственных колебаний струны и ее натяжением

$$\omega = \frac{1}{2S} \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho}}; \quad \sigma_c = 4S^2 \rho \omega^2$$

где ω – частота собственных колебаний струны; S – длина струны; σ_c – напряжение в струне; ρ – постоянная, зависящая от материала струны (для стали $\rho=8 \cdot 10^7 \text{ Нс}^2/\text{мм}^4$).

Струна 1 (рис. 9.13) концами жестко закреплена на испытуемом элементе в двух точках, расположенных на расстоянии S (база).

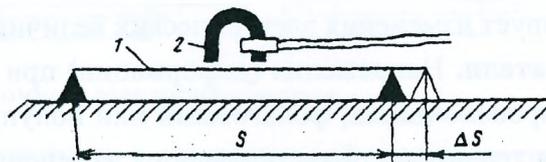


Рисунок 9.13 Принципиальная схема рабочей части струнного тензомера: 1 – струна; 2 – электромагнит.

В начальном состоянии струна имеет натяжение σ_{c1} с частотой собственных колебаний ω_1 . При изменении расстояния между точками закрепления на ΔS эти характеристики изменятся и примут значение σ_{c2} и ω_2 . Измерив частоты собственных колебаний ω_1 и ω_2 , можно определить относительные деформации струны

$$\epsilon_c = \frac{4S^2 \rho}{E_c} (\omega_2^2 - \omega_1^2),$$

где E_c – модуль упругости струны.

При переходе к относительной деформации материала конструкции ϵ_K учитывают удаление струны от поверхности элемента. В случае осевого растяжения или сжатия $\epsilon_c = \epsilon_K$ при изгибе $\epsilon_c \neq \epsilon_K$. Колебания струны возбуждаются электромагнитом 2 соединенным с генератором.

Датчик (струна с возбудителем колебаний) в струнных тензомерах может удаляться на значительные расстояния от измерительной установки. Частота колебаний струны – устойчивая характеристика, на точность регистрации которой не влияют изменение напряжений в электрических цепях, различные наводки и т.д. Эти особенности наряду с простотой устройства позволяют использовать струнные тензометры для измерений, в том числе в труднодоступных местах (например, в толще бетона, в подошвах фундаментов и др.) и в течение длительного времени.

Струнные тензометры в качестве измерительного устройства применяют в других приборах, например месдозах. В этих приборах струнный тензометр измеряет деформацию корпуса месдозы, по которой определяют внешнее давление. Зависимость между давлением среды и частотой колебания струны в таких приборах устанавливают тарировкой.

Электрические тензометры. Эти приборы широко применяются при исследованиях напряженного состояния элементов. Принцип работы этих приборов основан на использовании зависимости между деформацией и электрическими величинами: омическим сопротивлением, емкостью, индуктивностью и др. Деформация в датчике-преобразователе вызывает изменение одной из электрических величин, которая измеряется с высокой точностью; по изменению электрической величины определяют размеры деформаций. Это позволяет регистрировать и измерять быстро изменяющиеся во времени механические деформации с высокой точностью.

Электрический тензометр состоит из двух основных частей: датчика-преобразователя и электроизмерительного устройства. Датчики – это приборы, преобразующие измеряемую деформацию в одну из электрических величин. При испытаниях мостов часто применяют тензорезисторы, емкостные и индукционные датчики. Электроизмерительное устройство измеряет, а иногда и регистрирует изменения электрических величин.

Датчики-преобразователи. Напряжения (деформации) при испытаниях мостов и конструкций часто измеряют проволочными, фольговыми или полупроводниковыми тензорезисторами. Принцип действия тензорезисторов основан на изменении омического сопротивления R проводников и полупроводников при их деформации. Важная характеристика тензорезистора – коэффициент тензочувствительности η ,

$$\eta = \frac{\Delta R : R}{\epsilon},$$

где R – номинальное сопротивление тензорезистора, $R = \rho \cdot l / f$; ρ – удельное сопротивление материала тензорезистора; l – начальная длина деформируемого участка проводника; f – площадь сечения проводника; ΔR – изменение сопротивления тензорезистора; ϵ – относительная деформация, $\epsilon = \Delta S / S$; S – база измерения; ΔS – изменение длины базы измерения.

Коэффициент тензочувствительности зависит от свойств материала, из которого изготовлен тензорезистор, и технологии его изготовления. Тензорезисторами фактически измеряется относительное удлинение ϵ , а не изменение длины базы ΔS , как у тензометров.

Широкому распространению тензорезисторов способствуют малые размеры и масса, возможность измерения статических и динамических деформаций, простота установки.

Проволочные тензорезисторы состоят из одной или нескольких петель из тонкой, с высоким омическим сопротивлением проволоки 1 диаметром 0,02-0,05 мм, наклеенных на изолирующую подкладку из бумажной или пленочной основы 2 (рис.9.14а). Для датчиков применяют проволоку из сплавов константана (60 %Cu+40 %Ni) нихрома (80 % Ni+20 %Cu) и др., обладающих высоким омическим сопротивлением. К концам проволочных петель припаяны медные проводники 3 диаметром 0,1-0,2 мм или полоски медной фольги (выводы) сечением 0,05x0,8 мм длиной 20-30 мм. Пленочная основа состоит из бакелитового лака или клея БФ-2 и специальных композиций. Тензорезисторы, изготовленные на пленке из клея БФ, работоспособны при температурах от -40 до +70° С, на бакелитовом лаке – до 200° С. Измерения при более высоких температурах выполняют датчиками, приклеенными на клеях В-58, ВН-15 (до 400° С) или цементах Б-56, ВН-12 (до 800° С) и др.

Основные характеристики проволочных тензорезисторов: база измерения S , омическое сопротивление R , чувствительность m . База проволочных тензорезисторов составляет от 2 до 150 мм с омическим сопротивлением от 50 до 2000 Ом. Наиболее распространены тензорезисторы с базами 5-50 мм и сопротивлением 50-400 Ом. Коэффициент тензочувствительности проволочных тензорезисторов $\eta=2\div 3,5$ (для константановых $\eta=2,0\div 2,1$, нихромовых $\eta=3,5$).

Линейный характер зависимости $\Delta R=f(\epsilon)$, например, для константановой проволоки, практически сохраняется до $\epsilon=0,01$. Следовательно, тензорезисторами из этой проволоки можно измерять деформации в стальных элементах при работе их и за пределами упругости. Закругления в проволочных тензорезисторах делает их чувствительными к поперечным де-

формациям, что влияет на точность измерений, особенно с уменьшением базы тензорезистора.

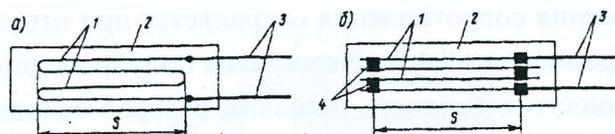


Рисунок 9.14. Схема проволочных тензорезисторов.

Беспетлевые тензорезисторы с низкоомными медными переключками (рис.9.14.б) не имеют этого недостатка. Они не реагируют на поперечную деформацию, базу их можно уменьшить до 2-3 мм.

Иногда используют тензорезисторы без изолирующей подкладки – со свободным подвесом проволоки. Основное их достоинство – большая стабильность показаний при длительных измерениях. Но из-за сложности изготовления, требующего определенных навыков, такие тензорезисторы применяют редко.

Эластичные преобразователи – разновидность проволочных тензорезисторов. Они состоят из резинового или пластикового капилляра с внутренним диаметром 0,1-0,5 мм, заполненного ртутью или электролитом, снабжены проволочными выводами. Преобразователи прикрепляются к элементам конструкции скобами или манжетами. Положительная особенность таких преобразователей – можно измерять весьма большие деформации материалов (ϵ до 40–50%).

Фольговые тензорезисторы – модификация проволочных тензорезисторов. В отличие от последних их решетка состоит из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4-12 мкм, которые наносят на лаковую основу. Благодаря большей площади соприкосновения полосы фольгового тензорезистора с объектом измерения его теплоотдача значительно выше, чем у проволочного, что позволяет увеличить силу тока, протекающего через тензорезистор (до 0,2 А), а, следовательно, повысить его чувствительность. Другое преимущество фольговых тензорезисторов – можно изготавливать решетку любого рисунка, наиболее удовлетворяющего условиям измерений фотолитографским способом. Прямоугольные решетки используют для измерения линейных деформаций, розеточные – при плоском напряженном состоянии, мембранные – для наклейки на мембраны. Тензочувствительность фольговых тензорезисторов примерно такая же, как у проволочных ($\eta \approx 2,0$); верхний предел измерения относительных деформаций $\epsilon = 0,3$ %, температурный диапазон работоспособности от -40 до $+70^\circ \text{C}$; номинальное сопротивление 50-400 Ом.

Применяются полупроводниковые тензорезисторы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с проволочными и фольговыми тензорезисторами: в 50-60 раз больше чувствительность, высокий уровень выходного сигнала, исключающий иногда применение сложных и дорогих усилителей, небольшие габариты. Сопротивление и тензочувствительность полупроводниковых тензорезисторов при одних и тех же размерах может изменяться в большом диапазоне в зависимости от технологии изготовления (сопротивление от 100 Ом до 50 кОм, коэффициент тензочувствительности $\eta = 100-200$).

Полупроводниковые тензорезисторы на основе кремния и германия применяются наиболее часто. Их характеристики: база 0,5-10 мм, номинальное сопротивление 50-500 Ом, ко-

эффицент тензочувствительности $\eta = 25 \div 75$. Полупроводниковые тензорезисторы, изготовленные на основе кремния и германия, химически инертны и выдерживают нагрев до $500-540^\circ \text{C}$. Линейность изменения сопротивления сохраняется при относительных деформациях до $\pm 0,1\%$; предельная деформация $\pm 0,4\%$. Недостатки полупроводниковых тензорезисторов: малая механическая прочность и гибкость, высокий разброс основных характеристик. Для измерения напряжений тензорезистор располагают по направлению измеряемой деформации и наклеивают на испытуемый элемент специальным клеем, обеспечивающим передачу поверхностных деформаций элемента на тензорезистор.

В зависимости от характера напряженного состояния на исследуемый элемент в одной точке наклеивают: при одноосном – один тензорезистор с прямоугольной решеткой (рис. 9.15 а), а при двухосном – два (рис. 9.15 б), если известны направления главных осей, и три, если их направления неизвестны (рис. 9.15 в). Группа из двух и более тензорезисторов, наклеенных для измерения напряжений в одной точке, называется розеткой. В том случае, если нет тензорезисторов с розеточной решеткой, ее можно сделать: наклеить тензорезисторы с прямоугольной решеткой на общей бумажной или пленочной основе или собрать непосредственно на элементе.

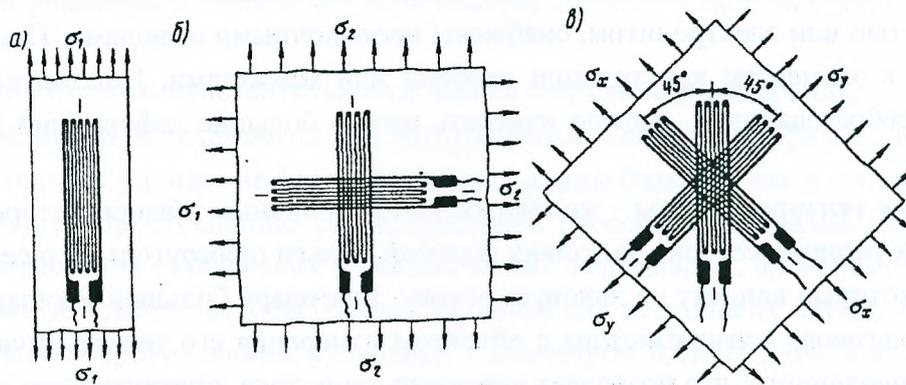


Рисунок 9.15 Схемы наклейки тензорезисторов при напряженных состояниях: а – одноосном; б – двухосном с известным направлением главных осей; в – то же, при неизвестном направлении главных осей.

При испытании мостов тензорезисторы наклеивают клеями (БФ-2, БФ-4, циакриновым и др.) на любые материалы.

Индукционные датчики. При испытании мостов применяют также индукционные датчики. Принцип их работы основан на использовании зависимости между индукционным сопротивлением катушки, включенной в цепь переменного тока, и магнитным полем, зависящим от измеряемой деформации. Датчик (рис.9.16) состоит из корпуса 3, внутри которого смонтирована катушка 4, в которую входит сердечник 5, соединенный со стойкой 2. Стойка 2 одним концом при помощи пластинчатого шарнира соединена с корпусом, а другим, острым, опирается на испытуемый элемент. На корпусе закреплена неподвижная призма 6, которая служит второй опорой датчика на испытуемый элемент. Сердечник со стойкой соединен винтом 1, предназначенным для регулирования положения сердечника, относительно катушки. Расстояние между точками опирания прибора – база измерения. При изменении расстояния между опорными точками сердечник переместится относительно катушки, что вы-

зовет изменение ее индукционного сопротивления, которое регистрируется измерительным устройством.

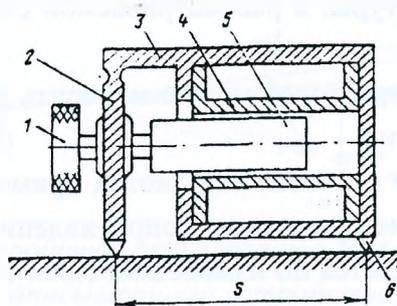


Рисунок 9.16 Принципиальная схема индукционного датчика: 1 – регулировочный винт; 2 – стойка; 3 – корпус; 4 – катушка; 5 – сердечник; 6 – неподвижная призма.

Электроизмерительные устройства. Эти устройства измеряют и регистрируют изменения электрических величин соединенных с ними датчиков – силы тока или напряжения, которые непосредственно измеряют. Чувствительность выбирают в зависимости от необходимой точности определения деформации и величины сигнала на выходе. Рассмотрим принципиальную схему электротензометрической установки с использованием электрического моста Уитсона (рис.9.17).

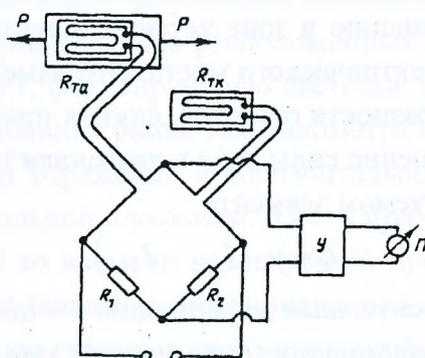


Рисунок 9.17 Принципиальная схема электротензометрической установки: $R_{та}$ – активный тензорезистор; $R_{тк}$ – компенсационный тензорезистор; R_1, R_2 – сопротивления; $У$ – усилитель; $П$ – регистрирующий прибор.

Тензорезистор (датчик), устанавливаемый на элементе, конструкции и включаемый в одно из плеч электрического моста, $R_{та}$ называется активным, или рабочим. В два нижних плеча включены сопротивления R_1 и R_2 . Для исключения влияния температуры в соседнее с активным тензорезистором плечо подключают аналогичный тензорезистор $R_{тк}$, который называется компенсационным, или температурным. Его устанавливают на образец из материала с таким же коэффициентом линейного расширения, не подвергающийся силовым воздействиям при испытаниях. Образец с компенсационным тензорезистором устанавливают рядом с рабочим (активным). При изменении температуры в обоих тензорезисторах возникают одинаковые температурные деформации, а, следовательно, и одинаковые изменения омического сопротивления ΔR_t . Для баланса электрического моста нужно соблюдение равенства

$$R_{та}R_2 = R_1R_{тк}$$

Следовательно, при равноплечной схеме моста, когда $R_{\text{та}}=R_{\text{тк}}=R_1=R_2$, при изменении сопротивлений $R_{\text{та}}$ и $R_{\text{тк}}$ одинаковое значение $\Delta R_{\text{т}}$ равновесие не нарушится. Деформации, вызванные изменением температуры, в рассматриваемой схеме включения тензорезисторов автоматически исключаются.

Показания рабочих тензорезисторов можно измерить двумя методами: непосредственного отсчета и нулевого измерения.

Метод непосредственного отсчета. Этот метод применяется при статических и динамических испытаниях. Изменение омического сопротивления тензорезистора, вызванное измеряемой деформацией, определяется по изменению силы тока d в диагонали электрического моста

$$\Delta f_{\text{д}} = I \cdot \frac{\Delta R_{\text{ТА}}}{4 \cdot (R_{\text{д}} + R_{\text{ТА}})},$$

где I – сила тока питания; $R_{\text{д}}$ – сопротивление диагонали моста; $R_{\text{ТА}}$ – сопротивление активного тензорезистора.

Измерения методом непосредственного отсчета при статических испытаниях выполняют так: до загрузки испытуемой конструкции приблизительно балансируют электрический мост, изменяя сопротивления в плечах R_1 и R_2 ; балансировку заканчивают при каком-то отличном от нуля показании прибора и его записывают; затем создают испытательную нагрузку, которая вызовет деформацию в зоне установки тензорезистора. В результате изменится сила тока в диагонали электрического моста. Это изменение силы тока регистрируют, сняв отсчет по прибору П. По разности отсчетов, снятых при ненагруженной и нагруженной конструкции, определяют изменение силы тока в диагонали моста, а по ней – значение относительной деформации в испытуемом элементе

$$\varepsilon = \nu \cdot (I_{\text{д2}} - I_{\text{д1}}),$$

где ε – определяемая относительная деформация; ν – цена деления шкалы гальванометра в единицах относительной деформации (определяется тарировкой); $I_{\text{д2}} - I_{\text{д1}}$ – разность отсчетов по гальванометру.

Обычно цену деления при тарировке ν определяют в единицах напряжения на одно деление. Измеренное напряжение

$$\sigma = \nu_1 \cdot (I_{\text{д2}} - I_{\text{д1}}).$$

При динамических испытаниях мостов процесс изменения деформаций (напряжений) записывают магнитоэлектрическими осциллографами различных марок. Осциллограф – это комплекс приборов и механизмов, смонтированных в одном блоке. Один из основных приборов осциллографа – чувствительный гальванометр (рис.9.18 а) – представляет собой рамку из тонкой проволоки 1, закрепленную на пружинных подвесках в поле постоянного магнита 2. На рамке прикреплено маленькое оловянное зеркальце 3. Через рамку 1 пропускают ток из диагонали электрического моста; при прохождении тока через рамку возникает крутящий момент, который поворачивает рамку на угол, пропорциональный силе тока. Так как сила тока в рамке изменяется пропорционально измеряемой деформации, то и угол поворота рамки будет изменяться пропорционально ей. Таким образом, устанавливается прямая зависимость между углом поворота рамки гальванометра и измеряемой деформацией.

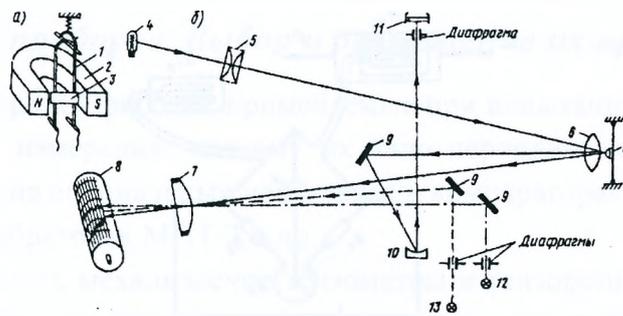


Рисунок 9.18 Записывающее устройство осциллографа НО44.1: а, б – схемы чувствительного гальванометра, записывающего устройства; 1 – рамка (петля) из тонкой проволоки; 2 – постоянный магнит; 3 – зеркальце; 4 – лампочка; 5 – конденсор; 6 – сферическая линза; 7 – цилиндрическая линза; 8 – барабан с фотоленкой; 9 – плоские зеркала; 10 – цилиндрическое зеркало; 11 – экран наблюдения; 12 – импульсная лампа продольного графления; 13 – лампа отметки времени.

Рассмотрим схему записывающего устройства магнитоэлектрического осциллографа (рис. 9.18.б). Запись измеряемой деформации на осциллографе выполняется следующим образом: световой поток от лампочки 4 через конденсор 5 (состоит из двух цилиндрических линз) в виде горизонтальной полосы света попадает на окошки гальванометров, установленных в магнитном блоке; пройдя через сферические линзы 6 и, отразившись от зеркал 3 на рамках гальванометров, в виде вертикально расположенных световых полосок он направляется на цилиндрическую линзу 7, фокусирующую световые полоски в точки в плоскости записи на фото ленте 8. При колебаниях рамки гальванометра вместе с ней колеблется зеркало гальванометра и меняется угол отражения в горизонтальной плоскости. Отраженный луч света перемещается в горизонтальной плоскости, и если при этом перемещается лента, то на ней записывается развернутый во времени исследуемый процесс. Часть световой полоски, отраженная зеркалом 3 на рамке гальванометра, попадает на зеркало 9, затем на вогнутое цилиндрическое зеркало 10, которое отражает свет на матовый экран 11 визуального наблюдения. На ленте, кроме записи исследуемых процессов, выполняются продольное графление бумаги и запись отметок времени с помощью ламп 12 и 13.

При испытании мостов применяют осциллографы НО30.А, НО44.1, НО44.2, регистрирующие 12-24 процесса. Применяются осциллографы (магнитографы), в которых исследуемые процессы записываются на магнитной ленте. Записи расшифровываются на ЭВМ при помощи специальной приставки. При одновременной записи нескольких динамических процессов число электрических мостов должно быть равно числу записываемых процессов. Соотношение между действительными деформациями и записанными на пленке устанавливают тарировкой.

Метод нулевого измерения. Этот метод основан на применении равновесной схемы электрического моста с питанием постоянным током. Рассмотрим одну из возможных схем электрического моста (рис.9.19). Здесь, как и при методе непосредственного отсчета, в одно из плеч включен рабочий тензорезистор $R_{та}$, а в соседнее с ним плечо – компенсационный $R_{тк}$. Сопротивления плеч R_1 и R_2 обычно регулируют подключенным к ним переменным сопротивлением (реохордом) $R_б$.

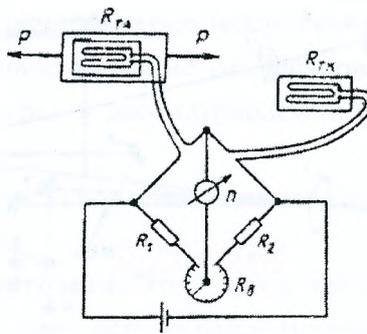


Рисунок 9.19 Схема моста, применяемого при методе нулевого измерения.

Измерения выполняют следующим образом: до загрузки испытуемой конструкции, регулируя реохордом сопротивления в плечах R_1 и R_2 , балансируют электрический мост (при сбалансированном мосте гальванометр Π должен показывать нуль); снимают отсчет по шкале реохорда, загружают конструкцию. Это вызывает изменение сопротивления рабочего тензорезистора – нарушится баланс электрического моста. В этот момент гальванометр покажет наличие тока в диагонали электрического моста. Изменяя сопротивления в плечах R_1 и R_2 , вновь балансируют мост, после чего снимают отсчет по реохорду. По разности отсчетов, снятых по реохорду в незагруженном и загруженном состоянии, определяют деформацию (напряжение) в зоне установки рабочего тензорезистора. Соотношение между измеряемой деформацией и изменением сопротивления реохорда определяют тарировкой. Электроизмерительные устройства для определения деформаций по методу нулевого отсчета проще и компактнее, чем применяемые по методу непосредственного отсчета.

