

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

И.И. Ушаков

**ДИАГНОСТИКА
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Научные основы диагностики

Учебное пособие

Рекомендовано в качестве учебного пособия редакционно-издательским советом Воронежского государственного архитектурно-строительного университета для студентов строительных специальностей

Воронеж 2008

УДК 624.011 07
ББК 38.5я73
У932

Ушаков, И.И.

У932 Диагностика строительных конструкций. Научные основы диагностики : учеб. пособие для студ. строит. спец. / И.И.Ушаков ; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2008.- 150 с.

ISBN 978-5-89040-199-1

Рассмотрены основные проблемы проведения диагностики состояния строительных конструкций зданий и сооружений. Изложены основные требования к несущим конструкциям зданий и сооружений. Описаны современные представления о прочностных и деформационных характеристиках строительных материалов конструкций, а также закономерности их разрушения от действия нагрузок, коррозионных сред и физических воздействий. Обобщены нормативные требования к проведению экспертизы конструкций зданий. Описаны некоторые характерные дефекты и повреждения отдельных элементов конструкций.

Предназначено для студентов строительных специальностей, а также для магистрантов, аспирантов и специалистов.

Ил. 34. Табл. 22. Библиогр.: 27 назв.

УДК 624.011 07
ББК 38.5я73

Рецензенты: кафедра сопротивления материалов Воронежской лесотехнической академии;

Б.А. Бондарев, д.т.н., проф. кафедры строительных конструкций Липецкого государственного технического университета

ISBN 978-5-89040-199-1

© Ушаков И.И., 2008
© Воронежский
государственный
архитектурно-строительный
университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Понятие о работоспособности строительных конструкций и задачи диагностики.....	6
1.1. Нормативные требования к строительным конструкциям зданий и сооружений. Предельные состояния конструкций.....	6
1.1.1. Надежность, долговечность, капитальность	7
1.1.2. Понятие о методе предельных состояний	20
1.2. Понятие о работоспособности конструкций. Внезапные и износые отказы. Резервирование прочности конструкций	32
1.3. Физический износ зданий, конструкций и их элементов	38
1.3.1. Понятие физического износа строительных конструкций и методы его оценки.....	38
1.3.2. Методы определения физического износа строительных конструкций	40
1.4. Диагностика состояния конструкций методом экспертных оценок...	48
1.4.1. Сущность метода экспертных оценок.....	48
1.4.2. Организация экспертного оценивания.....	52
1.4.3. Оценка согласованности мнений экспертов.....	68
1.5. Классификация повреждений и дефектов несущих конструкций и их элементов. Задачи диагностики.....	80
Глава 2. Физические основы прочности и повреждаемости материалов в конструкциях. Техническая оценка прочности.....	89
2.1. Микромеханика и кинетика разрушения.....	89
2.1.1. Зарождение микротрещин.....	89
2.1.2. Рост докритических трещин.....	92
2.1.3. Переход трещин в лавинную стадию роста. Вязкость разрушения.....	101
2.1.4. Переход от микро разрушений к образованию макроскопических и магистральных трещин. Трещиностойкость материалов.....	105
2.1.5. Классификация несплошностей в бетонах по размерам. Масштабные уровни трещинообразования	107
2.1.6. Торможение трещин в бетоне.....	114
2.1.7. Механизмы разрушения структуры бетона.....	115
2.2. Влияние кратковременных перегрузок на долговечность конструкций..	116
2.3. Методика визуального и инструментального поиска зон активного разрушения в конструкциях. Методы акустической эмиссии.....	117
2.4. Развитие деформаций конструкций с течением времени	122
2.5. Старение материалов	130

2.6. Усталость материалов при циклических воздействиях.....	135
2.7. Прочность и нормативные сопротивления материалов. Статистический способ оценки прочности бетонов.....	143
Заключение.....	147
Библиографический список.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика несущих строительных конструкций является одним из важнейших этапов в процессе эксплуатации зданий и сооружений. Фактический срок эксплуатации множества зданий и сооружений оказывается меньше нормативного только из-за того, что своевременно не были выявлены дефекты строительства и повреждения во время эксплуатации, которые привели к потере работоспособности несущих конструкций.

Рост числа аварий в последние годы связан с целым рядом причин. В первую очередь, это повсеместное снижение эксплуатационных затрат на здания и сооружения, ликвидация или резкое сокращение системы планово-предупредительных ремонтов и т.п. В связи с этим снижение долговечности конструкций можно рассматривать как следствие многих процессов, происходящих в экономике и обществе.

Часто инженеры рассматривают разрушение конструкций не столько как случайный единовременный акт, связанный с природным или технологическим воздействием, сколько как проявление одновременного воздействия комплекса причин или как вторичное явление на фоне постепенной деградации материалов в конструкции.

Важнейшей проблемой, связанной с проектированием реконструкции зданий и сооружений, а также рациональной их эксплуатацией, является правильное определение состояния конструкций, их остаточной несущей способности и причин, вызвавших повреждения.

Решение этой проблемы непосредственно связано с оценкой конструктивных свойств материалов с современных позиций кинетической концепции прочности твердых тел и теории накопления структурных повреждений. В учебном пособии на базе научных представлений о физических и механических свойствах материалов с учетом условности многих расчетных предпосылок классифицированы основные причины силовых и несиловых повреждений наиболее распространенных строительных конструкций. На базе теории надежности обоснованы закономерности резервирования прочности и износа строительных конструкций, при этом также учтены требования действующих нормативно-инструктивных документов и достижения в области диагностики повреждений несущих строительных конструкций.

В учебном пособии описаны основные научные подходы к решению задач экспертизы несущих строительных конструкций, которая проводится с целью продления сроков нормальной эксплуатации существующих зданий и сооружений.

Глава 1. ПОНЯТИЕ О РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ

1.1. Нормативные требования к строительным конструкциям зданий и сооружений. Предельные состояния конструкций

Здания и сооружения или отдельные конструкции имеют определенное назначение и эксплуатируются в определенных условиях. Для обеспечения эксплуатационных свойств должны быть выполнены некоторые условия, которым должны удовлетворять все принимаемые технические решения и меры по их практической реализации. Нарушение хотя бы одного эксплуатационного требования определяет выход за границу некоторой области и формулируется как переход через предельное состояние. Требования, которым должны удовлетворять здания и сооружения, главным образом касаются:

- обеспечения безопасности людей и окружающей среды;
- обеспечения протекания технологических процессов, для реализации которых строится объект;
- обеспечения определенного уровня гигиены и комфорта;
- создания приемлемых условий для поддержания объекта в требуемом рабочем состоянии.

В частном случае для строительных конструкций удовлетворение требований, связанных с назначением конструкции, определяется степенью капитальности, уровнем ответственности и значимостью объекта для общества.

Конструкции должны удовлетворять требованиям к условиям эксплуатации, а именно соответствовать климатическим параметрам района строительства, атмосферным нагрузкам, сейсмическим и другим воздействиям, характеристикам грунтов, степени пожарной опасности и т.п. Таким образом, мы имеем систему, состоящую из объекта, нагрузок и среды. Необходимо различать уровни воздействия, которые следует оценивать как экстремальные, но все же допустимые, и запредельные. В первом случае нужно учитывать возможность проявления рассматриваемых воздействий в процессе эксплуатации объекта и предусматривать необходимую для их восприятия прочность конструкции. Во втором случае эти воздействия не учитываются напрямую, а ничтожно малая вероятность их реализации учитывается косвенно, путем разработки превентивных мер по локализации последствий аварии или выработки поведения персонала в нештатных ситуациях.

Из требований к условиям эксплуатации непосредственно вытекают требования к строительным конструкциям в части оценки напряженно-деформированного состояния или в другой форме, допускающей расчетный анализ (например, расчет скорости коррозионного износа или использование понятий кинетики разрушения).