Широкое распространение получили тензометрические устройства с автоматической балансировкой электрического моста и записью отсчетов. Запись может осуществляться непосредственно на перфоленту, которая затем обрабатывается на ЭВМ. При испытаниях мостов успешно используются автоматические тензометрические устройства с записью на перфоленту и на бумагу.

Ранее была рассмотрена схема электрического моста с одним рабочим тензорезистором. Существуют и другие схемы, позволяющие измерять суммарные деформации от всех усилий и деформаций и вызываемые отдельным усилием (рис.9.20). Изменение схемы дает возможность не только разделять измеряемые деформации, но и увеличивать чувствительность тензорезистора.

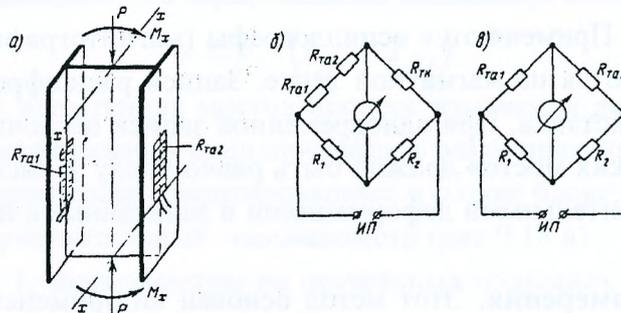


Рисунок 9.20 Схемы установки и включения тензорезисторов для измерения напряжений в сжато-изогнутом элементе: а – установки; б – включения для измерения напряжений только от продольной силы; в – то же от момента M_x ; $R_{ра1}$ и $R_{ра2}$ – рабочие тензорезисторы; $R_{рк}$ – компенсационный тензорезистор.

9.6 Тарировка приборов. Выбор и размещение их при испытаниях

Тарировка приборов. Приборы, применяемые при испытаниях, должны обеспечивать необходимую точность измерения, поэтому их надо периодически тарировать. Тарировка приборов производится на специальных установках – компараторах различных конструкций: ПЧ-3, ЛИМСХ или калибраторах МПТ-2 и др.

Если нет компаратора, механические тензометры и тензорезисторы тарируют на тарировочных балочках. Истинное значение деформации определяют контрольным тензометром или рассчитывают.

Тарировочная балочка может быть простой на двух опорах или консольной. Чаще используется консольная балочка равного сопротивления (рис.9.21). Деформация на поверхности балочки рассчитывается по прогибу f , измеряемому на расстоянии l от заделки. Так как такая балочка изгибается по цилиндрической поверхности, то прогиб $f = \rho l^2 / 2$.

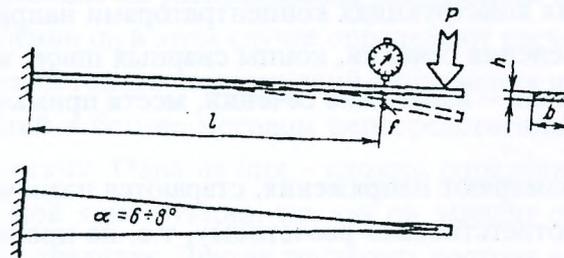


Рисунок 9.21 Консольная тарировочная балочка равного сопротивления.

Продольная относительная деформация ε по поверхности балочки пропорциональна кривизне балочки ρ и ее толщине h

$$\varepsilon = \rho \frac{h}{2}$$

Относительная деформация на поверхности балочки

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} f$$

Аналогично тарируют по напряжениям.

Тензорезисторы пригодны преимущественно для разового использования, поэтому их нельзя тарировать индивидуально. Их тарируют следующим образом. Из однотипной партии тензорезисторов отбирают около 5% для тарировки, каждый из отобранных датчиков наклеивают на тарировочную балочку и подключают к тому электроизмерительному устройству, которое будет использовано для работы с данной партией тензорезисторов. При тарировании балочку нагружают не менее трех раз, снимая отсчеты по измерительному устройству. Деформации (напряжения) в зоне установки тензорезистора рассчитывают по приведенным выше формулам или по контрольному тензометру, установленному рядом с тензорезистором. По результатам измерений находят цену деления как среднее арифметическое из результатов испытаний протарированных тензорезисторов. Эту цену деления принимают одинаковой для данной партии.

Выбор приборов и размещение их. В зависимости от цели испытаний для измерения напряжений и деформаций назначают наиболее напряженные и деформируемые элементы и

узлы пролетных строений и опор с указанием характерных сечений. Важно при измерениях напряжений правильно назначить базу измерения. Если напряжения измеряют вне зон их концентрации, то база измерения механическими тензOMETрами определяется необходимой точностью измерения и ожидаемыми максимальными значениями измеряемых напряжений. При напряжениях в стальных элементах мостов менее 80 МПа база принимается равной 100 мм и более.

Тензорезисторы обладают достаточно большим диапазоном изменения чувствительности, поэтому для измерения напряжений вне зон их концентрации во всех случаях можно использовать тензорезисторы с базой 10-20 мм. Напряжения в зонах концентрации измеряют на небольших базах (в металлических элементах 1-5 мм). Чем выше неравномерность распределения напряжений около концентратора напряжений, тем меньшая база должна быть у тензорезистора. Особое внимание нужно обращать на места установки приборов. При измерении фибровых напряжений приборы устанавливают вне зон возможной концентрации напряжений. В металлических конструкциях концентраторами напряжений могут быть различные отверстия, резкие изменения сечений, концы сварных швов, местные искривления, вмятины и т.д., в железобетонных – изменение сечений, места примыкания ребер жесткости, закрепления анкеров и т. д.

Сечение, в котором измеряют напряжения, стараются назначить с таким расчетом, чтобы оно наиболее точно соответствовало расчетному, т.е. не проходило по элементам, неопределенно включаемым в работу (например, соединительные планки, концевые участки накладок и т. п.). Приборы в сечении исследуемого элемента расставляют в зависимости от характера напряженного состояния и конфигурации сечения. Минимальное число точек установки тензOMETров в сечении определяется характером его работы по числу силовых факторов. Так, при воздействии на элемент осевого усилия N , изгибающих моментов M_x и M_y и крутящего момента $M_{кр}$ минимальное число точек равно четырем. Это правило относится к монолитным сечениям. Для составных сечений, где возможно взаимное смещение отдельных элементов, число точек должно быть увеличено. Схемы размещения минимального числа тензOMETров в поперечных сечениях элементов металлических конструкций показаны на рис. 9.22.

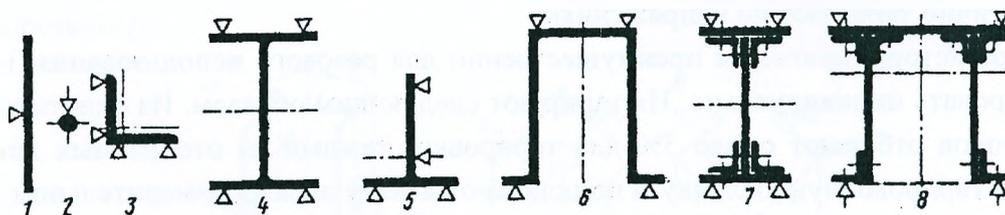


Рисунок 9.22 Схема размещения минимального числа тензOMETров и тензорезисторов в поперечных сечениях элементов: при действии осевой силы N 3, 4, 5, 6, 7, 8; при действии N , M_x , M_y , $M_{кр}$.

Из-за некоторой неопределенности распределения напряжений по сечениям бетонных и железобетонных элементов, особенно работающих на изгиб, принимают большее число точек в сечении для установки тензOMETров, чем в соответствующих сечениях элементов металлических конструкций.

При экспериментальном исследовании концентрации напряжений важно определить не только максимальное напряжение σ_{max} в зоне концентрации, но и степень неравномерности распределения напряжений, которая оценивается коэффициентом концентрации α_σ . В общем случае

$$\alpha_\sigma = \sigma_{max} / \sigma_H,$$

где σ_H – номинальное напряжение, определяемое обычно по площади нетто.

Таким образом, для оценки концентрации напряжений надо знать σ_{max} и σ_H . При измерении σ_{max} тензометр с малой базой устанавливают в зоне максимальной концентрации напряжений (на кромке концентратора: выкружки, отверстия и др.) с ориентацией базы измерения по направлению силового потока в рассматриваемой зоне сечения. Для определения σ_H измеряют напряжения в сечении по площади брутто в зоне, соответствующей зоне действия σ_{max} . Это сечение располагается на некотором удалении от концентратора напряжений с таким расчетом, чтобы его влияние на распределение напряжений было минимальным. Ослабление сечения при определении σ_H в этом случае определяют расчетом.

При испытании железобетонных конструкций напряжения измеряют в бетоне и в арматуре. Измерение напряжений в бетоне методом непосредственного тензометрирования связано с некоторыми трудностями. Одна из них – сложно определить действительный модуль упругости бетона испытываемой конструкции, так как он зависит от многих факторов и изменяется в довольно широких пределах. Другая трудность состоит в том, что бетон как материал обладает неоднородной структурой, могут быть раковины и трещины, в связи с чем силовые деформации в нем распределяются неравномерно. Это может приводить к погрешностям при определении напряжений по измеренным деформациям. Для снижения этого влияния деформации измеряют на больших (более 10 см) базах. При статических испытаниях напряжения (деформации) в бетоне измеряют механическими тензометрами, тензорезисторами, индикаторами и деформометрами различных конструкций, а при динамических – тензорезисторами.

Рычажные тензометры устанавливают с удлинителями. Для предохранения ножей (призм) приборов от затупления в местах их установки на бетон наклеивают тонкие металлические пластинки размером 5x5 мм. Тензорезисторы наклеивают прямо на бетон. Особое внимание обращают на поверхность в местах наклейки тензорезисторов – она должна быть ровной без раковин и пор. Индикаторы можно приклеивать к бетону специальным клеем. В этом случае подвижной шток индикатора соединяют с удлинителем, закрепленным в конце базы измерения. Можно их использовать и в качестве съемных приборов, т.е. устанавливать только на время снятия отсчетов. Для этого в точках, между которыми измеряют деформации, ставят марки – стальные стержни длиной около 20 мм и диаметром 10 мм, которые заделывают в бетон или приклеивают к нему. На внутренних вертикальных гранях марок делается трехгранное кернение, в которое упирается с одной стороны подвижной шток индикатора, а с другой – его корпус.

Иногда напряжения измеряют деформометрами, которые устанавливают на марки, закрепленные на расстоянии базы измерения. Одним прибором можно последовательно измерять деформации в большом числе мест.

В арматуре напряжения можно измерить приборами, применяемыми при испытаниях металлических конструкций. В конструкциях из обычного железобетона при испытаниях обычно измеряют напряжения, вызываемые только временной нагрузкой, а в конструкциях из предварительно напряженного железобетона, кроме того, важно определить предварительные напряжения в бетоне и в арматуре.

Напряжения в арматуре от внешней статической нагрузки измеряют тензометрами: снимают отсчеты при ненагруженной и нагруженной конструкции. Предварительные напряжения в арматуре измеряют различными способами, например на отдельные проволоки пучка устанавливают тензорезисторы и снимают по ним отсчет, затем проволоки перерезают, т.е. снимают предварительное натяжение и берут новый отсчет. По разности отсчетов определяют предварительное напряжение. Как видно, этот способ связан с частичным повреждением конструкции, поэтому такие измерения можно выполнять в ограниченном числе проволок и только в исключительных случаях, выбирая отдельные проволоки пучков в местах с небольшими напряжениями от эксплуатационных нагрузок. Кроме того, проволоки в пучках напряжены неравномерно, поэтому могут быть погрешности в оценке предварительного напряжения арматуры.

Другой способ заключается в последовательном контроле за натяжением арматуры с момента изготовления конструкции. Такой контроль можно осуществить при помощи тензорезисторов, наклеенных на арматурные стержни или проволоку. Последовательное снятие отсчетов до натяжения арматуры, после ее натяжения, после спуска натяжения и в процессе эксплуатации позволяет проследить за изменениями напряженного состояния в арматуре в течение длительного времени. Целесообразно этот способ применять при научных исследованиях. Недостаток способа – трудно установить связь между снимаемыми отсчетами на различных этапах наблюдения ввиду некоторой неопределенности из-за неустойчивости работы электроизмерительного устройства в течение длительного времени (сохранение «нулей»). Этот недостаток в значительной степени устраняется корректировкой «нулей», по контрольным тензорезисторам, наклеенным одновременно с рабочими на ненапряженные участки арматуры.

Если можно оголеть пучок арматуры на длине 1-2 м, то напряжения (усилия) в арматуре определяют такими же способами, как при проверке натяжения проволочной арматуры при изготовлении предварительно-напряженных конструкций. Один из таких способов – подвешивание груза – основан на измерении провисания натянутой проволоки при воздействии сосредоточенной силы заданного значения или сосредоточенной силы, необходимой для создания заданного провисания.

По провисанию проволоки на известной базе под действием сосредоточенной силы (рис. 9.23) вычисляют натяжение арматуры. Из условия равновесия узла В' определяют суммарное усилие в натянутой проволоке в зависимости от груза Q и образованного при этом

провисания f. Приняв при малых углах $\alpha \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{2f}{l}$, а $S = (\sigma_{\Pi} - \sigma_A) F_{\Pi}$, получим

$$\sigma_{\Pi} + \sigma_A = \frac{Ql}{4 F_{\Pi}} \frac{1}{f},$$

где σ_n – предварительное напряжение в проволоке, МПа; σ_a – напряжение в проволоке от действия груза Q ; обычно σ_a составляет около 1% σ_n ; l – расстояние между опорами; F_n – площадь поперечного сечения проволоки, см².

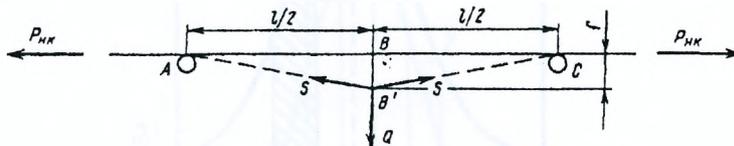


Рисунок 9.23 Схема действия сил при подвешивании груза к нити, опертой в двух точках.

Для определения предварительного напряжения в проволочной арматуре способом подвешивания груза созданы различные приспособления.

С целью упрощения определения σ_n груз Q в них принимается постоянным.

9.7 Обработка, оценка и анализ результатов испытаний

Вероятностно-статистические методы обработки и оценки результатов. Результаты измерений при испытаниях материалов, конструкций и их элементов из-за влияния разнообразных причин (отклонений в аппаратуре, точности снятия отсчетов и др.) носят изменчивый, случайный характер. Случайный характер имеют и испытательные нагрузки. Поэтому любое взятое отдельно измерение не может быть истинным значением определяемой величины. Измеряемая величина является случайной, принимающей в результате опыта различные, неизвестные заранее, значения.

Для выявления значений искомых величин используют вероятностно-статистические методы, основанные на следующем. Результаты измерений в каждом случае называются случайным событием. Оценкой возможности реализации случайного события служит его вероятность. Вероятность определяется отношением числа случаев, при которых повторяются эти события, к числу всех возможных при этом случаев. Оценивается вероятность положительным числом, не превышающим единицы.

Предположим, случайная величина X может принимать в процессе опыта дискретные значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. В результате каждого опыта величина X примет одно из этих значений. В серии опытов каждое событие может произойти с некоторой вероятностью P . Сумма вероятностей всех возможных значений случайной величины равна единице, т. е.

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Суммарная вероятность распределяется между отдельными значениями по определенному закону. Среди многих законов распределения случайной величины наиболее широко распространен нормальный закон. Ему хорошо подчиняются механические характеристики металла и других материалов, отклонения измерений различных величин и др. Распределение по нормальному закону (рис.9.24) имеет симметричную колоколообразную форму с максимальной ординатой.

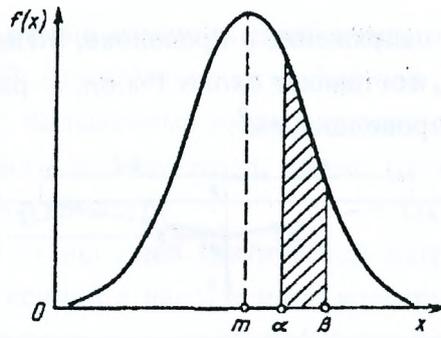


Рисунок 9.24 Распределение по нормальному закону.

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью распределения вероятностей

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

где $m=M[X]$ – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение (стандарт); $\sigma^2=D[X]$ – дисперсия величины X ; e – основание натуральных логарифмов ($e=2,718$).

Величины m и σ^2 называются численными параметрами и (числовыми характеристиками) случайной величины X . Чем больше стандарт, тем больше разброс случайной величины около ее среднего значения.

Вероятность того, что случайная величина X , подчиненная нормальному закону распределения, попадает на участок от α до β определяют по формуле

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi^*\left(\frac{\beta-m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{\alpha-m}{\sigma}\right),$$

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Здесь $\Phi^*(x)$ – табулированная функция, значение которой находится по специальным таблицам.

Предположим, что в результате опыта получены различные значения случайной величины X (например, предела прочности стали). Совокупность этих значений называется простой статистической совокупностью, или простым статистическим рядом, и обычно оформляется в виде таблицы. В первой колонке таблицы указывают номер опыта, а во второй – полученные значения случайной величины.

При большом числе наблюдений статистический материал дополнительно обрабатывают – строят статистический ряд.

Весь диапазон наблюдений случайной величины X разбивают на равные участки – разряды (10-20 разрядов) и подсчитывают число наблюдений n_i , попадающих в каждый i -й разряд. Частота, соответствующая данному разряду, $P^*=n_i/n$, где n – общее число наблюдений.

Гистограмма соответствует теоретической плотности распределения вероятностей величины X . Дальнейшая обработка состоит в определении числовых характеристик статистического распределения, которые являются аналогом числовых характеристик случайной величины X .

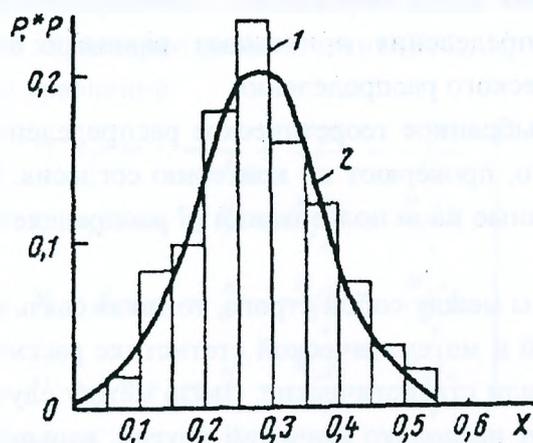


Рисунок 9.25 Графическое оформление распределений: 1 – гистограмма; 2 – выравнивающая (теоретическая) кривая распределения.

Так, математическому ожиданию соответствует среднее арифметическое всех полученных значений $M^*[X]$ а дисперсии – статистическая дисперсия $D^*[X]$. Величины $M^*[X]$ и $D^*[X]$ определяют по формулам:

при большом числе наблюдений ($n > 25$)

$$m_x^* = M^*[X] = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$$D_x^* = D^*[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2,$$

и при малом числе наблюдений ($n < 25$)

$$D_x^* = D^*[X] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2,$$

где x_i – значение случайной величины, полученной в i -том опыте.

Для наиболее подробного описания статистического распределения, кроме m_x^* и D_x^* , нужно определить и другие параметры, в первую очередь коэффициент асимметрии и эксцесс. Величины σ_x^* и D_x^* – несмещенные оценки соответственно математического ожидания и дисперсии. Точность и надежность этих величин при использовании их в качестве числовых характеристик исследуемой случайной величины оценивается по доверительным интервалам и доверительным вероятностям. Доверительный интервал показывает границы возможного ожидания численной характеристики случайной величины при заданной вероятности.

При обработке статистического материала важно подобрать теоретическую кривую распределения, отражающую основные закономерности данного статистического распределения. Эта задача – выравнивание статистических рядов – в значительной степени неопределенна. При ее решении часто исходят из физической сущности исследуемого явления, а иногда используют вид статистического распределения. Выбрав кривую распределения, определяют числовое значение параметров, при которых соответствие между теоретическим и ста-

статистическим распределением будет наилучшим. Обычно важнейшие числовые характеристики теоретического распределения принимают равными соответствующим числовым характеристикам статистического распределения.

Насколько надежно выбранное теоретическое распределение отражает основные закономерности статистического, проверяют по критерию согласия. Наиболее часто применяют критерий согласия, основанные на использовании χ^2 распределения Пирсона или А. Н. Колмогорова.

Если величины связаны между собой строго, то такая связь является функциональной.

В теории вероятностей и математической статистике рассматривают общие виды зависимостей – вероятностные или статистические. Связь между случайными величинами, когда одной из них соответствуют несколько значений другой, варьирующих около среднего значения, называется корреляционной.

Корреляционная связь характеризуется коэффициентом корреляции r_{xy} случайных величин X и Y

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)(y_i - m_y^*)}{\sqrt{D_x^* D_y^*}}$$

где x_i, y_i – значения случайных величин соответственно X и Y в i -м опыте; D_x^*, D_y^* – статистическая дисперсия случайных величин X и Y ; m_x^*, m_y^* – средние арифметические значения случайных величин X и Y .

Коэффициент корреляции может иметь значения от +1 до -1. Если коэффициент корреляции равен нулю или близок к нему, то исследуемые величины – некоррелируемые, т.е. не связаны определенной зависимостью. Наоборот, в случае приближения коэффициента корреляции к +1 или к -1 между ними существует тесная связь. Вычисления при статистической обработке лучше всего выполнять на ЭВМ.

Определение напряженного состояния и силовых факторов в элементах мостов.

По измеренным деформациям определяют напряжения и силовые факторы, действующие в сечении элемента. Рассмотрим это на примере поперечного сечения исследуемого элемента, в котором измерены фибровые деформации в точках 1, 2, 3 и 4 (рис.9.26).

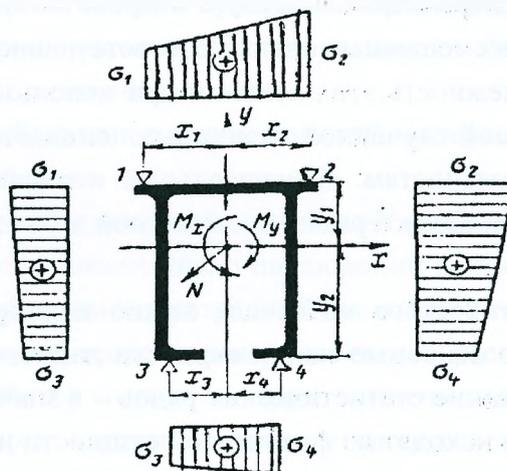


Рисунок 9.26 Нормальные напряжения и силовые факторы в исследуемом сечении элемента.

Напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ определяют по измеренным относительным деформациям $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$. По геометрическим характеристикам сечения ($F, I_x, I_y, x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2$) и зависимостям составляют систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad \varepsilon_1 E = \sigma_1 &= \frac{N}{F} + \frac{M_x y_1}{I_x} - \frac{M_y x_1}{I_y}; \\ 2) \quad \varepsilon_2 E = \sigma_2 &= \frac{N}{F} + \frac{M_x y_1}{I_x} + \frac{M_y x_2}{I_y}; \\ 3) \quad \varepsilon_3 E = \sigma_3 &= \frac{N}{F} - \frac{M_x y_2}{I_x} - \frac{M_y x_3}{I_y}; \\ 4) \quad \varepsilon_4 E = \sigma_4 &= \frac{N}{F} - \frac{M_x y_2}{I_x} + \frac{M_y x_4}{I_y}. \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему, получим усилия N, M_x, M_y . Наличие четырех уравнений для определения трех неизвестных позволяет, кроме того, проверить точность произведенных измерений. Для этого одни и те же усилия определяют решением различных групп уравнений. Например, решив группу уравнений 1, 2 и 3, получим величины N_1, M_x, M_{y1} , а при решении группы уравнений 2, 3 и 4 – N_2, M_x, M_{y2} . Разница в величинах N_1 и N_2 ; M_{x1} и M_{x2} ; M_{y1} и M_{y2} позволяет судить о погрешностях, связанных с точностью измерения деформаций и влиянием таких факторов, как местные искривления, концентрация напряжений в зонах измерений деформаций, а также неучет влияния других силовых факторов, например крутящего момента и др. Для оценки погрешностей нужно увеличивать число точек измерения деформаций в сечении по сравнению с числом действующих силовых факторов.

Определение динамических характеристик конструкций или отдельных ее элементов. Исходным экспериментальным материалом для определения динамических характеристик конструкции служат, диаграммы в виде виброграмм (рис. 9.27 а), осциллограмм изменения напряжений в отдельных элементах при действии динамической нагрузки и прогибограмм (рис.9.27 б). Одна из основных динамических характеристик – динамический коэффициент $(1+\mu)$, равный отношению максимальной деформации (напряжения) Y_{\max} при динамическом воздействии нагрузки к максимальной деформации $Y_{\text{ст}}$ при статическом воздействии той же нагрузки

$$1 + \mu = \frac{Y_{\max}}{Y_{\text{ст}}}$$

Для получения динамического коэффициента нужно зафиксировать максимально возможную динамическую деформацию, которая соответствует критической и скорости прохождения нагрузки. Эту скорость обычно устанавливают экспериментально: испытательную нагрузку по обследуемому пролетному строению пропускают с различными скоростями, одновременно фиксируя динамические деформации. На основании записей выявляют диаграмму с максимальной динамической деформацией, по которой определяют Y_{\max} и $Y_{\text{ст}}$. Для определения ординаты деформаций от статического воздействия нагрузки на диаграмме проводят среднюю линию L . Аналогично по диаграммам изменения напряжений определяется динамический коэффициент для различных элементов моста. На рис. 9.27б показана также запись отметчика времени O и моментов входа нагрузки на пролетное строение и схода с него Π .

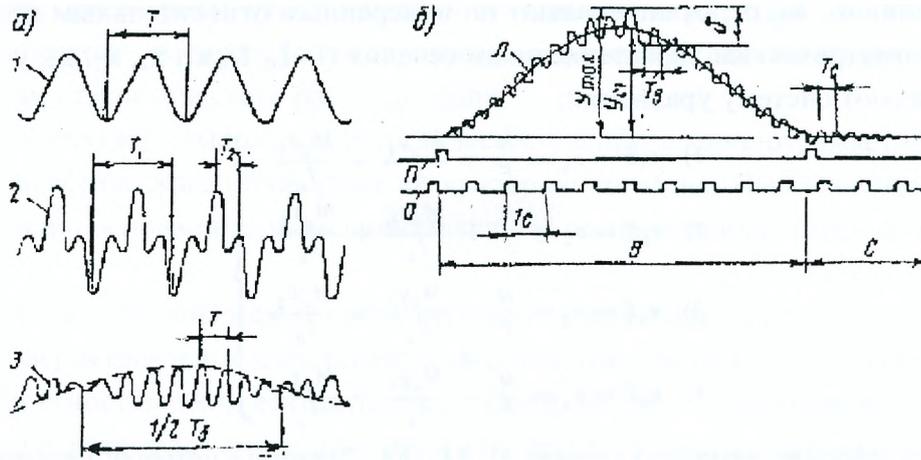


Рисунок 9.27 Виброграммы вынужденных колебаний (а) и прогибограмма (б); 1 – однотоновые колебания; 2 – двухтоновые колебания; 3 – биения; T, T_1, T_2, T_3 – периоды колебаний; B, C – участки вынужденных колебаний, собственных колебаний; T_b, T_c – периоды вынужденных и собственных колебаний.

К числу других важных динамических характеристик относятся амплитуда, частота и период колебаний. Для определения амплитуды колебаний измеряют расстояние между вершинами соседних полувольт, которое равно удвоенному значению амплитуды, умноженной на масштаб записи. При определении периода T и частоты колебаний ω на участке диаграммы подсчитывают число колебаний n (число вершин нижних или верхних полувольт) за промежуток времени t , принимаемый по записи отметчика времени. По n и t вычисляют T и ω по формулам:

$$T = \frac{t}{n}; \quad \omega = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}.$$

Эти характеристики определяют для вынужденных и собственных колебаний.

Для оценки скорости затухания собственных колебаний вычисляют логарифмический декремент затухания ψ , в известной мере характеризующий необратимые потери энергии колебаний

$$\psi = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}},$$

где A_n и A_{n+1} – амплитуды n и $(n+1)$ собственных колебаний системы.

Декремент затухания ψ экспериментально определяют по диаграмме собственных колебаний конструкции или ее элементов. Для этого можно использовать участки на диаграммах, записанные после схода испытательной нагрузки с конструкции (рис.9.28). При определении логарифмического декремента затухания с целью повышения точности измеряют амплитуды не соседних колебаний, а расположенных в начале и конце диаграммы. Тогда формула примет вид –

$$\psi = \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{A_n}{A_{n+m}},$$

где A_n, A_{n+m} – амплитуды n и $(n+1)$ собственных колебаний.

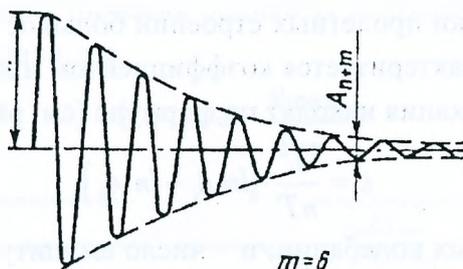


Рисунок 9.28 Диаграмма собственных колебаний.

9.8 Анализ динамических испытаний

Анализ динамических испытаний складывается из расшифровки диаграмм и вычисления по ним динамических характеристик моста. Для чтения диаграмм, записанных в небольшом масштабе, пользуются микроскопом или измерительной лупой.

Виброграмма свободных затухающих колебаний от ударной нагрузки (рис. 9.29) характерна закономерным убыванием амплитуд.

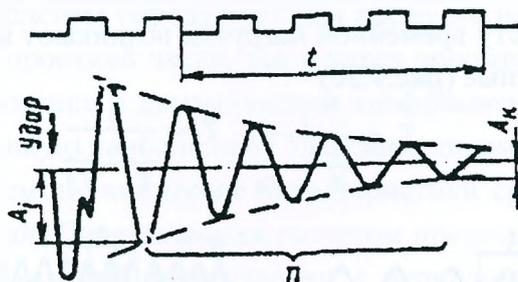


Рисунок 9.29 Виброграмма колебаний от ударной нагрузки. Ломаная линия сверху – отметка секунд.

Первая ордината, совпадающая с моментом удара, как правило, бывает наибольшей, однако если колебания записывались в точке, удаленной от места удара, то наибольшей ординате могут предшествовать две-три меньших. Колебания обычно однотонные.

Двухтонные колебания возникают при наложении колебаний двух видов с разными периодами, например, в широких мостах при ударе у барьера тротуара. В этом случае могут накладываться друг на друга вертикальные колебания вдоль моста и крутильные колебания поперек моста.

Период свободных колебаний находят из диаграммы делением отрезка времени на число наблюдаемых на нем колебаний, т.е.

$$T = \frac{t}{k}$$

Свободные колебания имеют постоянный период, кроме начальных участков, где могут сказываться побочные факторы; эти участки следует из анализа исключать.

Период свободных колебаний зависит от материала и размеров пролетного строения, его конструкции, состояния и пр.

По техническим условиям период свободных колебаний пролетных строений автодорожных городских и пешеходных мостов не должен находиться в интервале 0,3-0,7 с, в котором наиболее вероятны резонансные явления при проходе по мосту временных нагрузок.

Для динамической оценки пролетных строений большое значение имеет скорость затухания колебаний, которая характеризуется коэффициентом и логарифмическим декрементом затухания. Коэффициент затухания находят по формуле (см. рис. 9.29)

$$\varepsilon = \frac{l}{nT} \cdot [\ln A_i - \ln A_k],$$

где T – период свободных колебаний; n – число амплитуд на рассматриваемом участке диаграммы; A_i – величина начальной (i -й) амплитуды участка; A_k – величина конечной (k -й) амплитуды участка; \ln – натуральный логарифм.

Логарифмический декремент затухания $\delta = \varepsilon T$. Чем больше коэффициент затухания, тем скорее затухают свободные колебания и тем лучше динамическая характеристика моста.

Ориентировочные значения для мостов деревянных $\varepsilon = 0,8 \dots 3,0$ 1/с и $\delta = 0,2 \dots 0,6$; железобетонных $\varepsilon = 0,3 \dots 1,2$ 1/с и $\delta = 0,02 \dots 0,07$.

Испытания показывают, что колебания железобетонных предварительно напряженных мостов затухают медленнее, чем колебания мостов без предварительного напряжения, и динамические характеристики их имеют, как правило, несколько худшие значения.

От движущейся по мосту временной нагрузки возникают вынужденные колебания, как однотонные, так и многотонные (рис.9.30)

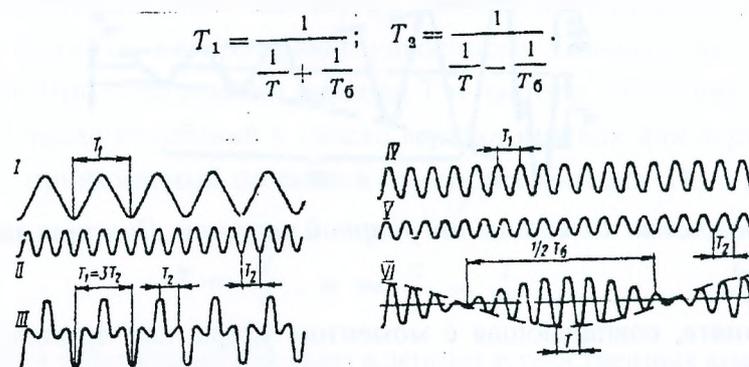


Рисунок 9.30 Виброграммы вынужденных колебаний: I, II, IV, V – однотонные колебания; III – двухтонные колебания при сложении колебаний I и II; VI – суммарные колебания при сложении колебаний IV и V (биение).

Периоды однотонных колебаний легко находят из диаграммы. Многотонные колебания возникают в результате сложения нескольких, как правило, не более трех простых колебаний. Периоды каждого тона в многотонных колебаниях находят, разделяя сложное колебание на простые составляющие. Если период свободных колебаний совпадает с периодом вынужденных, то амплитуды колебаний резко возрастают, что свидетельствует об опасном явлении резонанса. Иногда наблюдается явление биения, при котором амплитуды периодически увеличиваются и уменьшаются. Биение – следствие сложения двух колебаний с близкими, но не равными периодами.

Величины амплитуд колебаний характеризуют динамическое воздействие временной нагрузки на мост. Амплитуды резко возрастают при пропуске нагрузки через порожки. Величины амплитуд легко получить непосредственным измерением по диаграммам.

Основной характеристикой воздействия нагрузки на пролетное строение служит динамический коэффициент, который определяют по прогибограммам (рис.9.31) или тензограм-

мам как отношение наибольшего значения ординаты диаграммы к значению ординаты при статическом воздействии нагрузки, т.е.

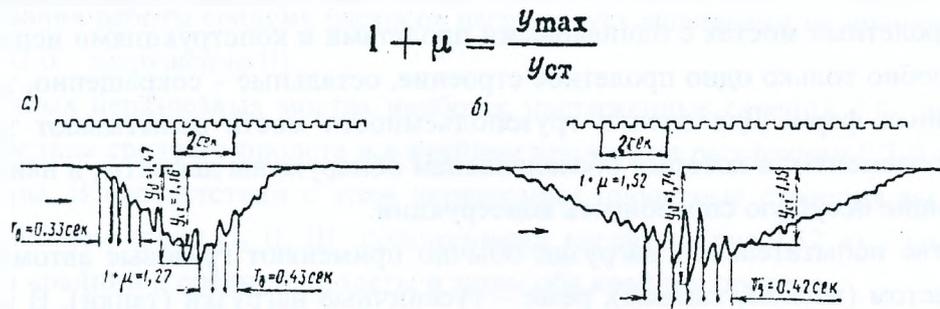


Рисунок 9.31 Прогибограммы вынужденных колебаний: а – при проходе грузового автомобиля МАЗ-205 со скоростью 20 км/ч по ровной поверхности; в – точке, через порожек высотой 4 см со скоростью 10 км/ч.

Ординаты статического воздействия находят, проведя на диаграмме среднюю линию, делящую вибрационную кривую пополам.

Динамические коэффициенты определяют при пропуске нагрузки с разной скоростью, как по ровной поверхности проезжей части, так и через порожек. Построив кривую зависимости между скоростью движения и динамическим коэффициентом, можно найти критическую скорость, соответствующую наибольшему значению динамического коэффициента.

Полученные испытанием динамические характеристики сравнивают с расчетными и с нормами технических условий. Динамическим расчетом пролетного строения находят период собственных колебаний, который сопоставляют с периодом, полученным из диаграмм, записанных от ударной нагрузки. Наблюдаемое в ряде случаев несовпадение тех и других может быть объяснено большей фактической жесткостью конструкции по сравнению с расчетной. Коэффициенты, а также декременты затухания служат побочной характеристикой: чем больше их значения, тем динамические характеристики моста лучше. Положительной характеристикой моста служит более высокий период собственных колебаний, чем период вынужденных колебаний, а также отсутствие между ними кратной зависимости, так как в противном случае возможно явление резонанса.

Динамические коэффициенты, полученные при испытании, часто превышают установленные нормами, особенно для предварительного напряженных мостов небольших пролетов. Обычно испытания проводят одиночными машинами, усилия от которых намного меньше расчетных, получаемых максимальным загруженным моста колоннами. При проходе же колонн суммарное динамическое воздействие машин уменьшается. Это обстоятельство следует учитывать при оценке состояния моста.

9.9 Методика проведения статических испытаний

При статических испытаниях мост загружают временными статическими нагрузками и измеряют перемещения, деформации и сдвиги в наиболее характерных сечениях, элементах и узлах конструкции. До испытания проводят обследование и устанавливают безопасность опытного нагружения.

Объем статических испытаний зависит от размеров моста, сложности и состояния его конструкции. Подробно испытывают обычно пролетные строения с наибольшими пролетами. В многопролетных мостах с одинаковыми пролетами и конструкциями испытывают, как правило, подробно только одно пролетное строение, остальные – сокращенно, замеряя лишь прогибы главных ферм. Для оценки грузоподъемности моста испытывают те пролетные строения и их элементы, в которых обследованием обнаружены дефекты, в наибольшей степени, снижающие несущую способность конструкции.

В качестве испытательной нагрузки обычно применяют грузовые автомобили, нагруженные балластом (песком, камнем), реже – гусеничные нагрузки (танки). В исключительных случаях пролетное строение загружают песком или водой, заливая ее в соответствующие емкости. Величина испытательной нагрузки не должна превышать временную нормативную нагрузку с учетом динамического коэффициента, принятую в расчете моста, и по возможности составлять не менее 80% от нее. При испытании старых мостов допустимая интенсивность загрузки должна быть предварительно определена соответствующим расчетом, учитывающим действительное состояние конструкции. Вес испытательной нагрузки (автомобилей) должен быть определен взвешиванием с точностью до 5%.

В процессе испытания временную нагрузку располагают таким образом, чтобы сооружение или отдельные его элементы находились в наиболее невыгодных условиях работы: испытывали бы наибольшие прогибы, напряжения и т. д. (рис. 9.32). Практически испытать все элементы конструкции моста невозможно. Поэтому выбирают наиболее напряженные элементы и сечения, которые и подвергают загрузке, последовательно устанавливая испытательную нагрузку вдоль и поперек моста в наиболее невыгодные положения.

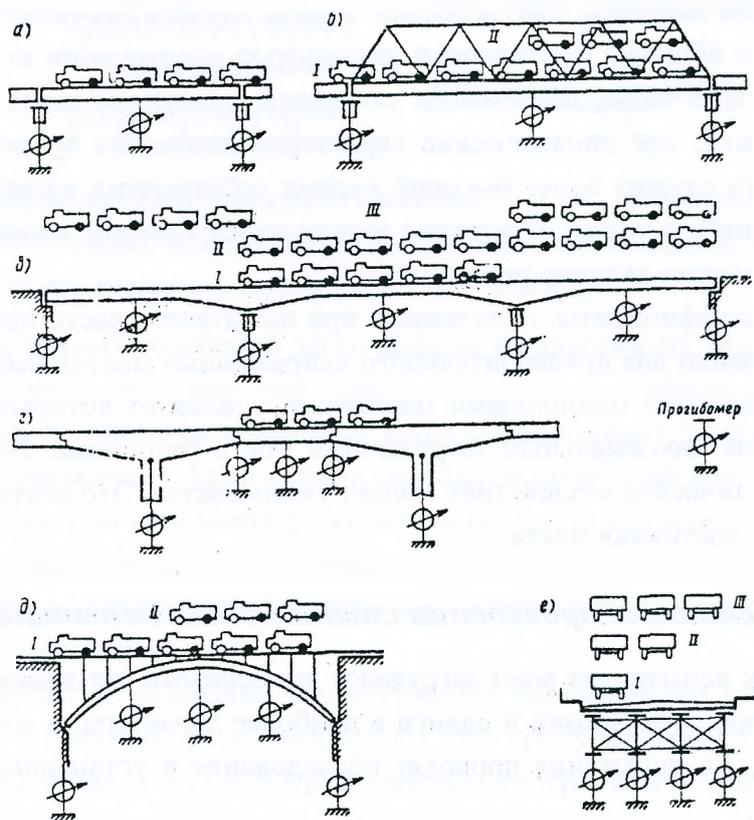


Рисунок 9.32 Схемы расположения испытательной нагрузки и прогибомеров.

В балочных разрезных мостах для получения наибольшего прогиба и напряжений в середине пролета и опорных сечениях загружают весь пролет (рис. 9.32 а, б – загрузка I). Для исследования работы средних раскосов нагрузку устанавливают на половине длины пролета (рис. 9.32 б – загрузка II).

В балочных неразрезных мостах наиболее напряженные сечения – на промежуточной опоре, по середине среднего пролета и в крайнем пролете на расстоянии 0,3-0,4 его длины от крайней опоры. В соответствии с этим неразрезные пролетные строения загружают вдоль моста не менее чем тремя (I, II, III) положениями нагрузки (рис. 9.32 в) – сначала средний пролет, затем крайний и средний пролеты и затем оба крайних пролета.

В рамно-балочной системе с подвесными балками можно ограничиться одним загруженным вдоль моста (рис. 9.32 г); при этом можно измерить наибольшие прогибы и напряжения в середине подвесного пролета, прогибы конца консоли и напряжения в сечениях консоли, в том числе и у опоры, а также напряжения в горизонтальном сечении опоры в месте сопряжения ее с пролетным строением. При загрузке всего арочного пролета (рис. 9.32 д) выявляются наибольшие прогибы замкового сечения и напряжения в сечениях арок от наибольшего распора; загрузка II (половина пролета) вызывает S-образную деформацию оси арок и наибольшие напряжения в ее сечениях от изгиба.

В поперечном сечении моста временную нагрузку устанавливают так, чтобы получить наибольшие усилия в одной из главных ферм (балок), деформации и напряжения которой изучаются. В большинстве случаев наиболее интенсивно работают крайние балки, и потому нагрузку сдвигают в одну сторону, располагая ее вплотную к одному из бордюров. Устанавливать нагрузку по ширине проезжей части (рис. 9.32 е) следует постепенно, последовательно (I, II, и III) загружая пролетное строение колоннами машин. Для испытания балок балочной клетки дополнительно загружают небольшим числом машин, располагая их над испытываемыми балками невыгоднейшим образом.

При каждом расположении опытной нагрузки измеряют перемещения и деформации в заранее намеченных сечениях.

Прогибы должны быть измерены в серединах пролетов и других характерных сечениях. Необходимо учитывать, что приборы показывают суммарные перемещения пролетного строения, складывающиеся из перемещений отдельных его частей. Так, например, для получения истинного прогиба середины подвесного пролета в консольно-балочной системе нужно измерить прогиб его среднего сечения и прогибы концов консолей (шарниров).

Прогибы пролетных строений служат наиболее важными показателями их состояния. Поэтому прогибы, как правило, измеряют во всех главных фермах (балках) поперечного сечения моста. В качестве дополнительных показателей работы пролетного строения желательно измерять угловые деформации опорных сечений и горизонтальных перемещений подвижных опорных частей.

Для измерения напряжений в наиболее напряженных элементах (сечениях) устанавливают тензометры (тензодатчики). Выбирая места установки их, следует иметь в виду, что напряжения в реальных конструкциях распределяются неравномерно по сечению и длине элементов. Неравномерность вызывается нецентральной фиксацией стержней, жесткостью

узлов, местными концентрациями напряжений, случайными искажениями геометрических размеров и очертаний сечений и т. д.

Учитывая это, при измерении напряжения в стержнях металлических решетчатых ферм, тензометры (тензодатчики) располагают в середине их длины между соединительными планками и рядами связующих заклепок, а также вдали от стыковых накладок (если не ставится задача измерения напряжений в накладках). В сечениях тензометры ставят в крайних (фибровых) волокнах (рис. 9.33 а). В металлических балках со сплошной стеной тензометры устанавливают на пояса в количестве не менее двух на каждом поясе, а в балках, объединенных с железобетонной плитой (рис. 9.33 б), дополнительно ставят тензометры на плиту вблизи металла (но не на вуты плиты), а также в некотором удалении от балок с целью выяснения степени совместной работы плиты с металлом.