1.1.1. Надежность, долговечность, капитальность

Под сроком службы здания понимают продолжительность его безотказного функционирования. При назначении нормативных сроков службы зданий учитывают основное их назначение и условия безопасности. У нас в стране принята классификация зданий по капитальности. Срок службы конструкций зданий и сооружений определяется при проектировании и строительстве в соответствии с группой капитальности. Применение проектных решений, не обеспечивающих требуемую капитальность, недопустимо, а применение конструкций здания с необоснованно высоким сроком службы экономически нецелесообразно.

Требуемые сроки службы зданий и сооружений устанавливаются нормативными документами в соответствии с функциональным назначением и другими факторами.

Два или несколько объектов одного назначения могут иметь разные характеристики долговечности в том случае, если они построены из разных материалов, отличаются конструктивными решениями, возведены с разным качеством строительных и монтажных работ, а также подвергаются разным воздействиям окружающей среды или эксплуатируются в условиях с различными периодичностью и качеством профилактических мероприятий.

Несущие и ограждающие конструкции зданий и сооружений могут быть выполнены из элементов с примерно одинаковыми или существенно различающимися характеристиками долговечности. Так, в зданиях с кирпичными стенами и деревянными перекрытиями имеет место несоответствие сроков службы конструктивных элементов, потому что деревянные конструкции теряют несущую способность значительно раньше каменных. Эксплуатационные качества такого здания могут быть восстановлены путём ремонта или замены деревянных частей новыми. Тогда первый этап долговечности здания оценивается сроком его службы с момента возведения до капитального ремонта, следующие (промежуточные) этапы определяются сроком службы между двумя капитальными ремонтами, а последний этап – сроком службы со времени последнего капитального ремонта до полного износа всех конструктивных элементов. Если здание состоит из конструктивных элементов с примерно одинаковыми характеристиками долговечности, то необходимость капитального ремонта отпадает. К таким зданиям могут быть отнесены, например, жилые дома из газобетона, стены и перекрытия которых выполнены из одного материала. В этом случае ожидается приблизительно одинаковый постепенный износ всех конструктивных элементов. При этом целесообразно обеспечить примерно такой же уровень долговечности узлов их сопряжений. Таким зданиям требуется лишь регулярный профилактический ремонт, продлевающий срок их службы с момента возведения до полного износа. Долговечность конструкций, в конечном счете, обеспечивается долговечностью её элементов и узлов сопряжений. Нормативные сроки службы зданий и сооружений представлены в табл. 1.1.

Нормативные сроки службы зданий

Наименование зданий и сооружений	Нормативный срок служб, лет			
	В нормальных условиях	При степени агрессивности среды		
		слабой	средней	сильной
Здания многоэтажные (более 2-х этажей), за исключением многоэтажных зданий типа этажерок специального технологического назначения (обогачительных фабрик, дробильных, размольных производств), здания одноэтажные с железобетонным и металлическим каркасом, со стенами из каменных материалов, крупных блоков и панелей, с железобетонным, металлическим и другими долговечными покрытиями, с площадью пола свыше 5 тыс. м ²	100	80	60	40
Здания двухэтажные всех назначений, кроме деревянных всех видов; здания одноэтажные с железобетонными и металлическими каркасами, с сеткой колонн 6 м и более, со стенами из каменных материалов, крупных блоков и панелей, с железобетонными, металлическими и другими долговечными покрытиями, с площадью пола до 5 тыс. м ²	83	66	42	33
Здания многоэтажные типа этажерок специального технологического назначения (обогачительные фабрики, дробильные, размольные, химические цеха и другие аналогичные производства)	59	-	-	-
Здания одноэтажные бескаркасные со стенами из каменных материалов, крупных блоков, панелей с железобетонными, металлическими и кирпичными колоннами и столбами, с железобетонными, металлическими, деревянными и другими перекрытиями и покрытиями	60	48	36	30

Наименование зданий и сооружений	Нормативный срок служб, лет			
	В нормальных условиях	При степени агрессивности среды		
		слабой	средней	сильной
Здания, имеющие малую сетку колонн (менее 6 м) и пролёты до 18 м, с часто расположенными внутренними стенами, со стенами из каменных материалов и бетонных блоков, с железобетонными и другими перекрытиями устаревших конструкций	40	32	24	20
Здания деревянные с брусчатыми и бревенчатыми стенами	30	-	-	-

Важной экономической задачей проектирования является создание «равнодолговечной» конструкции, отличающейся примерно одинаковым сроком службы всех её частей. Экспериментальная проверка конструкций на долговечность может выполняться по следующей схеме:

- определение величины износа элементов и узлов через некоторые интервалы времени (например, через 10 лет) до предполагаемого полного износа (конечного срока службы);
- определение характеристик начальной безотказности элементов и узлов с учётом их износа в заданный период времени эксплуатации;
- оценка надёжности конструкции в заданный период времени с учётом характеристик начальной безотказности, ослабления износом элементов и узлов.

Приведенные выше рекомендации, конечно, не охватывают всех требований, предъявляемых к сроку службы конструкций (табл. 1.2). Их следует рассматривать как методику количественной оценки долговечности, основанную на учёте изменения прочности элементов и узлов строительных конструкций в результате постепенного износа за время эксплуатации. Использование этой методики будет способствовать совершенствованию проектных решений и повышению уровня надёжности несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Таблица 1.2

Ориентировочные нормативные сроки службы элементов жилых зданий и конструкций

Элементы зданий и конструкций	Нормативный срок службы, лет
Фундаменты	15-125
Стены	15-125
Перекрытия	15-125

Элементы зданий и конструкций	Нормативный срок службы, лет
Полы	15-80
Лестницы	20-100
Балконы, лоджии, крыльца	10-70
Крыши и кровля	15-80
Покрытия крыш	10-60
Перегородки	30-75
Внутренняя отделка	5-60
Наружная отделка	6-80
Инженерное оборудование	10-60

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов, т.е. с возможными перерывами в работе. Показателями долговечности являются средний срок службы, срок службы до первого капитального ремонта, межремонтный срок службы.

В строительстве мы, как правило, встречаемся с длительными сроками службы зданий и сооружений, поэтому обеспечение начальной безотказности не может гарантировать их надёжную работу в течение требуемого срока эксплуатации. Безотказность реального объекта, отвечающая требованиям расчёта прочности и деформативности, не является стабильной величиной и может изменяться во времени как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Долговечность элементов или конструкций оценивается продолжительностью их безотказной работы с возможными перерывами для проведения профилактических ремонтов.

Факторы, влияющие на долговечность. Существенным фактором, влияющим на долговечность строительных объектов, является воздействие внешней среды, а для промышленных зданий и сооружений – и внутренней среды производственных помещений. Степень воздействия внешней среды зависит от температуры и влажности наружного воздуха, интенсивности дождей и оттепелей, величины ветрового напора, содержания в атмосфере производственных газов и других вредных примесей. Особенно вредное воздействие на долговечность несущих ограждающих конструкций оказывает чередование положительных и отрицательных температур, вызывающее накопление и замерзание влаги в толще материала и в швах между конструктивными элементами.

Совместное воздействие на конструкцию различных факторов, вызывающих попеременное увлажнение, замерзание, оттаивание и изменение структуры материала, усиливает процесс разрушения, который становится особенно интенсивным при агрессивных воздействиях во влажной среде. При периодическом изменении температурно-влажностного режима наблюдается активное растворение некоторых материалов, развитие обменных реакций и кристалли-

зация новых веществ. Таким образом, на долговечность элементов и узлов строительных конструкций влияют:

- внутренние физико-механические процессы, происходящие в материалах и вызывающие изменение характеристик их прочности во времени;
- агрессивность внешней и внутренней сред и степень их воздействия на материалы элементов и узлов конструкций во времени;
- изменчивость геометрических характеристик конструкций (главным образом точности узлов сопряжений) в результате неравномерных осадок грунта, сейсмических или других механических воздействий;
- условия технической эксплуатации зданий или сооружений.