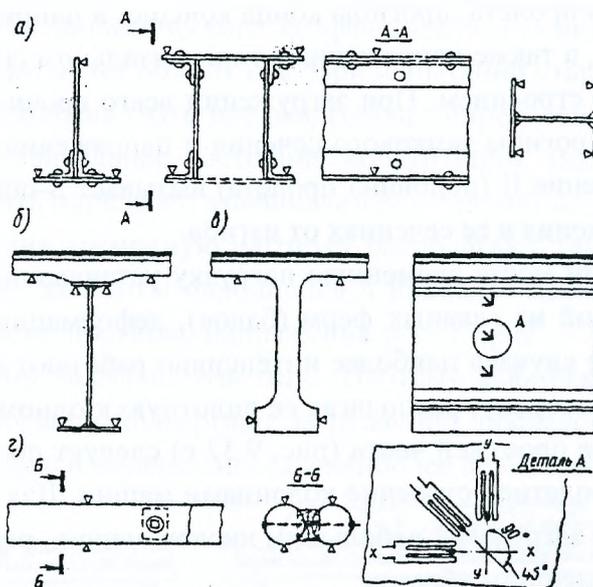


Рисунок 9.33 Расположение тензометров.

В железобетонных предварительно напряженных балках тензометры обычно ставят на бетон сжатых зон (рис. 9.33). В растянутых зонах балок с обычной арматурой тензометры желательно располагать на стержнях арматуры, удаляя на небольшом участке защитный слой бетона.

Тензометры ставят в направлениях, совпадающих с направлением изучаемых напряжений. В тех случаях, когда направление напряжений заранее не известно, например, при измерении главных напряжений, устанавливают вблизи изучаемой точки розетки (рис. 9.33, деталь А) как минимум из трех тензометров, так как двухосное напряженное состояние характеризуется двумя главными напряжениями и направлением одного из них. Наиболее просты розетки прямоугольные из двух тензометров, расположенных вдоль катетов прямоугольного треугольника, и третьего, поставленного под углом 45° к первым двум. Розетки проще всего составлять из тензодатчиков.

В деревянных конструкциях тензометры располагают симметрично относительно главных осей поперечного сечения элементов (рис. 9.33) вдали от врубок, избегая трещин, косося, сучков и других дефектов, нарушающих однородность древесины.

Для контроля показаний тензометров рекомендуется, кроме основных рабочих приборов, ставить дублирующие.

В ответственных местах конструкции, например в стыках, а также на трещинах, влияющих на грузоподъемность моста, ставят мессуры или аналогичные им приборы для измерения местных деформаций, вызываемых временной нагрузкой.

Испытания начинают с составления программы. В программе формулируют задачи испытаний, намечают величину испытательной нагрузки, ее расположение и последовательность загрузки. Последовательность загрузки предусматривают такой, чтобы нагрузка (автомобили) перемещалась из одного положения в другое, двигаясь только вперед. В программе намечают число и места установки приборов, каждому прибору присваивают свой номер и, наконец, на группы приборов выделяют наблюдателей, которым поручаются установка приборов и наблюдение за ними во время испытания. Каждому наблюдателю выдают журнал-книжку для записи показаний приборов. Испытания рекомендуется проводить в пасмурную погоду или в утренние часы, пока солнце не сильно нагревает конструкцию моста и приборы, а в необходимых случаях приборы защищают от непосредственного действия солнечных лучей.

Перед загрузкой моста записывают так называемые нулевые отсчеты по приборам, фиксирующие ненагруженное состояние. Далее, после каждого нагружения снимают промежуточные показания приборов спустя 15-20 мин после установки нагрузки в расчетное положение с тем, чтобы деформации конструкции выросли полностью. После проведения всех установок и вывода нагрузки с моста снимают второй «нулевой» отсчет и на этом заканчивают статические испытания. В процессе испытаний, особенно старых мостов, нужно внимательно следить по приборам за деформациями (преимущественно прогибами) конструкции; при увеличении нагрузки деформации должны возрастать по закону, близкому к прямолинейному, и резкие отступления от этого указывают на ненормальную работу сооружения; причины ненормальной работы следует выяснять немедленно. После испытаний сооружения повторно осматривают. Испытания временными нагрузками не могут дать величин напряжений от собственного веса сооружения. Определение этих напряжений – сложная задача. Однако в некоторых случаях значение напряжений в эксплуатируемых мостах от постоянной нагрузки, а также от других постоянно действующих факторов (например, усадки швов сварных соединений, остаточных деформаций прокатных профилей и т. д.) может оказаться необходимым для суждения о грузоподъемности сооружения. Экспериментальное определение этих напряжений может быть проделано при помощи приборов, основанных на магнитной проницаемости твердых тел, а также проницаемости рентгеновских и радиолучей. Из механических методов укажем следующий. На конструкцию наклеивают розетку датчиков и затем пустотелой кольцевой фрезой высверливают вокруг розетки борозду глубиной не менее 0,7 внутреннего диаметра фрезы. В вырезанном таким образом в цилиндре постоянные напряжения снимаются, а величины и направления их могут быть определены по показаниям датчиков розетки до и после рассверливания.

9.10 Измерение перемещений и прогибов при статических испытаниях

При статических испытаниях для измерения линейных и угловых перемещений широко используют механические приборы и геодезический инструмент.

Индикаторы. Эти приборы с ценой деления 0,001-0,01 мм применяют для измерения небольших линейных перемещений до 2-10 мм. Рассмотрим индикатор часового типа (рис. 9.34 а, б).

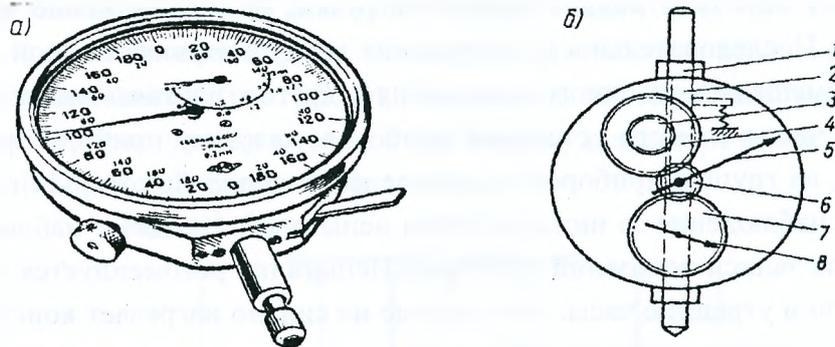


Рисунок 9.34 Общий вид индикатора (а) и кинематическая схема (б): 1 – корпус; 2 – шток; 3, 4, 6, 7 – шестеренки; 5 – большая стрелка; 8 – малая стрелка.

Шток 2 индикатора свободно перемещается в продольном направлении в корпусе 1. В средней части штока расположена зубчатая рейка, входящая в зацепление с шестеренкой 3, жестко соединенной с шестеренкой 4. Последняя входит в зацепление с шестеренкой 6, закрепленной на одной оси с большой стрелкой 5. Вращение с шестеренки 6 передается на шестеренку 7 и на малую стрелку 8.

Передача в индикаторе с ценой деления 0,01 мм рассчитана таким образом, что при перемещении штока на 1 мм большая стрелка делает один оборот. На циферблате нанесено 100 делений по окружности. Маленькая стрелка показывает число целых миллиметров. У индикаторов с ценой деления 0,01 мм шток перемещается на 10 мм, а у индикаторов с ценой деления 0,001 мм – на 2 мм.

Индикатор укрепляют таким образом, чтобы обеспечить передачу измеряемых перемещений на шток. Закрепляется индикатор специальными подставками, струбцинами или винтом через ушко у корпуса. Их обычно закрепляют на одном месте на весь период испытаний. Е. И. Мешковский на базе индикатора создал новый прибор, который называется деформометром (рис. 9.35).

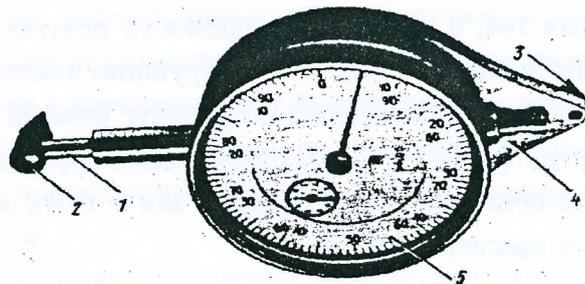


Рисунок 9.35 Деформометр Е.И.Мешковского: 1 – шток; 2 – подвижная конусная ножка; 3 – неподвижная ножка; 4 – пластинка; 5 – индикатор.

Деформометр. Этот прибор на место измерения устанавливают только для снятия отсчетов, что значительно расширяет его использование. Деформометрами измеряют различного рода перемещения, раскрытие трещин, деформации (напряжения) и др. Одним таким прибором можно выполнять измерения во многих местах и в течение длительного времени. Основная часть деформометра – индикатор, к задней его крышке наглухо прикреплена пластинка 4 с конусной ножкой. К штоку 1 закреплена конусная ножка 2. Прибор устанавливают на этих ножках в специально просверленные в марках отверстия диаметром около 1 мм и глубиной 2-3 мм. Если измерения выполняются на металлических конструкциях, то отверстия сверлят непосредственно в них, а в деревянных, железобетонных и каменных конструкциях в местах установки ножек деформометра заделывают специальные металлические стержни (марки) диаметром 3-5 мм и длиной 10-20 мм с просверленными в них отверстиями для установки деформометра. Расстояние между конусами ножек является базой измерения. Деформометры такого конструктивного исполнения изготавливают с базами от 50 до 250 мм. Приборы с большей базой (до 1 м) имеют жесткую конструкцию, чтобы исключить влияние деформации прибора на его показания.

Измерение деформометром выполняют следующим образом: прибор после установки на марки несколько раз слегка поворачивают вокруг продольной оси (покачивают) и берут отсчет; снимают прибор и вновь устанавливают, повернув его на 180° , снова берут отсчет. Для обработки принимают средний из двух отсчетов. Разность средних отсчетов, взятых до нагружения конструкции и после нагружения, дает значение деформации (перемещения).

Прогибомер. Этим прибором измеряют прогибы и другие линейные перемещения. Наиболее распространены прогибомеры с проволочной связью конструкций Н. Н. Максимова, А. М. Емельянова, Н. Н. Аистова, Е. Г. Мокина. Схема работы прогибомеров с проволочной связью показана на рис. 9.36.

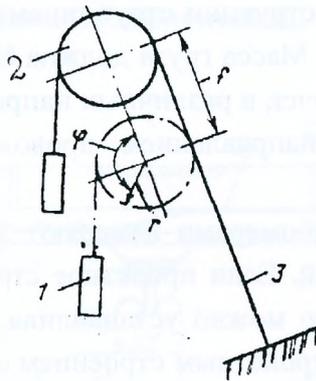


Рисунок 9.36 Схема работы прогибомера с проволочной связью: 1 – груз; 2 – шкив; 3 – проволока.

Проволока соединяет прибор с неподвижной (подвижной) точкой. Прогибомер соответственно закрепляют в перемещающейся (или неподвижной) точке, а к свободному концу проволоки, огибающей шкив прогибомера, подвешивают груз, создающий в ней постоянное натяжение. При смещении прибора на f шкив повернется на угол $\varphi = f/r$. Угловое перемещение шкива через систему передач отклоняет стрелку прибора. Указанная система передач обеспечивает необходимое увеличение измеряемого перемещения (прогиба).

При испытаниях мостов обычно используют прогибомеры Н.Н.Максимова. Шкив 2 (рис. 9.37 а, б) свободно вращается на шариковых подшипниках на оси 1, наглухо заделанной в корпусе прибора. Шкив жестко соединен с диском 6, на кромке которого сделана коническая зубчатая нарезка, которой он входит в зацепление с шестеренкой 5. Шестеренка 5 и стрелка 4 жестко закреплены на одной оси. В приборе две шкалы: одна нанесена на диске 6, а другая – на циферблате 3, по которому перемещается стрелка 4. Цена деления циферблата 0 1 мм. Каждый оборот диска соответствует 10 см измеряемого перемещения. Если перемещение превышает 10 см, то отмечают целое число оборотов диска.

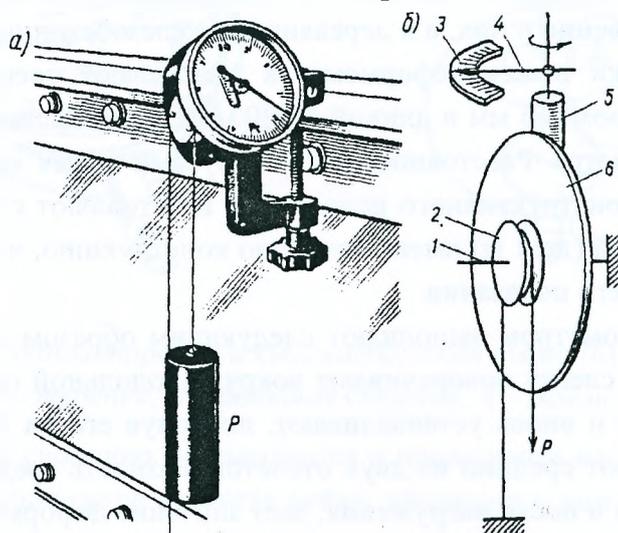


Рисунок 9.37 Общий вид прогибомера Н.Н. Максимова (а) и кинематическая схема (б):

1 – ось; 2 – шкив; 3 – циферблат; 4 – стрелка; 5 – шестеренка; 6 – зубчатый диск.

Прогибомер закрепляют к конструкции струбцинами. Для связи используют стальную проволоку диаметром около 0,5 мм. Масса груза должна быть 1-2 кг. Прогибомерами можно измерить взаимные перемещения точек в различных направлениях: направление измеряемого перемещения будет совпадать с направлением проволоки, связывающей взаимно перемещающиеся точки.

При испытании мостов прогибомерами измеряют вертикальные прогибы пролетных строений под статической нагрузкой. Если пролетное строение расположено над открытой поверхностью земли, то прогибомер можно устанавливать на пролетном строении (в подвижной точке) или на забитой под пролетным строением свайке (в неподвижной точке). Выбор места установки прогибомера в этом случае зависит от удобства снятия отсчетов. Если пролетное строение находится над водой, то прогибомер закрепляют на пролетном строении. Для обеспечения связи с землей (неподвижной точкой) под прогибомером на дно водоема опускают груз массой около 10 кг, к которому привязывают конец проволоки.

При большой длине проволоки из-за температурных изменений в ней могут возникнуть значительные деформации: их нужно учитывать, иначе будут погрешности в измерении прогибов. Для учета температурных деформаций температуру воздуха измеряют при снятии каждого отсчета по прогибомеру.

Для измерения прогибов на пролетном строении устанавливают не менее трех прогибомеров: два у концов и один в месте измерения прогиба. Это позволяет исключить осадки опор и опорных частей, которые определяются по показаниям концевых прогибомеров.

Другие приборы и способы измерения линейных перемещений. В тех случаях, когда нельзя обеспечить неподвижную точку под испытываемой конструкцией, нивелирование является одним из возможных способов измерения прогибов. При обычном нивелировании прогиб можно измерить с точностью до 1 мм.

Фотограмметрический способ измерения перемещений заключается в следующем: в точках, перемещение которых нужно измерить, прикрепляют марки; в стороне от испытываемой конструкции на неподвижных постаментов на определенном расстоянии друг от друга устанавливают фототеодолиты, которыми фотографируют марки в различные моменты испытания. Снимки дают возможность следить одновременно за большим числом точек и определять их перемещения с достаточно высокой точностью (до 0,3 мм).

Измерить прогибы и перемещения можно также при помощи различного рода приспособлений. Большие перемещения с точностью до 1 мм можно измерить при помощи простейших приспособлений в виде рейки с карандашом и планшета; их прикрепляют к взаимно перемещающимся точкам. При большом расстоянии между этими точками рейку можно заменить проволокой, натянутой пружиной или грузом. Простейшие приспособления часто используют для длительных наблюдений за различными перемещениями, например, пролетных строений относительно опор.

Измерение угловых перемещений. Углы поворота измеряются клинометрами. При испытаниях мостов используют клинометры с уровнем Стопани и маятниковые клинометры конструкции Н.Н. Аистова. Этими приборами можно измерять углы поворота только в вертикальной плоскости при статических испытаниях.

Общий вид клинометр с уровнем Стопани показан на рис. 9.38.

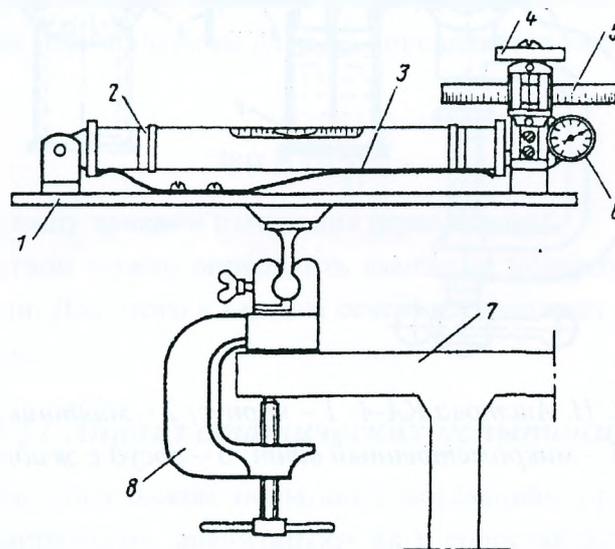


Рисунок 9.38 Клинометр с уровнем: 1 – станина; 2 – уровень; 3 – пластинчатая пружина; 4 – микрометрический винт; 5 – диск с делениями; 6 – счетчик числа оборотов диска; 7 – элемент пролетного строения; 8 – трубочина.

Прибор состоит из станины 1, к которой слева шарнирно прикреплен уровень 2, поддерживаемый пластинчатой пружиной 3. Правый конец уровня микрометрическим винтом 4 можно перемещать в вертикальной плоскости. К микрометрическому винту жестко прикреплен диск 5 с делениями. На испытуемой конструкции прибор закрепляется струбциной 8, соединенной шаровым шарниром со станиной. Для измерения угла поворота конструкции к ней в определенной точке струбциной 8 прикрепляется клинометр. Продольная ось уровня должна находиться в плоскости измеряемого угла поворота. Уровень устанавливается поворотом шарового шарнира и микрометрическим винтом 4. Это положение фиксируют снятием отсчета по счетчику 6 числа оборотов микрометрического винта, (счетчик показывает целое число оборотов винта) и по шкале диска 5 (показывает долю оборота винта). При повороте конструкции, нагруженной испытательной нагрузкой, уровень повернется на тот же угол. Для определения угла поворота уровень микрометрическим винтом возвращают в горизонтальное положение и снова снимают отсчет. Разность отсчетов, умноженная на шаг винта, равна перемещению конца уровня Δ . Отношение Δ/l равно тангенсу измеренного угла поворота. Цена деления на горизонтальном диске 5 в клинометрах этого типа равна 1-2".

Рассмотрим схему маятникового клинометра конструкции Н.Н. Аистова (рис. 9.39).

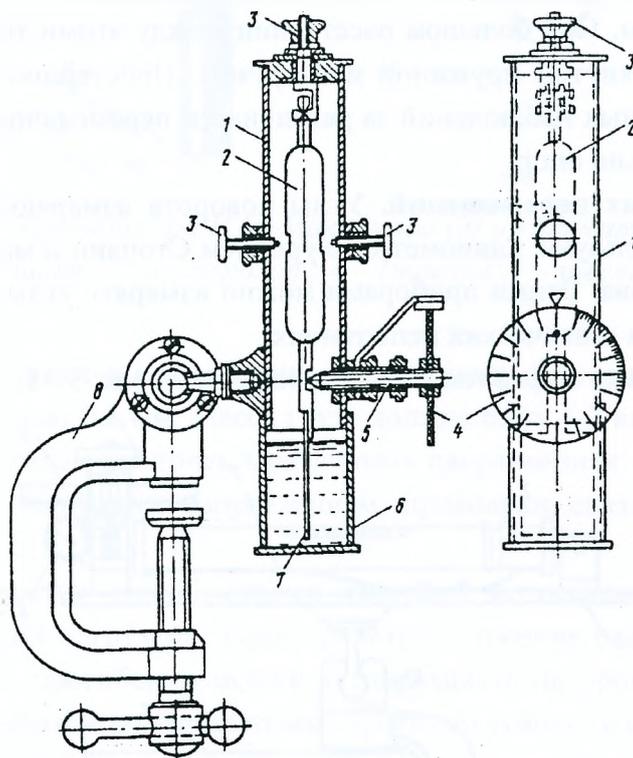


Рисунок 9.39 Клиномер Н. Н. Аистова КА-4: 1 – корпус; 2 – маятник; 3 – клемма; 4 – диск с делениями; 5 – микрометрический винт; 6 – сосуд с жидкостью; 7 – весло; 8 – струбцина.

Прибор состоит из закрытого корпуса 1, внутри которого подвешен маятник 2. Нижний конец маятника может контактировать с микрометрическим винтом 5, на наружном конце которого расположен диск 4 с делениями. Через клеммы 3 прибор включается в электрическую цепь с лампочкой или звонком. Эта цепь может замыкаться через маятник с микрометрическим винтом. Клинометр струбциной с шаровым шарниром закрепляется вертикально на

испытуемой конструкции таким образом, чтобы плоскость качания маятника совпадала с плоскостью измеряемого угла поворота. Затем микрометричный винт 5 вращают до контакта его с маятником (появления светового или звукового сигнала). В этот момент снимают отсчет по шкале диска и отводят микрометричный винт от маятника. При загрузке конструкции корпус прибора повернется вместе с конструкцией относительно маятника на измеряемый угол. Для его определения вращением винта снова замыкается цепь и снимается отсчет по шкале диска. Разность отсчетов в определенном масштабе дает угол поворота. Цена деления в различных моделях маятниковых клиномеров равна 2–10".

Угол поворота в любой плоскости можно измерить при помощи рычажного устройства (рис. 9.40).

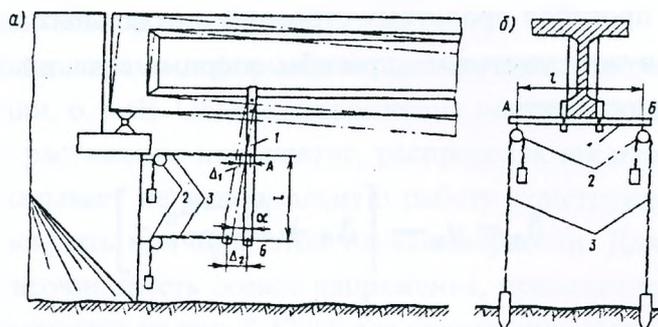


Рисунок 9.40 Схема рычажного устройства для измерения углов поворота сечений пролетного строения: а – в продольном направлении; б – в поперечном направлении; 1 – рейка; 2 – прогибомеры; 3 – проволочная связь.