Ремонтопригодность. Регулятором долговечности конструкций является ремонтпригодность объекта, т.е. приспособленность элементов и узлов к периодическим осмотрам и профилактическим ремонтам.

Ремонтопригодность – свойство конструкции быть приспособленной к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность объекта полностью определяется его конструкцией, т. е. предусматривается и обеспечивается при разработке и изготовлении объекта с учётом будущего целесообразного уровня его восстановления. Целесообразный уровень восстановления определяется соотношением ремонтпригодности, внешних условий для выполнения ремонта и установленных для этого предельных сумм соответствующих затрат. Восстановление работоспособного состояния осуществляется в основном путём ремонта, а поддержание и предупреждение нарушений этого состояния – путём технического обслуживания. «Идеальная» конструкция должна была бы состоять из элементов и узлов, имеющих одинаковые характеристики начальной безотказности и долговечности. По истечении срока службы такой конструкции должны были бы одновременно разрушиться все детали и соединения, из которых она состоит. Однако таких «идеальных» конструкций не существует. Увеличение срока службы строительных конструкций может быть достигнуто путём своевременного устранения возникающих в них дефектов. Рекомендуемая нормативными документами периодичность ремонтов указана в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Рекомендуемая периодичность ремонтов

Группа жилых зданий по капитальности	Периодичность ремонтов, лет		
	текущего при общем износе здания, %		капитального
	до 60	более 60	
1	3-5	2-4	18-25
2,3	3-5	2-4	15-20
4,5	3-5	2-3	12-15
6,7	3-4	2	9-12
8	3-4	2	Нецелесообразен

Действенным средством повышения долговечности строительных конструкций в экономически целесообразных пределах является регулярное проведение профилактических текущих ремонтов, в результате которых периодически или немедленно устраняются повреждения элементов или узлов. Важной задачей текущих ремонтов является предупреждение возможных повреждений или физического износа конструкций. Текущий ремонт может быть непредвиденным, когда в процессе эксплуатации объекта устраняются неожиданно возникшие повреждения, и планово-предупредительным, когда объём ремонтных работ и сроки их проведения предусматриваются заранее. Текущие ремонты производятся в течение всего срока службы объекта с момента его возведения до полной потери эксплуатационных свойств. В случае необходимости восстановления характеристик начальной безотказности конструкции в целом или отдельных её частей производится комплексный или капитальный выборочный ремонт. После капитального комплексного ремонта здание полностью восстанавливает эксплуатационные свойства, и поэтому срок его службы значительно увеличивается. В промежутках между двумя капитальными ремонтами проводят профилактические текущие ремонты элементов и узлов строительных конструкций.

Как показывает практика технической эксплуатации строительных объектов, для своевременного выявления необходимости проведения текущего и капитального ремонта следует периодически проводить общие (всех элементов, узлов и конструкций), частичные (отдельных частей) или внеочередные (после сильных природных воздействий) осмотры зданий и сооружений. При оценке ремонтнопригодности следует рассматривать две принципиально разные схемы:

- конструкции с примерно равной степенью долговечности элементов и узлов, рассчитанных на проведение текущих профилактических ремонтов;
- конструкции с разной степенью долговечности элементов и узлов, рассчитанных на проведение как профилактических, так и капитальных ремонтов.

В первом случае необходимо обеспечить возможность периодических осмотров элементов и узлов конструкции, восстановления защитных покрытий и выполнения мелких ремонтных работ без перерыва в эксплуатации объекта.

Во втором случае, кроме мероприятий, проводимых в первом случае, должна быть предусмотрена возможность частичной или полной замены (или капитального усиления) отдельных элементов или конструкций при производстве капитального ремонта здания или сооружения.

Ремонтнопригодность характеризуется определенными показателями ремонтнопригодности.

1. Вероятность восстановления работоспособного состояния – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного.

2. Время восстановления - случайное время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа.

3. Среднее время восстановления работоспособного состояния - математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния.

4. Время простоя – случайное время вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в неработоспособном состоянии, определяемое длительностью обнаружения отказа, длительностью подготовки к ремонту и длительностью самого ремонта объекта.