Для этого к исследуемому участку конструкции (балки) одним концом наглухо прикрепляют рейку 1. При деформации конструкции эта рейка будет поворачиваться на тот же угол, что и сечение балки, в котором она прикреплена. Для определения угла поворота измеряют прогибомерами 2 или индикаторами перемещение двух точек рейки А и Б в направлении ее поворота. По измеренным перемещениям Δ_1 и Δ_2 определяется тангенс угла поворота и угол α

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{l},$$

где l – расстояние между точками измерения перемещений.

Рычажным устройством можно определить взаимные повороты каких-либо двух сечений элемента конструкции. Для этого в каждом сечении укрепляют рейки и измеряют взаимные перемещения их точек.

9.11 Анализ статических испытаний

По полученным при статическом испытании показаниям приборов вычисляют замеренные деформации и напряжения, анализируют их и сопоставляют с теоретическими, вычисленными для каждого положения испытательной нагрузки.

Деформации (напряжения) по показаниям того или иного прибора вычисляют по формулам:

полная деформация (напряжение)

$$\eta_{\Pi} = (\xi_i - \xi'_0) \beta$$

остаточная деформация (напряжение)

$$\eta_{\text{упр}} = \eta_{\Pi} - \eta_{\text{ост}} = (\xi_i - \xi''_0) \beta.$$

упругая деформация (напряжение)

$$\eta_{\text{ост}} = (\xi''_0 - \xi'_0) \beta;$$

Здесь ξ_i – показание прибора при i -м загрузении; ξ'_0 – то же, до загрузки (первый нулевой отсчет); ξ''_0 – показание прибора после снятия нагрузки (второй нулевой отсчет); β – переходный коэффициент от показаний прибора к величинам деформаций (напряжений).

При вычислении прогибов пролетных строений и отдельных элементов (например, балок балочной клетки) нужно учитывать прогибы опорных сечений. Так, прогибы δ балки в сечении 1 (рис. 9.41) будут равны:

Полный

$$\delta_{\Pi} = y_{\Pi} - \left[\Delta'_{\Pi} + \frac{\Delta''_{\Pi} - \Delta'_{\Pi}}{l} a \right]$$

Остаточный

$$\delta_{\text{ост}} = y_{\text{ост}} - \left[\Delta'_{\text{ост}} + \frac{\Delta''_{\text{ост}} - \Delta'_{\text{ост}}}{l} a \right]$$

Упругий

$$\delta_{\text{упр}} = \delta_{\Pi} - \delta_{\text{ост}}$$

Обозначения см. на рис. 9.41.

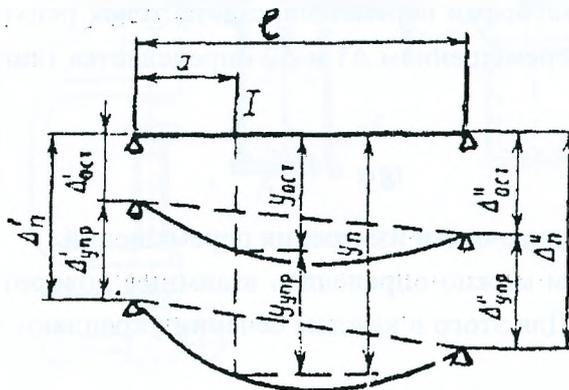


Рисунок 9.41 Схема к подсчету прогибов.

Остаточные прогибы в пролетном строении служат существенным показателем грузоподъемности моста: большая их величина свидетельствует о недостаточной несущей способности конструкции и наличии в ней значительных дефектов. Во вновь построенных мостах при загрузении их максимальной испытательной нагрузкой остаточные прогибы, возникающие в результате местных неупругих деформаций (обмятия во врубках, заклепочных соединениях и пр.), неизбежны и могут достигать в деревянных пролетных строениях до 40%,

в стальных до 20% и в железобетонных до 10% от замеренных упругих прогибов. В эксплуатируемых мостах при удовлетворительном состоянии остаточные прогибы обычно близки к нулю.

Остаточные деформации, замеренные тензометрами, должны быть малы, так как испытания ведут в пределах упругих деформаций. Значительное несовпадение первого и второго нулевых отсчетов обычно является следствием неудовлетворительной работы данного прибора. В этом случае его показания нужно исключить из анализа и воспользоваться показанием дублирующего прибора (если он был поставлен). Если же большинство приборов, поставленных на элементе конструкции (например, раскосе стальной фермы), не вернулись к первоначальным нулевым отсчетам, то это свидетельствует об остаточных деформациях элемента и неудовлетворительной его работе.

По замеренным тензометрами деформациям находят напряжения, возникающие в сечении элемента конструкции, $\sigma = \epsilon E$. Обычно напряжения по сечению даже в элементах, работающих на центральное растяжение или сжатие, распределяются неравномерно. Значительная неравномерность указывает на ненормальную работу конструкции. Часто более глубоким анализом удастся вскрыть причины этой неравномерности. Для общей оценки напряженного состояния достаточно иметь осевое напряжение, приведенное к центру тяжести сечения. Для сечения, показанного на рис. 9.42 осевое напряжение вычисляют по формулам:

$$\sigma' = \sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{x_1 + x_2} x_1;$$

$$\sigma'' = \sigma_3 + \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{x_3 + x_4} x_3; \quad \sigma_0 = \sigma' + \frac{\sigma' - \sigma''}{y_1 + y_2} y_2$$

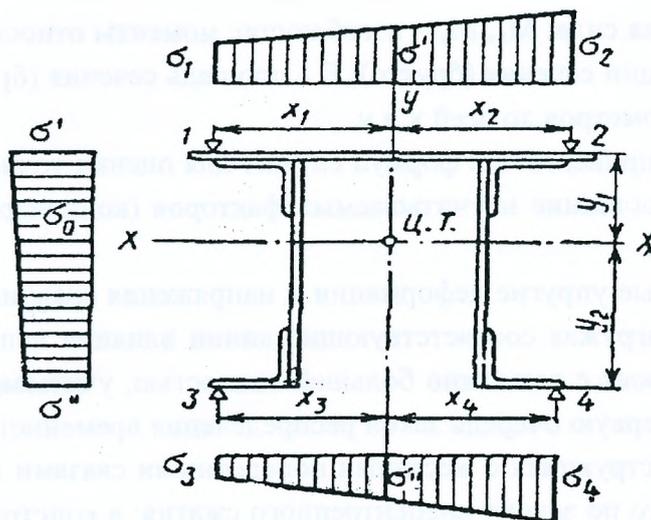


Рисунок 9.42 Схема экспериментальных напряжений.

Аналогично вычисляют средние фибровые напряжения в поясах балок, работающих на изгиб. Для выявления двухосного напряженного состояния ставят розетки тензометров. Для наиболее распространенной прямоугольной розетки главные деформации (напряжения к положению главных осей определяют по формулам:

главные деформации

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\varepsilon_{45}^2};$$

главные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1);$$

угол наклона главных осей

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y}{\varepsilon_x - \varepsilon_y};$$

Здесь ε_x , ε_y , ε_{45} – измеренные тензодатчиками деформации вдоль произвольных осей X и Y и вдоль направления под углом 45° к осям; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала; φ – угол наклона напряжения σ_1 к оси X.

В ряде случаев, помимо напряжений, могут представлять интерес усилия, развивающиеся в исследуемых сечениях. Усилия находят исходя из закона «плоских сечений». Для однородного материала будем иметь следующие выражения, из которых определяют продольные силы и изгибающие моменты

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \varepsilon_1 E = \frac{N}{F} - \frac{M_x}{I_x} y_1 - \frac{M_y}{I_y} x_1; \\ \sigma_2 &= \varepsilon_2 E = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{I_x} y_1 + \frac{M_y}{I_y} x_2; \\ \sigma_3 &= \varepsilon_3 E = \frac{N}{F} - \frac{M_x}{I_x} y_2 - \frac{M_y}{I_y} x_3; \\ \sigma_4 &= \varepsilon_4 E = \frac{N}{F} - \frac{M_x}{I_x} y_2 + \frac{M_y}{I_y} x_4. \end{aligned}$$

где N – продольная сила; M_x , M_y – изгибающие моменты относительно осей x и y; I_x , I_y – то же, моменты инерции сечения (брутто); F – площадь сечения (брутто); x, y – расстояния от мест установки тензодатчиков до осей x и y.

Одна из четырех приведенных формул служит для оценки точности измерений и влияния на напряженное состояние неучитываемых факторов (концентрации напряжений, крутящих моментов и т.д.).

Экспериментальные упругие деформации и напряжения сравнивают с теоретическими, которые вычисляют, загружая соответствующие линии влияния испытательными нагрузками. Линии влияния строят с возможно большей точностью, учитывая реальные условия работы сооружения и в первую очередь закон распределения временной нагрузки поперек моста. В современных конструкциях с жесткими поперечными связями поперечное распределение может быть принято по закону внецентренного сжатия: в конструкциях, не обладающих большой поперечной жесткостью, более близкие (к результатам испытаний) величины дает расчет, в котором несущие балки рассматривают как упругие опоры. Еще точнее пространственный расчет по методу проф. Б. Е. Улицкого.

При вычислении деформаций и напряжений для последующего сравнения их с экспериментальными необходимо соблюдать, кроме общеизвестных, следующие правила:

- при вычислении перемещений (прогибов, углов поворота, перемещений опорных частей) сталежелезобетонных пролетных строений следует вводить в расчетное се-

чение полную ширину плиты как в зонах положительных, так и отрицательных моментов;

- определять напряжения в деревянных и стальных элементах по площади брутто и не учитывать коэффициента продольного изгиба;
- перемещения в железобетонных конструкциях определять, учитывая полную площадь поперечных сечений (не исключать растянутую зону);
- напряжения в бетоне и арматуре железобетонных конструкций вычислять исходя из упругой стадии их работы; растянутую зону бетона можно, при этом учитывать, если растягивающие напряжения в бетоне не превосходят расчетных.

При удовлетворительном состоянии конструкций экспериментальные перемещения и напряжения, как правило, не превосходят теоретических. Это объясняется тем, что в теоретических расчетах невозможно учесть полностью действительные условия работы реального сооружения. Сравнивая экспериментальные и теоретические величины, находят конструктивную поправку

$$k = \frac{\eta_{\text{Э}}}{\eta_{\text{Т}}},$$

где $\eta_{\text{Э}}$ – величина, полученная при испытании; $\eta_{\text{Т}}$ – то же, теоретическим расчетом.

Конструкцию моста можно считать удовлетворительной, если конструктивные поправки не превышают единицы.

10 Моделирование сооружений и конструкций

10.1 Краткие сведения о моделировании сооружений и конструкций

В лабораторных условиях работу сооружений и конструкций изучают на моделях. Модель – копия сооружения, выполненная в некотором масштабе так, чтобы изучаемые процессы в натурном объекте и его модели были подобны. Это позволяет переносить качественные и количественные данные эксперимента с модели на моделируемый объект исследования. При помощи моделирования могут быть решены следующие задачи:

- проверка на моделях достоверности расчетов, а также предпосылок, положенных в их основу;
- определение, усилий, напряжений и деформаций в сложных случаях, когда методы строительной механики, теории упругости и других теоретических дисциплин неприменимы или требуют большой затраты средства времени;
- изучение новых конструкций и материалов;
- изучение работы конструкций вплоть до разрушения под воздействием силовых и других факторов.

Экспериментирование на моделях – неотъемлемая часть процесса научного исследования, дополняющая теоретические методы, а в ряде случаев являющаяся их источником. В строительном деле, в том числе и в мостостроении, углубленному изучению работы конструкций и сооружений на моделях придается первостепенное значение. Для моделирования необходимо, чтобы на объектах и их моделях процессы протекали по одним и тем же законам, описывались одними и теми же математическими уравнениями. Если в уравнении объекта и модели параметры и функциональные зависимости имеют одну и ту же физическую природу, то моделирование называется физическим, в противном случае – аналоговым.

Для физического моделирования необходимо запроектировать модель изучаемого объекта, т. е. назначить материал и размеры модели, характер и величину внешних воздействий на модель (например, сил), выбрать способы измерения на модели изучаемых процессов и т. д. Кроме этого, необходимо установить связь между процессами, получаемыми на модели, и протекающими на моделируемом объекте. Решение этих задач основывается на законах подобия.

Две системы – натура (н) и модель (м) – подобны, если два их состояния в сходственные моменты времени и в сходственных точках пространства пропорциональны. Математически это записывается так:

$$q_{mi} = q_{ci} q_{ni};$$

$$q_{ni} = f_i(p_{n1}, \dots, p_{ns});$$

$$q_{mi} = f_i(p_{m1}, \dots, p_{ms}),$$

где $q_{ci} = \text{const}$ – коэффициент (масштаб) подобия; q_{ni} – обобщенные координаты натуры, описывающие поведение системы (зависимые переменные); q_{mi} – то же, модели в сходственные моменты времени и в сходственных точках пространства; p_{ms} – независимые параметры натуры, определяющие ее поведение (независимые переменные); p_{ns} – то же, модели.

Например, изучая законы колебания середины однопролетной балки, q_n будет прогиб балки в середине пролета в некоторый момент времени t , считая от начала колебаний, q_m – прогиб модели балки тоже в середине пролета, в тот же момент времени t от начала колебаний, r_{ni} – пролет, жесткость балки, внешняя сила, вызывающая колебание, и другие величины, определяющие поведение натуральной балки, r_{mi} – то же, модели балки, f_i – функциональная зависимость прогиба q от параметров p .

Таким образом, в подобных системах, зная коэффициент подобия q_{ci} можно по поведению модели судить о поведении натуре.

Исследование тех или иных процессов или состояний сводится к установлению зависимостей между размерными величинами. Для измерения величин существуют различные системы единиц измерения. Вообще число единиц измерения произвольно и условно, но выбранная каждый раз система единиц измерения физических величин должна быть однозначна и непротиворечива.

В настоящее время обязательна Международная система единиц СИ (System International). Иногда применяют техническую систему МКГСС. В каждой системе некоторые единицы произвольно приняты за основные. Через основные выражены остальные, вторичные единицы измерения. Так, например, основной единицей измерения длины служит метр (м), единицей измерения площади – m^2 , объема – m^3 и т.д.

Любая величина всегда может быть представлена как произведение безразмерного коэффициента и степеней первичных единиц измерения. Например, жесткость балки в технической системе запишется так: $EI=c[L]^2[P]$, а в системе СИ соответственно $EI=c'[M][L]^3[T]^{-2}$. Здесь $[L]$, $[P]$, $[M]$, $[T]$ – единицы измерения длины, силы, массы, времени (в квадратных скобках принято обозначать размерность величин), а, c , c' – безразмерные числа.

В теории подобия рассматривают зависимости между безразмерными величинами, составленными из размерных величин конкретного процесса или состояния. Эти безразмерные величины называют **критериями подобия** и обозначают символом – Π .

Теория подобия базируется на следующих основных принципах:

- достаточное условие подобия двух систем (натуры и модели) – равенство соответствующих критериев подобия этих систем, составленных из их основных параметров и начальных (граничных) условий;
- необходимое условие подобия двух систем – равенство соответствующих критериев подобия этих систем, составленных из обобщенных координат и параметров систем;
- функциональная зависимость между характеризующими процесс величинами может быть представлена в виде зависимостей между составленными из них критериями подобия (Π -теорема).

Эти принципы (теоремы) справедливы для однозначных зависимостей. Основными (определяющими) параметрами называют независимые параметры, однозначно определяющие изучаемый процесс.

Для составления критериев подобия существуют следующие три способа.

Первый способ. Допустим, что имеется n размерных независимых величин p_i ($i=1, 2, \dots, n$), определяющих какой-то механически процесс. Единицами измерения пусть будут

длина [L] масса [m] и время [T] (в системе СИ). Размерность величины p_i можно выразить через первичные единицы измерения:

$$[p_i] = [L]^{\lambda_i} [M]^{\mu_i} [T]^{\tau_i},$$

где λ_i, μ_i, τ_i – некоторые известные числа.

Из p_i можно составить критерии подобия

$$\Pi = c p_1^{z_1} p_2^{z_2} \dots p_n^{z_n},$$

где c – безразмерная величина.

Размерность критерия подобия будет

$$\begin{aligned} [\Pi]^0 &= \{[L]^{\lambda_1} [M]^{\mu_1} [T]^{\tau_1}\}^{z_1} \{[L]^{\lambda_2} [M]^{\mu_2} [T]^{\tau_2}\}^{z_2} \dots \{[L]^{\lambda_n} [M]^{\mu_n} [T]^{\tau_n}\}^{z_n} = \\ &= [L]^{\lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \dots + \lambda_n z_n} [M]^{\mu_1 z_1 + \mu_2 z_2 + \dots + \mu_n z_n} [T]^{\tau_1 z_1 + \tau_2 z_2 + \dots + \tau_n z_n}. \end{aligned}$$

Так как критерий подобия безразмерная величина, то

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \dots + \lambda_n z_n &= 0; \\ \mu_1 z_1 + \mu_2 z_2 + \dots + \mu_n z_n &= 0; \\ \tau_1 z_1 + \tau_2 z_2 + \dots + \tau_n z_n &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Мы получили систему из трех уравнений с 3 неизвестными. Эта система имеет $n-3$ независимых решений $-z_1, z_2, \dots, z_{n-3}$ и, следовательно, столько же можно составить независимых критериев подобия, т.е.

$$\Pi_i = p_1^{z_{1i}} p_2^{z_{2i}} \dots p_n^{z_{ni}},$$

где $i=1, 2, \dots, (n-3)$.

Так как z_i в некоторых пределах произвольны, то и критерии подобия могут иметь различную форму, однако важно, что все они независимы друг от друга. Число критериев подобия всегда равно числу n минус число единиц измерения.

Второй способ основан на Π – теореме. Пусть дана некоторая функциональная зависимость между обобщенной координатой q_i и параметрами p_r , т.е. $q_i = f(p_1, p_2, \dots, p_r)$. Разделим каждый член этой функции на произвольную комбинацию $p_a^\alpha, p_b^\beta, p_c^\gamma$, составленную из числа ее членов, равного числу единиц измерения, и запишем размерность каждого частного. Числа α, β и γ неизвестны. Для некоторого члена p_i получим:

$$\begin{aligned} \left[\frac{p_i}{p_a^\alpha p_b^\beta p_c^\gamma} \right] &= \frac{[p_i]}{[p_a^\alpha p_b^\beta p_c^\gamma]} = \\ &= \frac{[L]^{\lambda_i} [M]^{\mu_i} [T]^{\tau_i}}{\{[L]^{a_1} [M]^{a_2} [T]^{a_3}\}^\alpha \{[L]^{b_1} [M]^{b_2} [T]^{b_3}\}^\beta \{[L]^{c_1} [M]^{c_2} [T]^{c_3}\}^\gamma} = \\ &= [L]^{\lambda_i - \alpha a_1 - \beta b_1 - \gamma c_1} [M]^{\mu_i - \alpha a_2 - \beta b_2 - \gamma c_2} [T]^{\tau_i - \alpha a_3 - \beta b_3 - \gamma c_3}, \end{aligned}$$

где $a_1, \dots, b_1, \dots, c_1, \dots$ – степени размерностей параметров p_a, p_b, p_c .

Чтобы полученное выражение было критерием подобия, необходимо:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i - \alpha \cdot a_1 - \beta \cdot b_1 - \gamma \cdot c_1 &= 0 \\ \mu_i - \alpha \cdot a_2 - \beta \cdot b_2 - \gamma \cdot c_2 &= 0 \\ \tau_i - \alpha \cdot a_3 - \beta \cdot b_3 - \gamma \cdot c_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Из полученных уравнений находят α , β , и γ , а по ним Π_i . Заметим, что параметры p_a , p_b и p_c должны иметь размерности, удовлетворяющие неравенству

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix} \neq 0. \quad (3)$$

Только при этом параметры и критерии подобия независимы.

Третий способ исходит из рассмотрения дифференциального уравнения исследуемого процесса. Так как все члены дифференциального уравнения всегда имеют одинаковую размерность (правило Фурье), то для получения критериев подобия следует, опустив знаки дифференцирования, поделить все члены уравнения на один из них. Полученные выражения, а также безразмерные аргументы, и будут критериями подобия.

Из критериев подобия легко получить зависимости между масштабами модели.

Если имеется r критериев, составленных из n величин,

$$\Pi_i = p_{1i}^{z_1} p_{2i}^{z_2} \dots p_{ni}^{z_n},$$

то по условию подобия: $\Pi_{ин} = \Pi_{им}$, что иногда записывают в форме $\Pi_i = idem$, т.е. (одно и то же).

Но $P_{1м} = P_{c1} \cdot P_{1н}, \dots, P_{пм} = P_{cp} \cdot P_{пн}$, где P_{cp} – масштабы параметров модели. Следовательно,

$$p_{1м}^{z_1} p_{2м}^{z_2} \dots p_{пм}^{z_n} = p_{c1}^{z_1} p_{1н}^{z_1} p_{c2}^{z_2} p_{2н}^{z_2} \dots p_{cn}^{z_n} p_{пн}^{z_n} = p_{1н}^{z_1} p_{2н}^{z_2} \dots p_{пн}^{z_n}$$

откуда

$$p_{c1}^{z_1} p_{c2}^{z_2} \dots p_{cn}^{z_n} = 1.$$

Таких уравнений будет r . Напомним, что $r = n - k$, где k – число единиц измерения, поэтому для определения всех n неизвестных P_c будет $n - k$ уравнений. Отсюда следует, что k масштабов могут быть назначены произвольно, остальные же получены из уравнений. Легко видеть, что уравнения масштабов получаются заменой в критериях подобия величин P их масштабами P_c и приравниванием полученного результата единице. Это во многих случаях упрощает решение задач моделирования.

Различают три вида подобия: если моделируются все координаты и параметры процесса, то подобие будет полным, если же не все, то неполным; если некоторыми параметрами можно в эксперименте пренебречь (например, по малости их значения), то подобие будет приближенным.

Для пояснения рассмотрим несколько примеров.

Пример I. Требуется составить модель для изучения прогибов консольной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Примем техническую систему единиц измерения. Известно, что

$$y = f(l, x, B, q),$$

где y – прогиб в точке с абсциссой x , [L]; x – абсцисса [L]; l – длина балки (L); $B = EI$ – жесткость балки [L]²[P]; q – нагрузка [L]⁻¹[P].

Влиянием на прогиб поперечных сил пренебрегаем.

Критерии подобия находим при помощи уравнений (4). Составляем таблицу (табл.10.1) степеней размерностей всех величин задачи (λ и μ).

Таблица 10.1

Номера величин	Обозначение величины	Масштаб	
		[L]	[P]
1.	y	1	0
2.	x	1	0
3.	l	1	0
4.	B	2	1
5.	q	-1	1

Уравнения (1) будут иметь вид:

$$lz_1 + lz_2 + lz_3 + 2z_4 - lz_5 = 0;$$

$$0z_1 + 0z_2 + 0z_3 + lz_4 + lz_5 = 0;$$

Или $z_1 + z_2 + z_3 + 3z_4 = 0$ и $z_5 = -z_4$.

Из двух уравнений с пятью неизвестными три неизвестных произвольны (но не должны противоречить уравнениям).

1) Принимаем $z_1 = 1; z_2 = 0; z_4 = 0$.