5. Среднее время простоя - математическое ожидание времени вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в неработоспособном состоянии.

Для количественной оценки ремонтпригодности используют коэффициенты готовности и ремонтпригодности.

Коэффициент готовности определяют по формуле

$$K_{г1} = \frac{T_э}{T_э + T_в},$$

где $T_э$ и $T_в$ – время эксплуатационного периода и восстановления.

Этот коэффициент определяет вероятность того, что в любой момент времени здание будет нормально функционировать, т.е. не будет находиться в состоянии ремонта.

Коэффициент ремонтпригодности определяют по формуле

$$K_p = \frac{C_o^{np}}{C_o^{np} + C_p^{np}},$$

где C_o^{np} – приведенная к одному году стоимость конструкций;

C_p^{np} – приведенная стоимость ремонтов.

Коэффициент ремонтпригодности показывает вероятность того, что данный конструктивный элемент здания находится в состоянии функционирования.

К сожалению, в строительстве бытует глубоко укоренившаяся традиция пренебрежительного отношения к проблемам эксплуатации и ремонта. Характерным показателем такого отношения можно считать факт упразднения шестой главы СНиП, первоначально предназначавшейся для нормативных документов по эксплуатации зданий и сооружений.

Сохраняемость – свойство системы сохранять свои показатели качества во время транспортирования, складирования, хранения и монтажа. Это свойство чаще относят не к строительному объекту в целом, а к его отдельным элементам, хотя имеются объекты, такие как мобильные здания или инвентарные сооружения, для которых сохраняемость является общей характеристикой.

Методы количественной оценки ремонтпригодности. Работы по обеспечению ремонтпригодности зданий следует проводить на основе количественного и качественного анализа ремонтпригодности на всех этапах проектирования.

Методами количественной оценки являются метод использования зависимостей и пооперационный метод. Метод использования зависимостей предполагает исследование и анализ показателей ремонтпригодности в зависимости от конструктивных характеристик с целью их прогнозирования.

Пооперационный метод базируется на учёте и анализе каждой операции ремонта с точки зрения необходимости, периодичности выполнения и технологичности конструкций и элементов с одновременной оценкой затрат времени, труда и средств на их выполнение. Реализация этого метода предполагает проведение следующих работ на этапе проектирования нового здания: выявление и определение номенклатуры и периодичности выполнения ремонтных операций по каждой конструкции и элементу, сборочной единице, системе и зданию в целом; определение наиболее рациональной последовательности ремонта отдельных деталей и комплекса; определение технологичности конструкций и элементов; определение предварительной оценки продолжительности и стоимости каждой операции ремонта по каждой детали, единице, комплексу, зданию в целом; составление эксплуатационной и ремонтной документации; предварительное определение номенклатуры и количества запасных частей, материалов, инструментов для ремонта с учётом режимов и условий эксплуатации.

Надёжность. Надёжность – это сложное свойство системы и ее элементов выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени (рис. 1.1). Надёжность оценивается такими характеристиками, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Для различных объектов и различных условий эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.



Рис. 1.1. Кривая надёжности конструктивных элементов жилых зданий

В процессе проектирования и конструирования здания закладывают его расчётную надёжность. При изготовлении обеспечивается фактическая надёжность конкретного элемента, зависящая от качества применяемых материалов, отдельных деталей, сборки и монтажа конструкций. После изготовления надёжность следует поддерживать на необходимом уровне правильной организацией эксплуатации (рис.1.2).

В процессе эксплуатации на надёжность здания оказывают влияние следующие факторы: внутренние напряжения в конструкциях, не соответствующие их проектным значениям; внешние воздействия (в заданных или иных режимах); система технического обслуживания (предупредительного и систематического); техническая квалификация обслуживающего и ремонтного персонала.

Таким образом, под надёжностью жилого здания в целом как сложной системы следует понимать стабильность показателей качества и эффективности его функционирования, которая зависит от надёжности конструкций и систем устройств.