Имеем $z_3 = 0; z_5 = -1$.

Первый критерий подобия $\Pi_1 = y^l \cdot l^{-l} = \frac{y}{l}$.

2) Принимаем $z_1 = 0; z_2 = 1; z_4 = 0$.

Имеем $z_3 = 0; z_5 = -1$

Второй критерий подобия $\Pi_2 = x^l \cdot l^{-l} = \frac{x}{l}$.

3) Принимаем $z_1 = 0; z_2 = 0; z_4 = 1$.

Имеем $z_3 = -1; z_5 = 3$.

Третий критерий подобия $\Pi_3 = l^{-3} \cdot B^l \cdot q^{-l} = \frac{B}{l^3 \cdot q}$.

Полученные критерии независимы.

Найдем критерии подобия вторым способом, пользуясь уравнениями (2). Выбираем два параметра, например l и q . Их размерности удовлетворяют условию (3)

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} = |1 \neq 0.$$

1. Имеем:

$$\left[\frac{y}{l^\alpha q^\beta} \right] = \frac{[L]^1}{[L]^\alpha [L]^{-\beta} [P]^\beta} = [L]^{1-\alpha+\beta} [P]^{-\beta},$$

отсюда

$$1 - \alpha + \beta = 0; \quad -\beta = 0; \quad \alpha = 1$$

Первый критерий подобия

$$\Pi_1 = \frac{y}{l}.$$

2. Имеем

$$\left[\frac{x}{l^\alpha q^\beta} \right] = \frac{[L]^1}{[L]^\alpha [L]^{-\beta} [P]^\beta},$$

отсюда, по аналогии с предыдущим, второй критерий подобия

$$\Pi_2 = \frac{x}{l}$$

3. Имеем

$$\left[\frac{B}{l^\alpha q^\beta} \right] = \frac{[L]^2 [P]^1}{[L]^\alpha [L]^{-\beta} [P]^\beta} = [L]^{2-\alpha+\beta} [P]^{1-\beta}.$$

Отсюда $2 - \alpha + \beta = 0$; $1 - \beta = 0$, следовательно, $\beta = 1$ и $\alpha = 3$.

Третий критерий подобия

$$\Pi_3 = \frac{B}{l^3 \cdot q}.$$

На основании полученных критериев подобия составляем следующие уравнения масштабов

$$\frac{y_c}{l_c} = 1; \quad \frac{x_c}{l_c} = 1; \quad \frac{B_c}{l_c^3 q_c} = 1.$$

Отсюда имеем

$$y_c = x_c = l_c \quad \text{и} \quad B_c = l_c^3 q_c.$$

Задавшись произвольно двумя масштабами, например l_c и q_c , получим остальные масштабы: y_c , x_c и B_c .

Равенство линейных масштабов обеспечивает геометрическое подобие. Масштаб жесткости балки может быть записан в виде

$$B_c = E_c J_c = l_c^3 q_c,$$

где $E_c = \frac{E_M}{E_H}$ – масштаб модуля упругости материала модели, балки; $J_c = \frac{J_M}{J_H}$ – масштаб

момента инерции поперечного сечения модели балки.

Если модель выполнена из материала, отличного от материала балки, то E_c задано, и тогда произвольно может быть взят только еще один масштаб, который назначают из условий возможностей эксперимента так, чтобы нагрузка q была реально выполнимой, сечение

модели было удобным для изготовления и прогибы w , можно было измерить имеющимися приборами с требуемой точностью.

В рассмотренном примере подобие неполное, так как не моделировалось напряженное состояние, форма сечения балки и другие величины. Поэтому сечение модели может быть отличным от сечения балки, лишь бы был сохранен масштаб моментов инерции.

Пример 2. Рассмотрим моделирование тонкой пластинки, нагруженной нагрузкой q (размерность $[L]^{-2}[P]$).

Дифференциальное уравнение пластинки

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D},$$

где x, y – координаты срединной плоскости; w – прогиб пластинки; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; h – толщина пластинки (ширина равна единице); E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластинки.

Полагаем, что модель закреплена по контуру так же, как изучаемая пластинка, и геометрическое подобие в отношении очертания соблюдено.

Пользуясь указанным выше правилом, отбрасываем знаки дифференцирования и делим каждый член уравнения на один из них, например на $\frac{w}{x^2 y^2}$. Получаем следующие независимые критерии подобия

$$\Pi_1 = \frac{y^2}{x^2} \quad \text{и} \quad \Pi_2 = \frac{q x^2 y^2}{D w}.$$

Численный коэффициент 2 в критерии подобия не входит.

Переходя к уравнению масштабов, имеем

$$\frac{y_c}{x_c} = 1 \quad \text{или} \quad y_c = x_c = l_c;$$

$$\frac{q_c l_c^4}{D_c w_c} = 1 \quad \text{или} \quad w_c = \frac{q_c l_c^4}{D_c}.$$

Линейный масштаб обозначаем через l_c .

Рассмотрим подробнее масштаб цилиндрической жесткости

$$D_c = \frac{D_m}{D_n} = \frac{E_c E_n h_c^3 h_n^3}{12(1-\mu_c^2 \mu_n^2)} \cdot \frac{12(1-\mu_n^2)}{E_n h_n^3} = E_c h_c^3 \frac{1-\mu_n^2}{1-\mu_c^2 \mu_n^2}.$$

Отсюда видно, что масштаб D_c непропорционален масштабу коэффициента Пуассона и, следовательно, модель будет подобна натуре только в том случае, если $\mu_c=1$, т.е. $\mu_n=\mu_m$. Это весьма важное условие необходимо учитывать при проектировании модели и выборе для нее материала во всех случаях, когда изучаемые величины зависят от коэффициента Пуассона. Если коэффициенты у модели и природы не равны, то подобие в этих случаях будет приближенным.

Пример 3. Рассмотрим моделирование упругих колебаний с затуханием системы с одной степенью свободы, вызываемых периодической силой. Колебания описываются дифференциальным уравнением

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \kappa \frac{dy}{dt} + sy = P \sin \omega t,$$

где m – колеблющаяся масса $[M]^1$; y – ордината, отсчитываемая от положения равновесия $[L]^1$; t – время $[T]^1$; κ – коэффициент сопротивления $[M]^1 [T]^{-1}$; s – жесткость упругой системы $[M]^1 [T]^{-2}$; P – возмущающая сила $[L]^1 [M]^1 [T]^{-2}$; ω – частота $[T]^{-1}$.

Деля все члены уравнения на первый, получим критерии подобия

$$\Pi_1 = \frac{\kappa t}{m}; \quad \Pi_2 = \frac{st^2}{m}; \quad \Pi_3 = \frac{Pt^2}{m\omega}; \quad \Pi_4 = \omega t.$$

Четвертый критерий подобия получается непосредственно, как безразмерный аргумент. Переходим к уравнению масштабов

$$\frac{\kappa_c t_c}{m_c} = 1; \quad \frac{s_c t_c^2}{m_c} = 1; \quad \frac{P_c t_c^2}{m_c \omega_c} = 1; \quad \omega_c t_c = 1.$$

Из семи масштабов три могут быть взяты произвольно. Допустим, этими масштабами будут m_c, ω_c, t_c . Тогда остальные масштабы найдутся из выражений

$$\kappa_c = \frac{m_c}{t_c}; \quad s_c = \frac{m_c}{t_c^2}; \quad P_c = \frac{m_c \cdot \omega_c}{t_c^2}; \quad \omega_c = \frac{1}{t_c}.$$

Жесткость системы s равна перемещению δ массы m от силы, равной единице. Поэтому, если система представляет собой консольную балку с сосредоточенной массой на свободном конце, то

$$s = \frac{3EI}{l^3},$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции сечения балки; l – длина консоли.

При проектировании модели необходимо соблюсти

$$s_c = \frac{E_c l_c^4}{l_c^3} = E_c l_c.$$

Масштаб E_c зависит от материала модели. Модели могут быть плоскими и объемными. Плоские модели воспроизводят плоские элементы сооружений (например, плоские фермы, рамы и т. д.). Очевидно, такие модели не могут обеспечить полного подобия, так как реальные конструкции всегда объемны. Однако если нас интересует состояние конструкции только в плоскости, то плоское моделирование правомочно.

Объемные модели представляют собой пространственную копию сооружения или его частей. На объемных моделях можно значительно полнее исследовать сооружение, в частности изучить пространственную работу, чему в последнее время в мостостроении уделяется большое внимание. Модели могут быть изготовлены из различных материалов (табл. 10.2), выбор которого зависит от размеров модели и от задач, поставленных перед экспериментами. Материал, прежде всего, должен обеспечить возможность изготовления модели в заданном масштабе и обладать стабильными свойствами в условиях опыта. При исследованиях в об-

ласти упругих деформации материал модели должен быть однородным, упругим и в диапазоне экспериментальных напряжении иметь достаточно высокий предел пропорциональности.

Маломасштабные модели обычно изготавливают из полимерных материалов, преимущественно из органического стекла и неолейкорита. Органическое стекло легко поддается механической обработке и допускает склеивание отдельных частей. Оно выпускается промышленностью в виде листов толщиной от 5 до 150 мм и более, а также в виде отдельных блоков толщиной до 500 мм.

Таблица 10.2

Материалы для маломасштабных моделей	Плотность, г/см ³	Предел прочности на растяжение, МПа 10 ⁻³	Предел пропорциональности, МПа 10 ⁻³	Модуль продольной упругости, МПа 10 ⁻³	Коэффициент Пуассона
1	2	3	4	5	6
Органическое стекло	1,2	500 – 600	300 – 400	(1,9:2,8) 10 ⁴	0,34 – 0,37
Неолейкорит	1,2 – 1,3	600	200 – 400	(2,5:3,5) 10 ⁴	0,34 – 0,35
Целлулоид	1,5	300 – 600	250 – 350	(1,4: 1,6) 10 ⁴	0,4
Эпоксидная смола литая	1,3	1300 – 1500	400 – 500	(3,3:3,5) 10 ⁴	0,35
Текстолит	1,3 – 1,4	100 – 1200	400 – 700	(4:6) 10 ⁴	–
Алюминевые сплавы	2,6 – 3,0	2500 – 6000	800 – 3000	(7:8) 10 ⁵	0,26 – 0,33
Бакелизованная фанера	1,1	700 – 1000	500	(1:1,6) 10 ⁵	–
Гипс	1,0	16 – 32	–	(2:8) 10 ⁵	0,17 – 0,21

Неолейкорит (литой фенопласт) изготавливается в стандартных или фасонных блоках размером до 500 мм. Модели могут быть изготовлены также из эпоксидной смолы Э86 путем заливки ее в формы. Если при этом внутри формы разместить датчики, то можно измерить внутренние напряжения в модели. Использование для моделей (кроме плоских) целлулоида не рекомендуется, так как целлулоиду свойственна заметная ползучесть.

Возможно изготовление маломасштабных моделей из обычных строительных материалов – гипса, цементного раствора, бакелизованной фанеры, алюминия, стали и пр.

При исследованиях на маломасштабных моделях часто возникают затруднения в измерении весьма малых деформаций. Поэтому маломасштабные модели стараются делать из материалов с низким модулем упругости, при котором обеспечивается возможность измерения деформаций имеющимися средствами.

Крупномасштабные модели преимущественно изготавливают из тех же материалов, что и моделируемая конструкция. Размеры модели часто диктуются материалом. Например, модели из бетона не следует делать с элементами толщиной менее 3,0-5,0 см, при которой еще возможно качественное заполнение форм бетонной смесью на мелком заполнителе.

10.2 Исследования на плоских моделях

Исследования на плоских моделях охватывают большой круг вопросов расчета плоских стержневых систем с использованием линий влияния. Из курса строительной механики из-

вестно, что линия влияния усилий X в n раз статически неопределимой системе может быть построена на основании выражения

$$X = - \frac{\Delta_{px}^{(n-1)}}{\delta_{xx}^{(n-1)}},$$

где δ_{xx}^{n-1} – произвольное (достаточно малое) перемещение вдоль удаленной связи x ; Δ_{px}^{n-1} – перемещение точек системы с удельной связью вдоль действия силы $P = 1$, вызванные перемещением δ_{xx}^{n-1} .

Таким образом, для построения, например, линии влияния опорного давления средней опоры двухпролетной неразрезной балки (рис. 10.1) нужно удалить среднюю опору В, дать точке В вертикальное перемещение $\delta_{ВВ}$, замерить прогибы $\delta_{рВ}$ балки АС вдоль направления действия силы $P = 1$ и полученные результаты разделить на $\delta_{ВВ}$. Закрепление опорных сечений А и С должно при этом соответствовать исходной расчетной схеме.

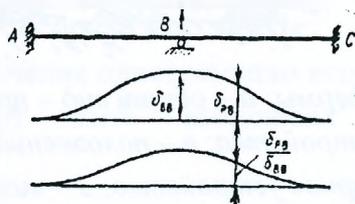


Рисунок 10.1 Линии влияния опорной реакции, полученные на плоской модели.

Для получения линии влияния какого-либо перемещения δ_{ip} следует в точке i приложить усилие S_i , соответствующее перемещению, и ординаты δ_{rs} полученной упругой линии, измеренные вдоль действия единичной силы P , разделить на S_i , т. е.

$$\delta_{ip} = \frac{\delta_{rs}}{S_i}$$

Для плоского моделирования модель обычно вырезают из листа целлулоида. Вследствие весьма малых напряжений в модели (2,0-2,5 Мпа) ползучесть целлулоида не сказывается на результатах эксперимента. Модель располагают на чертежной доске (рис.10.2), укладывая ее на опорные устройства, каждое из которых состоит из деревянной подкладки, обтянутой сверху и снизу сукном, и двух стеклянных пластинок

Между пластинками помещают три стальных шарика, заключенных в стальную обойму. Модель укладывают на верхнюю стальную пластинку к этим обеспечивают свободу деформации модели. Опорные устройства располагают достаточно часто, чтобы модель не провисала. Опорные сечения модели закрепляют так же, как и в моделируемой конструкции.

Для получения линии влияния какого-либо усилия в сечении в нем устанавливают деформометр Беггса, состоящий из двух стальных брусков, стянутых по концам пружинами. Бруски имеют треугольные вырезы, в которые закладывают стальные калибры-вкладыши. Бруски прочно закрепляют на модели.

Первоначально в деформометр устанавливают одинаковые вкладыши (нулевые). Затем модель между брусками деформометра разрезают и в деформометр закладывают вкладыши других размеров, создавая требуемые перемещения δ_{xx}^{n-1} . При этом, заменяя малые вклады-

ши большими, получают перемещение вдоль оси стержня модели, вставляя призматические вкладыши, получают поперечные перемещения, вставляя вкладыши разных размеров, получают поворот сечения.

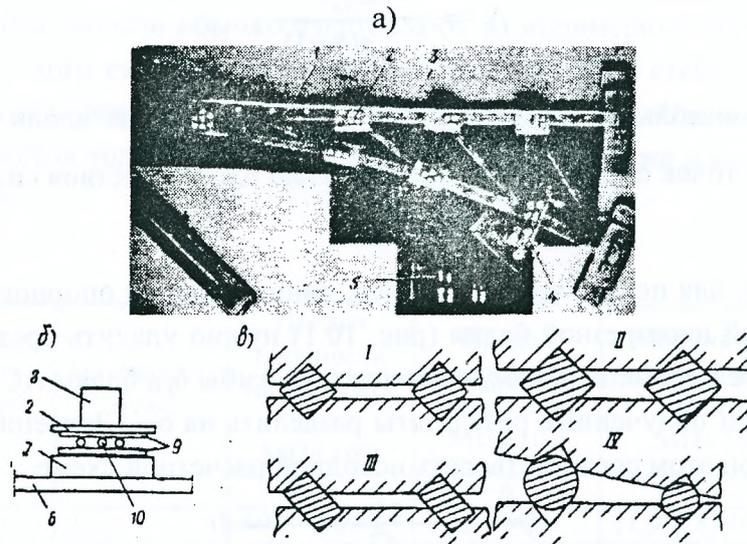


Рисунок 10.2 Модель консольной фермы: а – общий вид – пример модели (фотоснимок); б – схема опорного устройства; в – положение вкладышей деформометра Беггса; 1 – модель; 2 – опорное устройство; 3 – визирные марки; 4 – деформометр Беггса; 5 – вкладыши; 6 – чертежная доска; 7 – деревянная прокладка; 8 – груз; 9 – стеклянные пластинки; 10 – стальные шарики; I – нулевое положение вкладышей; II – продольное перемещение вкладышей; III – то же, поперечное; IV – то же, угловое.

Перемещения Δ_{yx}^{n-1} точек модели замеряют при помощи точных оптических микроскопов.

Для получения линий влияния перемещений к модели прикладывают силу 5, для чего в точке приложения силы модель охватывают хомутом, к которому присоединяют струнку, натянутую грузиком 1,0-0,5 кг. Натяжение струнки осуществляется через блочек, закрепленный на краю стола, на котором расположена модель.

Моделирование на плоских моделях имеет следующую особенность. Модель изготавливают из листа целлулоида постоянной толщины b_m . Если и моделируемое сооружение имеет постоянную толщину b_n , то масштаб модели по толщине будет

$$b_c = \frac{b_m}{b_n}.$$

Если толщина сооружения b_n переменная, то b_c для каждого сечения будет свое. Обычно

$$b_c = \frac{1}{2500} \div \frac{1}{3000}.$$

Размеры модели по длине и высоте назначают с учетом возможностей ее изготовления в пределах

$$l_c = \frac{1}{25} \div \frac{1}{200}.$$

Поскольку материал сооружения и модели тоже заданы, то известны и масштабы:

$$E_c^{сж} = \frac{E_M^{сж}}{E_H^{сж}}; \quad E_c^{изг} = \frac{E_M^{изг}}{E_H^{изг}},$$

где $E_{сж}$ и $E_{изг}$ – модули упругости соответственно при сжатии и изгибе, часто не равные друг другу (например, для конструкций из железобетона).

Переходя к моделированию жесткости отдельных сечений модели получим:

при жесткости по продольной силе

$$B_c^{сж} = \frac{E_M^{сж} \cdot F_M}{E_H^{сж} \cdot F_H} = E_c^{сж} \cdot b_c \cdot h_c^{сж};$$

откуда

$$B_M^{сж} = E_M^{сж} \cdot F_M = B_c^{сж} \cdot E_H^{сж} \cdot F_H$$

аналогично для жесткости при изгибе

$$B_c^{изг} = E_c^{изг} b_c h_c^{изг}.$$

Отсюда следует, что если сечение одновременно испытывает изгиб и сжатие (растяжение), то модель не может быть выполнена подобной натуре, так как $h_c^{сж} \neq h_c^{изг}$ и $h_M^{сж} \neq h_M^{изг}$

В этих случаях приходится ограничиваться приближенным подобием, назначая высоту сечений, работающих преимущественно на сжатие, в масштабе $h_c^{сж}$ (например, высоту гибкой арки), а сечений, работающих преимущественно на изгиб, в масштабе $h_c^{изг}$ (например, высоту балки жесткости). Моделирование высот еще более осложняется, если сечения имеют сложное очертание (двутаверное, коробчатое и т.д.).

Приближенность моделирования отражается на линиях влияния перемещений, поскольку перемещения зависят от жесткости B .

Линии влияния усилий моделируются проще. Так как ординаты линий влияния нормальных (поперечных) сил безразмерны, то масштаб для них $y_c^{N(Q)} = 1$. Ордината линий влияния моментов имеет разность длины, и масштаб их $y_c^M = l_c$.

10.3 Оптический метод исследования напряжений

Для исследования плоского напряженного состояния конструкций широко применяют оптический метод. Некоторые материалы (стекло, целлулоид, желатин, бакелит, фенол, виалит и др.), находясь в плоском напряженном состоянии, обладают свойством двойного преломления светового луча. Это свойство и получило применение для исследования напряжений в моделях, выполненных из перечисленных оптически активных материалов.

Напомним, что, современным воззрениям, световой луч представляет собой электромагнитные колебания в плоскости, нормальной к направлению луча. Эти колебания при проходе луча через особую призму (призма Николя), называемую *поляризатором*, изготовленную из кристаллов исландского шпата, преобразуются в поперечные колебания только в одной плоскости, совпадающей главным сечением призмы. Такой преобразованный луч носит

название плоскополяризованного луча. Если на пути поляризованного луча поставить вторую такую же призму (*анализатор*), то освещенность экрана, поставленного за ней, будет зависеть от угла между главными сечениями обеих призм: при совпадении главных, сечений освещенность экрана будет максимальная, при перпендикулярном расположении анализатор полностью поглотит луч и экран будет черным.

Для исследования напряженного состояния модель из оптически активного материала помещают между поляризатором и анализатором (рис. 10.3).

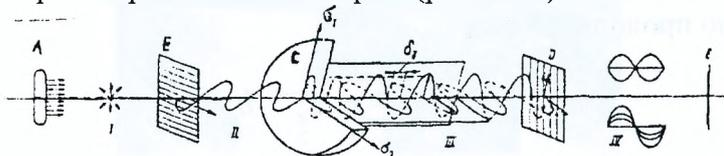


Рисунок 10.3 Схема двойного лучепреломления: A – источник монохроматического луча; B – поляризатор; C – модель; D – анализатор; E – экран; I – монохроматический неполяризованный луч; II – плоскополяризованный луч; III – плоскополяризованные лучи в плоскостях действия главных напряжений σ_1 и σ_2 ; IV – плоскополяризованный луч, падающий на экран (стрелками показаны векторы колебаний, штриховкой плоскости поляризатора и анализатора).

Вышедший из поляризатора плоскополяризованный луч, проходя через модель под влиянием двойного лучепреломления, разлагается на два плоскополяризованных луча, колебания которых протекают в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, совпадающих с направлениями главных напряжений в рассматриваемой точке модели. Вследствие оптической анизотропии материала модели колебания этих лучей протекают в разных фазах с разностью хода

$$\delta_\lambda = c_\lambda t (\sigma_1 - \sigma_2),$$

где c_λ – оптическая постоянная, зависящая от длины волны монохроматического луча, испускаемого источником света, и оптических свойств материала модели; t – толщина модели; σ_1, σ_2 – главные напряжения в рассматриваемой точке.

Проходя через анализатор, лучи снова приводятся к плоскополяризованному, совпадающему с главным сечением анализатора, и интерферируют. В зависимости, от разности хода амплитуда их суммарных колебаний возрастает или уменьшается.

Главные сечения поляризатора и анализатора всегда располагают перпендикулярно друг другу (скрещенные призмы). Энергия луча I , вышедшая из анализатора и попадающая на экран, выражается формулой

$$I = I_\lambda \sin^2 \frac{\delta_\lambda}{2} \sin^2 2\alpha,$$

где I_λ – энергия луча, прошедшего поляризатор; α – угол между главными сечениями призм и направлениями главных напряжений.

Если направления главных напряжений в данной точке совпадают с главными сечениями призм, т.е. если $\alpha=0, \pi/2, \pi, \dots$, то энергия соответствующего луча, попадающего на экран, обращается в нуль и рассматриваемая на экране точка будет темной. В параллельном пучке света на экране изображается вся модель, и черными будут геометрические места то-

чек, т.е. некоторые кривые линии, в каждой точке которых направления главных напряжений совпадают с главными сечениями призм. При вращении призм положение этих кривых будет меняться в зависимости от направления главных напряжений в остальных точках модели. Эти линии носят название изоклин. Их легко зафиксировать, вращая призмы на определенный угол (10 или 5°) и зарисовывая на экране, или фотографируя. По изоклинам графически можно построить траектории главных напряжений (изостаты). Кроме изоклин, на экране будут видны черные линии (полосы), соответствующие

$$\sin \frac{\delta_{\nu}}{2} = \sin \frac{c_{\lambda} t}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = 0,$$

и наиболее освещенные, соответствующие

$$\sin \frac{\delta_{\nu}}{2} = \sin \frac{c_{\lambda} t}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = 1.$$

Первые проходят через точки, для которых

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 0, \frac{2\pi}{c_{\lambda} t}, \frac{4\pi}{c_{\lambda} t}, \dots$$

Для наиболее освещенных линий

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\pi}{c_{\lambda} t}, \frac{3\pi}{c_{\lambda} t}, \frac{5\pi}{c_{\lambda} t}, \dots$$

Таким образом, на экране будут видны линии (полосы), в каждой точке которых разность главных напряжений постоянна. Эти линии называются изохромами. Изохромы также зарисовывают на экран или фотографируют.

Для того чтобы изохромы отделить от изоклин, окрашенных тоже в черный цвет, за поляризатором и перед анализатором ставят скрещенные слюдяные пластинки в «четверть волны». Оптические оси пластинок располагают под углом $\pm 45^\circ$ к главным сечениям призм. Толщину пластинок подбирают так, чтобы плоскополяризованный луч с длиной волны λ , пройдя поляризатор, раскладывался пластинкой на два плоскополяризованных луча с разностью хода $\lambda/4$.

Колебания этих двух лучей, складываясь, протекают уже не в плоскостях, а по кругу, образуя луч с круговой поляризацией.

В луче с круговой поляризацией изоклины настолько быстро появляются и исчезают, что становятся незаметными. Вторая пластинка компенсирует разность хода и возвращает лучу плоскую поляризацию, в результате чего на экране видны только изохромы. Схема полярископа приведена на рис. 10.4.

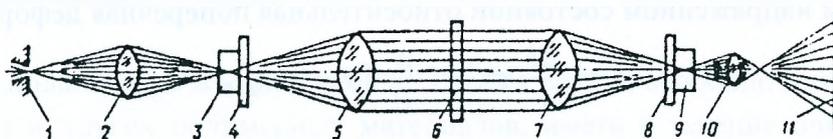


Рисунок 10.4 Схема поляризационной установки (полярископа): 1 – источник света; 2, 5, 7, 10 – линзы; 3 – поляризатор; 4, 8 – пластинки в 1/4 волны; 6 – модель; 9 – анализатор; 11 – экран.

Изохромы в модели консольного выступа, часто встречающегося в конструкциях железобетонных мостов для опирания подвесных балок, показаны на рис. 10.5 а.

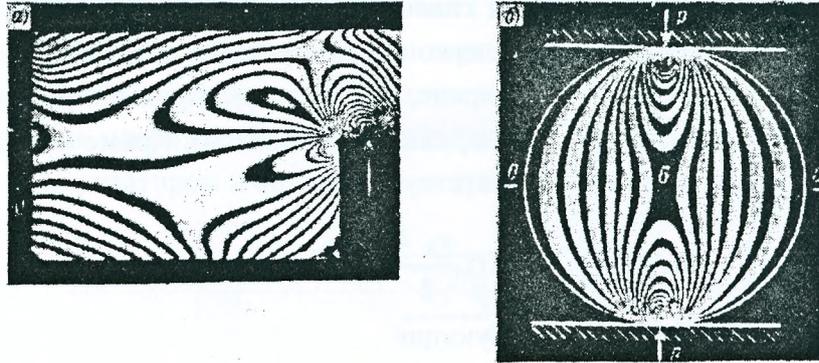


Рисунок 10.5 Изохромы (а) в консольном выступе при действии сосредоточенной силы и эталонный диск (б).

Для численного определения разности главных напряжений ведут счет изохром (можно также воспользоваться специальным устройством – компенсатором). Изохромы, для которых

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2\pi n}{c_\lambda t},$$

называют изохромами n -го порядка ($n = 0, 1, 2, \dots$). Изохромы тарируют на образце из того же материала и такой же толщины t , что и модель. Образец рекомендуется выполнять в виде круглого диска и сжимать его сосредоточенными силами (рис. 10.5 б). Разность главных напряжений в образце диаметром d , соответствующая n -й изохrome, будет

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0^{(t)} n.$$

Оптическую постоянную материала находят по формуле

$$\sigma_0^{(t)} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{P}{dtn}.$$

Изохрома, расположенная на контуре, имеет нулевой порядок. Это позволяет определить порядок изохромы в середине образца, (на рис. 10.5б – $n=6$) и по ней найти $\sigma_0^{(t)}$.

Оптический метод дает возможность определить направления главных напряжений и их разность, а, следовательно, и величину наибольшего касательного напряжения

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

Для определения значений главных напряжений необходимы другие методы исследования. Один из них основан на измерении толщины нагруженной модели.

При плоском напряженном состоянии относительная поперечная деформация модели

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} = -\frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2),$$

откуда

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \cdot \frac{\Delta t}{t}.$$

Здесь E – модуль упругости материала модели; μ – коэффициент Пуассона; Δt – изменение толщины модели.

Изменение толщины модели в любой ее точке может быть замерено различными приборами, например мессурами. Зная сумму и разность главных напряжений, легко найти каждое из них.

10.4 Исследования на объемных моделях

На маломасштабных объемных моделях изучают пространственную работу сооружения – распределение внутренних усилий между отдельными частями сооружения, а также их напряженное состояние под воздействием различно приложенных сил и других факторов (температуры, перемещений опорных закреплений и т.д.). Как правило, исследуют модель в упругой стадии работы материала, реже в области пластических деформаций.

Модели изготавливают преимущественно из органического стекла (рис. 10.6) по возможности соблюдая полное геометрическое подобие.

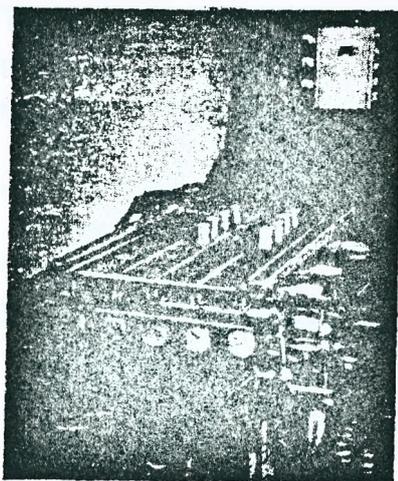


Рисунок 10.6 Испытание модели из органического стекла балочного железобетонного пролетного строения.

Масштаб модели зависит от размеров моделируемого сооружения, размеров испытательного стенда, способов загрузки модели, наличия тех или иных приборов для замера деформаций и других условий эксперимента. Линейный масштаб моделей мостовых конструкций обычно составляет от 1/10...1/30 до 1/50...1/100. Назначая размеры модели, проверяют отдельные ее элементы на устойчивость и в процессе опыта не доводят их до состояний, близких к критическим. Следует иметь некоторый запас (1,5-2,0 раза) в напряжениях по отношению к минимальным напряжениям ползучести, чтобы быть уверенным в упругой работе модели.

Модель располагают на жестком стенде. Весьма важно, особенно для моделей из органического стекла и других полимерных материалов, иметь в течение опытов неизменную температуру в лаборатории (величина упругих постоянных органического стекла изменяется в зависимости от температуры).

Для нагружения модели используют загрузочные устройства, которые должны достаточно точно воспроизводить соответствующую нагрузку на сооружение, обеспечить воз-

возможность ступенчатого увеличения нагрузки и возможность многократного ее приложения, а также обеспечивать независимость действия различных нагрузок.

Сосредоточенные силы прикладывают к модели при помощи груза в виде тарированных стальных гирь. Для точной фиксации приложения силы между моделью и грузами располагают толкатель – стальной стержень с заостренным концом (рис. 10.7, а), который удерживают в нужном положении (например, вертикальном) направляющими устройствами. Чтобы в модели не возникли местные напряжения, острие толкателя опирают на штамп из резины или картона. Для точной фиксации приложения сил вокруг модели устраивают «обноску», жестко закрепленную на испытательном стенде. В некоторых случаях нагрузка может быть приложена подвешиванием гирь к модели при помощи тонких стальных струн. Равномерно распределенную нагрузку удобно создавать при помощи резиновых замкнутых емкостей, наполненных водой и сверху загружаемых через распределительную плиту (рис. 10.7, б). При необходимости загрузки по более сложному закону прибегают к передаче сосредоточенной силы через систему рычагов. Для этого нагрузку разбивают на отдельные участки одинаковой ширины и в центре тяжести каждого участка прикладывают равное ему сосредоточенное давление. Давление передают на модель через жесткие штампы (рис. 10.7, в).

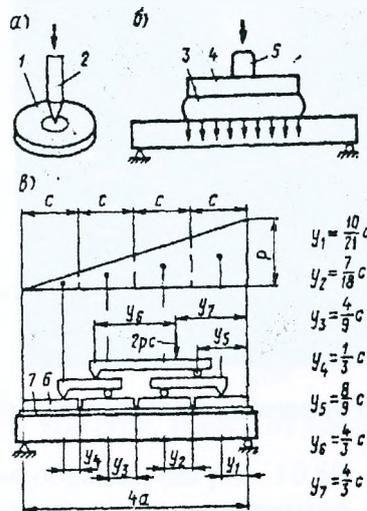


Рисунок 10.7 Схемы загрузочных устройств: 1 – штамп из резины или картона; 2 – толкатель; 3 – резиновая емкость с водой; 4 – жесткая плита; 5 – груз; 6 – жесткий штамп; 7 – упругая прокладка (резина).

Особую задачу представляет создание в модели объемных сил, например веса сооружения. Требование полного подобия с учетом веса (плотности материала) приводит к необходимости создания модели тех же размеров и из того же материала, что и моделируемое сооружение, т.е. к испытаниям натурного сооружения.

Действительно, напряжения σ_c от собственного веса моделируются по формуле

$$\sigma_c = \frac{\sigma_M}{\sigma_H} = \frac{\frac{g \rho_M l_M^3}{l_M^2}}{\frac{g \rho_H l_H^3}{l_H^2}} = \frac{\gamma_M l_M}{\gamma_H l_H} = \gamma_c l_c,$$

где σ_m, σ_n – напряжения в модели и в натуре; g – ускорение силы тяжести; ρ_m, ρ_n – плотность материалов модели и натуре; γ_m, γ_n – то же, удельный вес материалов; l_m, l_n – то же, линейный размер.

При исследовании земляных сооружений, грунтовых оснований фундаментов и других элементов необходимо, чтобы материал модели и натуре были одинаковыми ($\rho_m = \rho_n$), и тогда, при $\sigma_c = 1$ имеем $l_c = 1$, что осуществить не всегда возможно. В этих случаях обычно прибегают к моделированию ускорения

$$\frac{a \rho_m}{g \rho_n} = \frac{a}{g} = a_c,$$

где a – ускорение, сообщаемое модели.

Тогда при $\sigma_c = 1$ имеем $l_c = \frac{1}{a_c}$.

Если, например, модели сообщить ускорение в 20 раз большее ускорения силы тяжести, то модель будет в 20 раз меньше моделируемого сооружения.

Моделирование ускорения осуществляется центробежным моделированием на центрифугах. Центрифуга (рис. 10.8) состоит из электромотора 1, коробки скоростей 2, трансмиссии 3, редуктора 4, вертикального вала 5, коромысла 6 и двух кареток с 7 моделями.

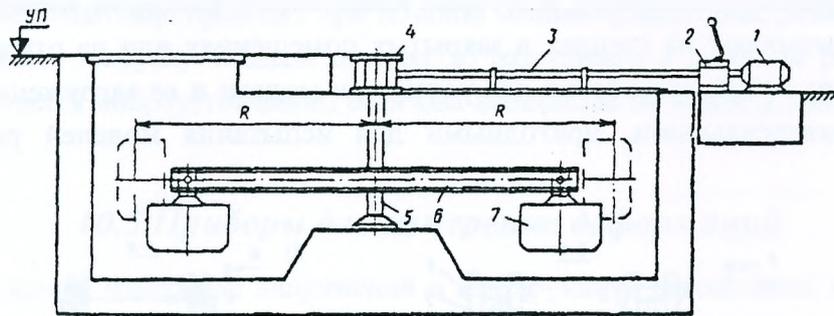


Рисунок 10.8 Схема центрифуги.

При вращении коромысла каретки занимают положение, близкое к горизонтальному, и развивающиеся центробежные силы воспроизводят объемные силы (вес сооружения). Угловая скорость ω вращения коромысла, необходимая для моделирования с линейным масштабом l_c , равна $\omega = \sqrt{l_c \cdot g / R}$, что соответствует числу оборотов в секунду $n = \omega / 2\pi$ (здесь R – расстояние от оси вращения до центра модели). Центрифуги имеют параметры: масштаб моделирования – от 5 до 570; радиус вращения – от 0,25 до 5,5 м; наибольшее число оборотов в 1 мин – от 40 до 1440; размеры кареток – от 0,2x0,1x0,1 до 1,5x0,8x0,8 м.

Модели устанавливают в каретки с наклеенными датчиками сопротивления и другими измерительными приборами. Провода от приборов прокладывают по коромыслу и вертикальному валу и припаивают к кольцам токосъемника, позволяющего фиксировать показания до 50 приборов. Последние модели центробежных машин оснащены телевизионными установками, при помощи которых можно визуально наблюдать эксперимент и снимать его на кинолентку.

Центробежное моделирование позволяет изменять время протекания тех или иных процессов. Так, масштаб времени протекания вязких деформаций (например, сжатие грунтов

под фундаментами) $t_c = l^2 c$. Таким образом, если на центрифуге обеспечить $l_c = 100$, то $t_c = 10000$ и центрифугирование в течение 10 ч будет соответствовать 11 годам работы моделируемого сооружения.

Деформации и напряжения в маломасштабных моделях измеряют приборами, обеспечивающими необходимую точность. Напряжения наиболее удобно измерять проволочными датчиками; в местах большой концентрации напряжений и на поверхностях большой кривизны устанавливают индуктивные или струнные тензометры с минимальной базой измерения, а также пневматические тензометры высокой чувствительности.

До испытаний необходимо исследовать механические свойства материала модели и установить режим испытаний: температуру и влажность воздуха в течение эксперимента, последовательность загрузки, время взятия показаний приборов, считая от момента загрузки, и т.д. Для получения наиболее достоверных результатов каждую модель следует испытывать несколько раз.

Крупномасштабные модели изготовляют из того же материала, что и моделируемая конструкция, и изучают на них работу отдельных элементов и узлов сооружения. Редко удается создать модель всего сооружения и испытать ее, так как такие модели громоздки и дороги. Масштаб моделей принимают 1:10...1:5 и более; желательно испытывать модели, выполненные в натуральную величину, в которых масштабный фактор не имеет значения.

Модели испытывают на стендах в закрытых помещениях или на открытой площадке. Стенд представляет собой устройство для установки модели и ее загрузки. Стенды стремятся делать универсальными, пригодными для испытания моделей разных размеров (рис. 10.9).

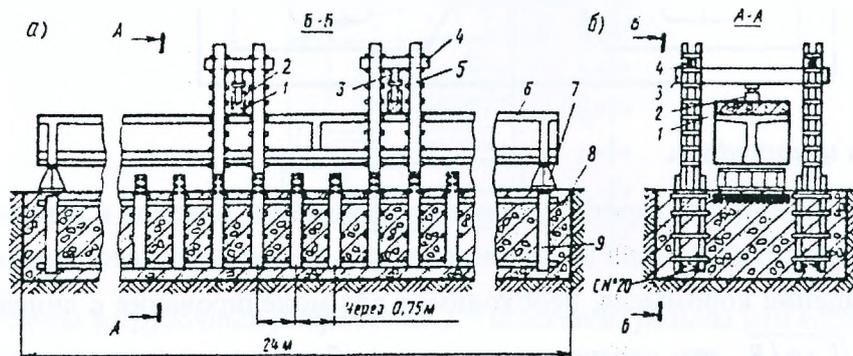


Рисунок 10.9 Схема стенда для испытаний крупномасштабных моделей длиной до 24 метров: 1 – загрузочное устройство; 2 – гидравлический домкрат; 3 – наддомкратная балка; 4 – упорная балочка; 5 – нагрузочные колонны; 6 – испытываемая балка; 7 – опорная часть; 8 – фундамент стенда; 9 – силовые анкеры.

Стенд состоит из мощного фундамента, в который заделаны силовые анкеры, к которым болтами присоединяют нагрузочные колонны. Модель, например, железобетонную балку устанавливают на опорные части и при помощи системы балок загружают гидравлическими домкратами. Давление от домкратов передают на модель через упругие прокладки (дубовые брусья).

Детали и узлы конструкций небольших размеров испытывают на прессах и разрывных машинах, установленных в машинных залах лабораторий.

Испытание крупных моделей статической нагрузкой обычно направлено на изучение работы конструкции в упругой и в пластической областях с доведением моделей до разрушения. Испытание в упругой (пластической) стадии соответствует работе конструкции в эксплуатационных условиях; разрушение модели позволяет судить о предельной несущей способности конструкций и о коэффициенте запаса ее прочности.

Модель загружают постепенно, увеличивая нагрузку ступенями, равными $1/5-1/10$ предельной (разрушающей) нагрузки. Каждую ступень выдерживают некоторое время, необходимое для затухания деформации, и затем снимают показания приборов. После нескольких ступеней загрузки модель разгружают и испытания повторяют вновь. Разгрузка модели и последующее ее нагружение позволяет выяснить, в какой из стадий напряжена модель – в упругой или пластичной. При нагружениях, близких к разрушающим, измерительные приборы снимают и модель доводят до разрушения.

В процессе испытаний модель тщательно осматривают и фиксируют появившиеся трещины, сколы и другие дефекты, а после разрушения осмотром устанавливают причину потери прочности (разрушение от нормальных, главных, касательных напряжений, потери устойчивости и т. д.).

В мостах большое значение имеют испытания моделей конструкций на усталостную (вибрационную) прочность. Эти испытания рекомендуется проводить на моделях в масштабе, близком 1:1. Вибрационное испытание проводят при помощи машин-пульсаторов, развивающих периодически изменяющуюся нагрузку. Модели доводят до разрушения в заданном режиме нагружения. Конструкция считается виброустойчивой, если она выдержала не менее 2 миллионов циклов нагружения.

10.5 Приборы для измерения деформаций

Непосредственное измерение напряжений в конструкциях невозможно, и для определения их приходится прибегать к косвенным методам. Наиболее простой и распространенный из них – метод, при котором на некоторой длине измеряют линейную деформацию и по ней, зная модуль упругости материала, по закону Гука вычисляют напряжение. Так как напряжения часто распределены по длине элемента неравномерно (например, при изгибе), то деформации приходится измерять на участках небольшой длины, и чем меньше длина участка, тем точнее будут найдены напряжения. На малых участках деформации весьма малы, и приборы для их измерения должны обеспечивать значительное увеличение – порядка 1000 и более раз – и обладать высокой точностью.

Для лабораторных исследований, требующих высокой точности применяют пневматические тензометры (рис. 10.10).

В них сжатый воздух 1 после очистки фильтрами от примесей и влаги поступает через кран 2 в трубку 4, опущенную в сосуд 3 с водой. Воздухом вода вытесняется из трубки и устанавливается в ней на некоторой глубине Н. Обычно давление воздуха назначают равным 10-12 кПа, что соответствует глубине $H=1,0-1,2$ м. По гибкому шлангу 5 воздух через отверстие главного сопла 13 диаметром в несколько десятых миллиметра поступает в пневматический тензометр 12, установленный призмами 10 и 9 на поверхности 11 исследуемой детали, и выходит наружу через измерительное сопло 8. Перед отверстием измерительного сопла на

расстоянии $d=0,03$ мм расположена пластинка, закрепленная на подвижной ножке тензометра.

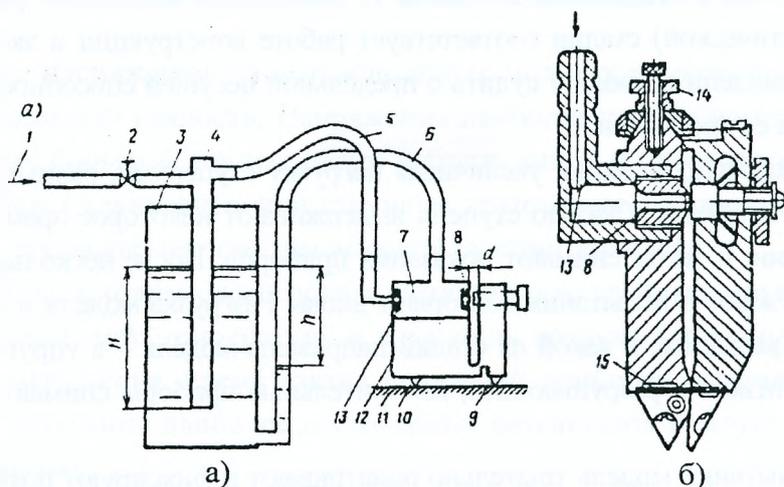


Рисунок 10.10 Схема пневматического тензометра.

В камере 7 между соплами создается давление $h < H$, зависящее от размера d , которое в свою очередь зависит от величины измеряемой деформации. Давление h измеряют водяным манометром, соединенным с камерой тензометра гибким шлангом 6. Зависимость между давлением h и измеряемой деформацией предварительно устанавливают тарировкой прибора.

Конструкция тензометра с базой 2 мм показана на рис 10.10б. Арретирующие устройства 14 служат для точной установки прибора с заданной базой. Листовой шарнир 15 расположен так, что обеспечивается механическое увеличение измеряемой деформации в 3 раза. Увеличение пневматического преобразователя составляет около 70000; таким образом, общее увеличение прибора может быть доведено до 200000.

Пневматические тензометры применяют для исследований на маломасштабных моделях концентраций напряжений, деформаций поверхностей большой кривизны и в других аналогичных случаях.

Для измерения линейных перемещений небольшой величины пользуются мессурами (индикаторами), а для измерения угловых перемещений служат клинометры Стопани и маятниковые клинометры Аистова.

Из электрических приборов для измерения деформаций широко используются датчики сопротивления подключенные к тензометрическим установкам типа АИД, которые не менее широко применяются и при испытании мостов (см. п.9.5).

Соответственным включением датчиков в смежные плечи моста можно измерить любые элементарные деформации и напряжения, выделив их из сложного напряженного, состояния. Рассмотрим четыре простейших случая.