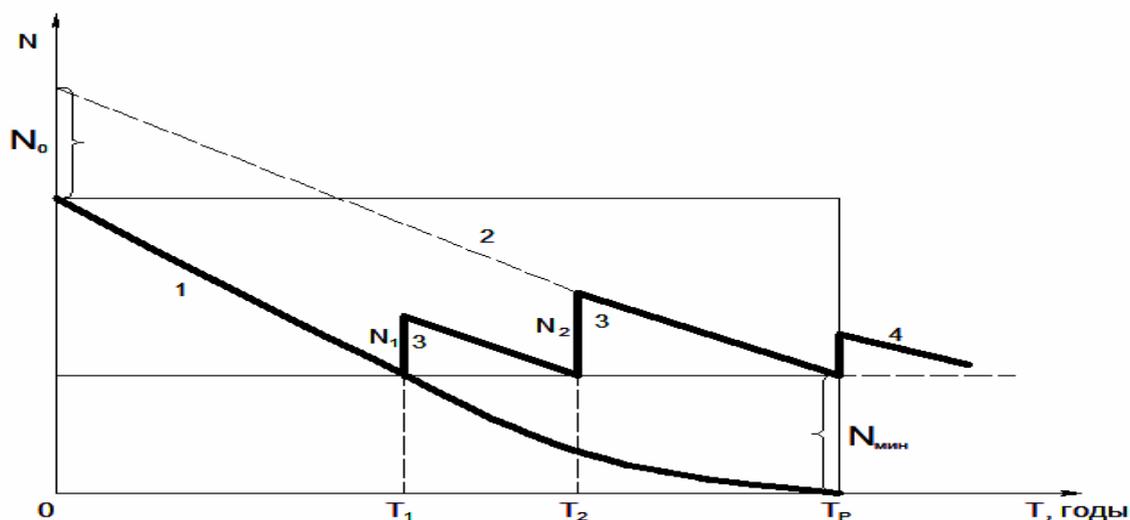


Рис. 1.2. Изменение надёжности за период эксплуатации здания:

- 1-теоретическая кривая;
- 2-то же, при начальном резервировании;
- 3-повышение надёжности при капитальном ремонте;
- 4-увеличение долговечности здания

Факторы, определяющие надёжность конструкций. Необходимость обеспечения долговечности и надёжности строительных конструкций в течение срока службы учитывают при формировании требований нормативных документов, проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации. Чем полнее сведения о свойствах конструкции, внешних воздействиях, её поведении на всех стадиях работы, тем больше гарантий успешного достижения поставленной цели.

Опыт эксплуатации строительных конструкций показывает, что надёжность конструкций зависит от большого количества случайных факторов. Природа и степень влияния этих факторов определяются требованиями нормативных документов, качеством проектирования, выполнения строительномонтажных работ и режимами эксплуатации.

К случайным факторам, определяющим надёжность конструкции сооружения при проектировании, относят выбор рациональных конструктивных решений, соответствующих максимальному и рациональному использованию физико-механических свойств материалов в конкретных условиях эксплуатации, правильное назначение расчётной схемы сооружения и модели его напряжённого состояния, соблюдение требований нормативных документов.

К факторам, определяющим надёжность и долговечность сооружения в зависимости от качества строительномонтажных работ, относят: неоднородность прочностных свойств конструкционных материалов, несоблюдение геометрических размеров конструкций при изготовлении, точность монтажа колонн, балок, предварительного напряжения арматуры, правильность заделки стыков, точность разбивки осей, надёжность сварки элементов и др. После окончания строительномонтажных работ сооружение и все его конструктивные элементы характеризуются начальной надёжностью, уровень которой должен быть не ниже нормативного.

Надёжность строительных конструкций не может быть стопроцентной, так как в природе не существует ничего идеального. Она зависит от сложного взаимодействия многочисленных случайных факторов. Эксплуатация конструкций всегда сопряжена с определенной вероятностью обрушения. Однако в силах инженеров свести этот риск к разумной минимальной величине. В среднем в мировой практике используется следующая классификация рисков:

- недопустимый риск – значение более 10^{-4} ;
- жесткий контроль риска - при значениях от 10^{-4} до 10^{-5} ;
- приемлемый риск – значение менее 10^{-5} .