1. Растяжение (сжатие). На поверхность испытываемой детали вдоль линейной деформации наклеивают рабочий датчик D_p (рис. 10.11 а) и включают его в плечо моста R_1 . На образец, выполненный из того же материала, что и деталь, и находящийся с ней в одинаковых температурных условиях, но не подверженный силовым воздействиям и деформациям, наклеивают второй датчик D_k , называемый компенсационным. Компенсационный датчик включают в плечо R_2 . Если сопротивление рабочего датчика R_1 , коэффициент чувствитель-

ности S_1 , продольная деформация детали ε_1 , а температурная деформация ε_{1t} , то приращение сопротивления датчика будет

$$\Delta R_1 = s_1 R_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_{1t}).$$

Приращение сопротивления компенсационного датчика

$$\Delta R_2 = s_2 R_2 \varepsilon_{2t}$$

где R_2 и s_2 – сопротивление и коэффициент чувствительности компенсационного датчика; ε_{2t} – температурная деформация образца.

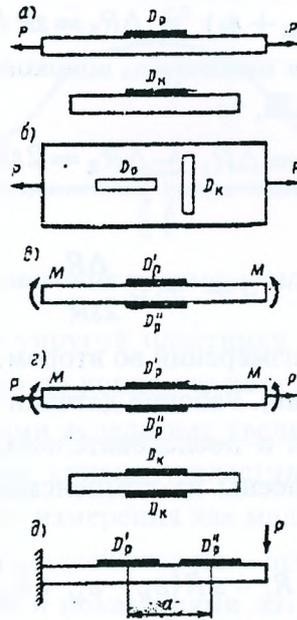


Рисунок 10.11 Схемы установки датчиков при измерении деформации.

Так как датчики включены в смежные плечи моста, гальванометр покажет разность приращений их сопротивлений, т.е.

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2$$

Если $R_1 = R_2 = R$, $s_1 = s_2 = s$ и $\varepsilon_{1t} = \varepsilon_{2t}$, то $\Delta R = s R \varepsilon_1$.

и напряжение в детали будет

$$\sigma = E \varepsilon_1 = E \frac{\Delta R}{R s}$$

Таким образом, компенсационный датчик автоматически исключает температурные деформации испытываемой детали, что совершенно необходимо при испытании конструкций.

Компенсационный датчик может быть наклеен и на испытываемую деталь, но перпендикулярно к измеряемой продольной деформации (рис. 10.11 б). В этом случае

$$\Delta R_2 = -s R \mu \varepsilon_1 + s R \varepsilon_{2t},$$

где μ – коэффициент Пуассона материала детали.

Гальванометром будет зафиксировано приращение

$$\Delta R = s R \varepsilon_1 (1 + \mu),$$

и тогда

$$\sigma = E \frac{\Delta R}{sR(1+\mu)}$$

2. Изгиб. Если рабочий датчик наклеен на растянутую (сжатую) поверхность изгибаемой детали, а компенсационный датчик на компенсационный образец, то имеем предыдущий случай, и напряжения от изгиба в крайнем волокне найдутся по предыдущей формуле.

Оба датчика могут быть наклеены на деталь в качестве рабочих (рис. 10.11 в) и включены в смежные плечи R_1 и R_2 . Тогда

$$\Delta R_1 = sR(\varepsilon_N + \varepsilon_t) \text{ и } \Delta R_2 = sR(-\varepsilon_N + \varepsilon_t);$$

Если деформация верхнего ε_N и нижнего ε_n волокон детали равны между собой, что будет при симметричном сечении детали, то

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = 2sR\varepsilon_N$$

и

$$\sigma = \pm E \frac{\Delta R}{2sR}$$

Отсюда следует, что точность измерений во втором случае в 2 раза выше, чем в первом.

3. Изгиб и растяжение (сжатие). Рабочие датчики $D'_p(R'_1)$ и $D''_p(R''_1)$ наклеены на противоположных поверхностях детали и последовательно включены в плечо R_1 (рис. 10.12); два компенсационных датчика наклеены на компенсационный образец и последовательно включены в плечо R_2 . Имеем:

$$\Delta R'_1 = sR(\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_t);$$

$$\Delta R''_1 = sR(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_t);$$

$$\Delta R_2 = 2sR\varepsilon_t,$$

где ε_N – деформации детали от продольной силы; ε_M – то же, от момента.

Суммарное показание датчиков будет

$$\Delta R = \Delta R'_1 + \Delta R''_1 - \Delta R_2 = sR\varepsilon_N.$$

Таким образом, при расположении датчиков по рис. 10.11 г исключается влияние изгибающего момента и измеряется только воздействие продольной силы. Если датчики D'_p и D''_p расположить по рис. 10.11 г, но включить в смежные плечи моста R_1 и R_2 и не ставить компенсационных датчиков, то при симметричном сечении

$$\Delta R_1 = sR(\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_t) \text{ и } \Delta R_2 = sR(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_t);$$

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = -2sR\varepsilon_M,$$

т.е. в этом случае измеряются только деформации от изгиба, а влияние продольной силы исключается.

4. Поперечная сила. Для измерения поперечной силы на поверхность детали наклеивают два датчика на взаимном расстоянии a (рис. 10.11 д) и включают их в смежные плечи. Каждый из датчиков замерит деформации изгиба ε'_M и ε''_M соответствующие изгибающие моменты:

$$M' = \varepsilon'_M EW; \quad M'' = \varepsilon''_M EW.$$

Гальванометр зафиксирует разность показаний датчиков, т.е.

$$\Delta M = M' - M'' = (\epsilon'_m - \epsilon''_m) EW,$$

и по теореме Журавского имеет

$$Q = \frac{\Delta M}{a} = \frac{\epsilon'_m - \epsilon''_m}{a} EW = \frac{\Delta R}{sR} \cdot \frac{EW}{a}.$$

Проволочные тензодатчики с успехом применяют не только для измерения деформации (напряжений), но и для измерения перемещений, сил, давлений (месдозы) и т. д. В качестве примера принципиальная схема прибора для измерения перемещений показана рис.10.12.

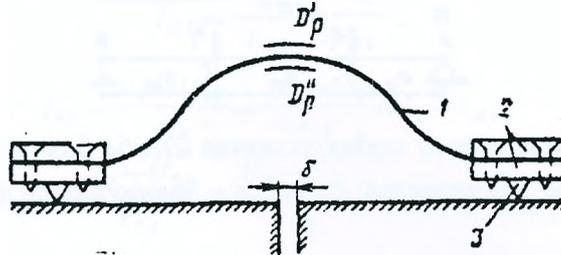


Рисунок 10.14 Схема прибора для измерения перемещений.

Прибор состоит из изогнутой упругой пластинки 1, в центральной части которой наклеены датчики D'_p и D''_p . Пластинка по концам зажата планками 2, снабженными керном 3. Изменение расстояний между кернами вследствие увеличения или уменьшения зазора δ между деталями конструкции изменяют кривизну пластинки, что фиксируется датчиками. Такие приборы могут быть созданы для измерения как малых перемещений порядка 1 мк, так и больших, в несколько сантиметров; достоинства их – простота устройства, линейная зависимость между измеряемой величиной и показаниями датчиков в достаточно широких пределах.

Датчики сопротивления обладают многими достоинствами, из которых в первую очередь следует отметить простоту конструкций, возможность установки в труднодоступных местах, универсальность применения и, возможность дистанционного наблюдения за их показаниями.

10.6 Аналоговое моделирование

Можно указать большое число процессов, принципиально различных по содержанию, но протекающих по одним и тем же математическим законам. Для расчета конструкций наибольшее применение имеют аналогии электрические и гидравлические, на которых и осуществляют моделирование.

Электрическое моделирование основано на тождественности законов электрических явлений законам строительной механики и теории упругости.

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 10.13) из проводника АВ, к которому в точках А, 1, 2 и В подключен внешний проводник с двумя источниками тока E_1 и E_2 .

Обозначим: I_1, I_2 – токи, поступающие от источников E_1 и E_2 ; I_{A1}, I_{12}, I_{2B} – токи в участках проводника АВ; r_{A1}, r_{12}, r_{2B} – сопротивление проводника АВ на участках. Сопротивление внешнего проводника считаем равным нулю.

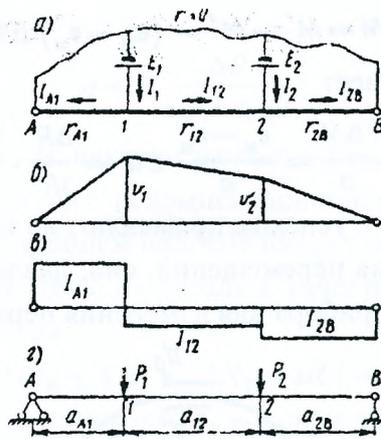


Рисунок 10.13 Схема электрического моделирования изгиба балки: а – схема электрической цепи; б – эпюра напряжений в цепи; в – эпюра токов в цепи; г – моделируемая балка.

По первому закону Кирхгофа для точек 1 и 2 можно написать:

$$I_{12} = I_1 - I_{A1},$$

$$I_{2B} = I_2 + I_{12} = I_2 + I_1 - I_{A1}.$$

По второму закону Кирхгофа для АВ и внешнего проводника имеем:

$$I_{A1} r_{A1} - I_{12} r_{12} - I_{2B} r_{2B} = 0$$

Или

$$I_{A1} r_{A1} (I_{A1} - I_1) r_{12} + (I_{A1} - I_1 - I_2) r_{2B} = 0.$$

Раскрывая скобки, получим

$$I_{A1} R_{AB} - I_1 R_{1B} - I_2 R_{2B} = 0$$

откуда

$$I_{A1} = \frac{I_1 \cdot R_{1B}}{R_{AB}} + \frac{I_2 \cdot R_{2B}}{R_{AB}},$$

где

$$R_{AB} = r_{A1} + r_{12} + r_{2B};$$

$$R_{1B} = r_{12} + r_{2B};$$

$$R_{2B} = r_{2B}.$$

Аналогично можно получить

$$I_{B1} = \frac{I_1 R_{1A}}{R_{AB}} + \frac{I_2 R_{2A}}{R_{AB}}.$$

Напряжение U в проводнике АВ определяется по закону Ома.

На участке $A=1$

$$U_{ax} = I_A r_{Ax}.$$

На участке 1–2

$$U_{1x} = U_1 - I_{12} r_{1x} = I_{A1} r_{A1} - (I_1 - I_{A1}) r_{1x} = I_{A1} (r_{A1} - r_{1x}) - I_1 r_{1x}$$

На участке 2–B

$$\begin{aligned} U_{2x} &= U_2 - I_{2B} r_{2x} = I_{A1} (r_{A1} + r_{12}) - I_1 r_{12} - (I_1 + I_2 - I_{A1}) r_{2x} = \\ &= I_{A1} (r_{A1} + r_{12} + r_{2x}) - I_1 (r_{12} + r_{2x}) - I_2 r_{2x}. \end{aligned}$$

Из этих выражений следует:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= \frac{U_{Ax}}{r_{Ax}} = \frac{U_1}{r_{A1}}; \\ I_{12} &= \frac{U_1 - U_{1x}}{r_{1x}} = \frac{U_1 - U_2}{r_{12}} = I_1 - I_{A1}; \\ I_{2B} &= \frac{U_2 - U_{2x}}{r_{2x}} = \frac{U_2 - U_B}{r_{2B}} = I_2 + I_1 - I_{A1}. \end{aligned}$$

Эпюры напряжений и токов в проводке АВ – см. рис. 10.13. Легко видеть, что для свободно опертой балки, нагруженной силами P_1 и P_2 , эпюра изгибающих моментов будет аналогична эпюре напряжений в проводнике АВ, а эпюра поперечных сил – эпюре токов. Таким образом, в рассмотренном случае напряжения в некотором масштабе выражают изгибающие моменты, а токи – поперечные силы. Масштабные коэффициенты, связывающие электрическую схему – модель с изгибаемой балкой, будут: для сил – $c_p = P/I$; для длин – $c_l = l/l$ и моментов – $c_m = c_p c_l$.

Очевидно, что изложенный способ моделирования свободно опертой балки легко распространить на случай действия любого числа сосредоточенных сил. Если на балку действует распределенная нагрузка, то последнюю нужно заменить сосредоточенными силами, разбив ее на ряд участков.

Деформации балки АВ моделируются той же электрической схемой. Для того, следуя графоаналитическому методу строительной механики, разбиваем эпюру напряжений V на отдельные участки и заменяем их сосредоточенными токами, что аналогично загрузению балки АВ фиктивной нагрузкой M/EI . Далее по предыдущему находим эпюру напряжений в проводнике, которая в некотором масштабе дает эпюру прогибов балки АВ, распределение же токов по длине провода будет аналогично эпюре углов поворота.

Действие на балку изгибающих моментов моделируется подведением к проводнику АВ соответствующих напряжений. Так, например, если в опорных сечениях балки АВ действуют опорные моменты M_A и M_B , то к концу проводника следует подвести напряжения

$$U_A = \frac{1}{c_m} M_A; \quad U_B = \frac{1}{c_m} M_B.$$

На таком принципе можно создать электрические модели для статического и динамического расчета самых разнообразных схем сооружений.

Для решения задач, описываемых дифференциальными уравнениями эллиптического типа, применяют моделирование электрических полей на сплошном электропроводном слое. Этот способ основан на методе электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), указанном впервые в середине прошлого века Максвеллом и детально разработанном в 1918–1922 гг.

акад. Н.Н. Павловским. Метод ЭГДА широко применяют в гидротехнике для фильтрационных расчетов плотин и других гидротехнических сооружений, в аэродинамике, теплотехнике, теории упругости и т. д. Рассмотрим применение способа ЭГДА к решению задачи о кручении.

Из теории упругости известно, что задача о кручении призматического стержня сводится к решению дифференциального уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0$$

при условии на контуре

$$\psi = \frac{x^2 + y^2}{2}$$

(ось Z направлена по оси стержня).

Если функция ψ известна, то вводя новую функцию (функцию Прандтля)

$$F(x, y) = G\psi \left[\psi(x, y) - \frac{x^2 + y^2}{2} \right]$$

найдем напряжения τ и крутящий момент M по формулам:

$$\tau_{xz} = \frac{\partial F}{\partial y} \quad \text{и} \quad \tau_{yz} = -\frac{\partial F}{\partial x};$$

$$M = \iint [\tau_{yz} x - \tau_{xz} y] dx dy.$$

Здесь G – модуль упругости при сдвиге; ψ – угол закручивания на единицу длины стержня.

Если крутящий момент M задан, то угол закручивания найдется по формуле

$$\psi = \frac{M}{G \iint \left[\frac{\partial \psi}{\partial x} x + \frac{\partial \psi}{\partial y} y - (x^2 + y^2) \right] dx dy}$$

Если к электропроводному слою постоянной толщины подключить шинами источник постоянного тока, то в слое установится электрическое поле; плотность тока в направлении координатных осей будет равна

$$j_x = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad j_y = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

и в каждой точке-плоскости

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0.$$

Здесь ϕ – электрический потенциал; σ – коэффициент электропроводности.

Таким образом, если на границах электропроводного слоя создать потенциалы $\phi_s = (x^2 + y^2)/2$ потенциал ϕ электропроводного слоя будет аналогичен функции ψ кручения и, измеряя значение ϕ , можно в некотором масштабе моделирования найти функцию ψ и далее τ_{xz} , τ_{yz} и ψ .

В качестве электропроводного слоя в интеграторах ЭГДА применяют или жидкие электролиты, или электропроводную бумагу. Электропроводная бумага, выпускаемая отечест-

венной промышленностью, значительно упрощает моделирование и обеспечивает более точные результаты. Бумагу выпускают рулонами шириной от 50 до 810 мм с омическим сопротивлением от 20 до 84000 Ом (на площадь бумаги 10x10 см).

При моделировании кручения (или какого-либо другого стационарного процесса) из бумаги вырезают в некотором масштабе поперечное сечение стержня, укладывают его на рабочую поверхность стенда-стола интегратора и к контуру специальными шинами подводят постоянный ток с заданным на контуре потенциалом. Измеряя значение потенциалов внутри контура, можно зарисовать линии с равными потенциалами (эквипотенциальные линии), по которым затем, пользуясь приведенными выше формулами, легко получить численным дифференцированием все характеристики кручения. Для измерения потенциала в различных частях модели служит карандаш-игла с коммутирующим шнуром.

Электрическая схема интегратора ЭГДА (рис.10.14) построена на использовании моста Уитстона, два плеча которого представляют градуированные потенциометры, а два других – модель из электропроводной бумаги; роль среднего плеча (диагонали) выполняет измерительная игла, присоединенная к гальванометру. Интегратор питается от сети переменного тока, который понижающим трансформатором и выпрямителем трансформируется в постоянный ток с напряжением 3-30 В.

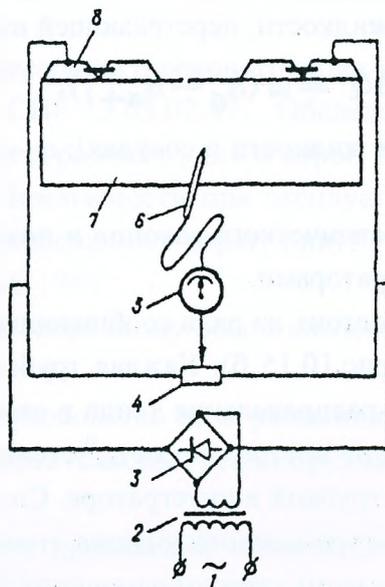


Рисунок 10.14 Принципиальная схема интегратора ЭГДА: 1 – сеть переменного тока; 2 – понижающий трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – градуированный потенциометр; 5 – гальванометр; 6 – измерительная игла; 7 – модель из электропроводной бумаги; 8 – шина.

Для изучения нестационарных процессов широко используют гидравлический интегратор В.С. Лукьянова (рис.10.15).

К нестационарным относят, прежде всего, тепловые процессы, например оттаивание грунтов, распределение тепла и связанных с ним напряжений в массивных конструкциях и т.д. Гидравлический интегратор основан на следующих исходных положениях.

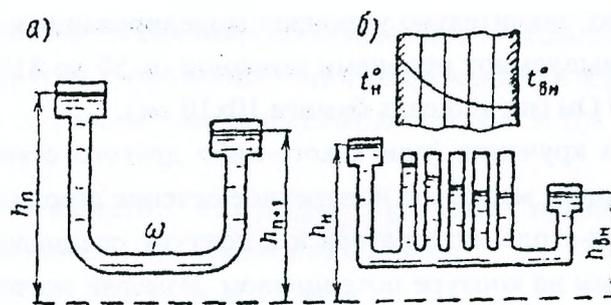


Рисунок 10.17 Схема гидроинтегратора.

Если в заданный момент времени температура близлежащих точек равна t_n^0 и t_{n+1}^0 , то количество тепла ΔQ в единице объема будет равно

$$\Delta Q = c [t_n^0 - t_{n+1}^0],$$

где c – теплоемкость.

При изменении t_n^0 или t_{n+1}^0 будет меняться и ΔQ , т.е. в рассматриваемом объеме будет тепловой поток.

Рассмотрим теперь течение жидкости между сосудами, расположенными в разных уровнях (рис. 10.15 а). Количество жидкости, перетекающей из одного сосуда в другой

$$\Delta Q' = \omega (h_n - h_{n+1}),$$

где h_n и h_{n+1} – напоры (уровни жидкости в сосудах); ω – площадь поперечного сечения трубы, соединяющей сосуды.

Совпадение теплового и гидравлического законов и позволяет тепловые процессы моделировать гидравлическими интеграторами.

Гидравлический интегратор состоит из ряда сообщающихся стеклянных сосудов – трубок, по которым протекает вода (рис.10.15 б). Каждая трубка моделирует некоторый слой конструкции. Исследуя, например, распределение тепла в стенке пустотелой опоры при наружной температуре t_n^0 и температуре внутри опоры $t_{вн}^0$ стенку разбивают на несколько участков и каждый участок замещают трубкой в интеграторе. Создавая напоры h_n и $h_{вн}$ по уровню воды в трубках судят о температуре каждого участка стенки. Напоры h можно создавать по различным законам, соответствующим законам изменения температуры.

Рекомендуемая литература

- 1) Васильев А.П., Балавиев В.И., Корсунский Ю.Б. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника. М., Транспорт, 1989.
- 2) ВСН 44-93. Инструкция по проведению осмотров и оценке технико-эксплуатационного состояния мостов и труб на автомобильных дорогах. Миндорстрой РБ, Минск, 1993.
- 3) ВСН 32-81. Инструкция по устройству гидроизоляции конструкций мостов и труб на железных, автомобильных и городских дорогах. Минтрансстрой МПС, М, 1982.
- 4) ВСН 32-89. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных и пролетных строений. М., Транспорт, 1991.
- 5) ВСН 44-93. Инструкция по проведению осмотров и оценке технико-эксплуатационного состояния мостов и труб на автомобильных дорогах. Минск, Дорстройтехника, 1993.
- 6) Городские транспортные сооружения. Правила эксплуатации. Минск, Минжилкомунхоз, 1989.
- 7) Кириллов В.С. Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1971.
- 8) Осипов В.О и др. Содержание и реконструкция мостов. М, Транспорт, 1980.
- 9) Пособие П2-99 к СНБ 3.03.02-97. Обследование транспортных потоков и прогнозирование нагрузки сети городских улиц и дорог. Минск, 1998.
- 10) Правила по технике безопасности при эксплуатации контактной сети постоянного (переменного) тока электрифицированных дорог. СниП 3.06.07-86 «Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний». М, 1987.
- 11) Рекомендации по краткосрочному восстановлению автомобильных дорог и мостов. Минск, 1988.
- 12) РД 218 БССР 29-88. Руководство по ограждению мест производства работ и расстановке дорожных знаков при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог. Минск, 1989.
- 13) РД 218.18-83. Порядок проведения технического учета и паспортизации автомобильных дорог общего пользования. Минск, 1984.
- 14) РД 218.25-87. ОС УКСП. Руководство по геодезическим работам в дорожно-мостовом строительстве. Минск, 1987.
- 15) РД 0219.1.08-98. Состав и порядок оформления производственно-технической документации при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог и искусственных сооружений. Дорстройтехника, Минск, 1989.
- 16) СТБ 21.302-99 и СТБ 21.303-99. Система проектной документации для строительства. Минск, 2000.

Учебное издание

Шведовский Петр Владимирович

Омелько Алексей Алексеевич

Содержание и ремонт транспортных сооружений

(курс лекций)

Редактор *Т.В. Строкач*

Ответственный за выпуск *П.В. Шведовский*

Художник *П.В. Шведовский*

Компьютерная верстка *В.В. Лукаша*

Технический редактор: А.Д. Никитчик



Сдано в набор 20.10.2000 Подписано к печати 21.04.2001 Формат 60x84 1/16
Бумага писч. Гарнитура Times New Roman. Усл. п.л. 27,7 Уч. изд. л. 29,75
Тираж 100 экз Заказ № 401 . Отпечатано на ризографе Брестского
государственного технического университета. 224017, Брест, ул. Московская,
267.