Риск порядка 10^{-8} считается пренебрежимо малым. Например, риск причинения вреда здоровью человека от систематического нахождения в одной комнате с курильщиком составляет 10^{-5} . Между указанными границами допускается поиск компромиссного решения между социальными выгодами и финансовыми убытками, так как повышение надёжности зданий и их элементов сопряжено с экспоненциально увеличивающимися финансовыми затратами.

Безотказность – свойство системы (элемента) сохранять работоспособность в течение некоторого заданного срока без вынужденных перерывов. В качестве количественных характеристик, оценивающих это свойство, чаще всего используют вероятность безотказной работы, вероятность отказа и интенсивность отказов.

Долговечность. Количественными характеристиками долговечности являются средний срок службы или средний срок службы до капитального ремонта. Эти сроки могут измеряться в единицах календарного времени, числом

характерных рабочих циклов, объемом произведенной работы (выпущенной продукции) или в других единицах. Для многих строительных объектов, эксплуатация которых практически не может быть приостановлена (например, для несущих конструкций), характеристика безотказности превалирует, перекрывая фактически характеристику долговечности. Следует различать безотказность системы в целом и ее составных частей. Нетрудно представить себе конструкцию, непрерывная работоспособность которой реализуется за счет своевременной замены или ремонта некоторых элементов. При этом такого рода ремонтные работы выполняются без остановки объекта в целом. Таким образом выполняются почти все текущие, а также многие капитальные ремонты зданий и сооружений. Поэтому проблему долговечности строительных конструкций следует рассматривать скорее как проблему замедления скорости деградации служебных свойств конструкции (коррозии, гниения, накопления повреждений и т.п.), чем как задачу оценки продолжительности ремонтных остановок или установления дисциплины обслуживания.

Проблема долговечности приобретает особую остроту в связи с внедрением новых технологий, природными, экологическими катастрофами.

Решение проблемы долговечности строительных материалов предполагает решение трех основных задач:

- изучения механизма деградации и создания строительных материалов с повышенной, запрограммированной долговечностью;
- создания единой теории сопротивления материалов и разработки на её основе инженерных методов оценки, прогнозирования строительных материалов;
- разработки методов повышения долговечности строительных конструкций.

Долговечность материалов зависит от множества различных физических, химических и физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии материала с внешней средой. Поэтому на процесс деградации материала огромное влияние оказывает не одна из возможных форм влияния среды, а все факторы в совокупности, причем какие-то факторы являются преобладающими.

Долговечность материала, прежде всего, зависит от химического состава материала и вида агрессивного воздействия. Химический состав материала определяет вид внутренних взаимодействий между частицами (атомами, молекулами, ионами) и обуславливает тем самым возможность существенного влияния на прочность межатомных связей, связей между отдельными частицами, их прочность, устойчивость при различных воздействиях. Вид агрессивного воздействия определяет механизм энергетического воздействия на материал. По признаку действующей энергии следует выделить:

- сопротивление материалов физическим воздействиям, которые могут создаваться различными полями: силовыми, температурными, электрическими, магнитными, радиационными;

- сопротивление материалов химически агрессивным средам (газообразным, жидким, твёрдым);
- сопротивление материалов биологическим воздействиям.

При решении проблемы долговечности необходимо решить задачу изучения влияния особенностей реальной структуры композиционного материала – крупности заполнителя, его формы, степени наполнения, соотношения жёсткости матрицы и наполнителя, дефектности, пористости структуры на сопротивление материалов агрессивным воздействиям. От структуры материала зависит механизм переноса жидкости в материале, процесс зарождения и развития дефектов структуры, механизм деградации и разрушения материала. Экспериментальные исследования показали, что оптимизация составов по химическому сопротивлению или долговечности даёт лучшие результаты, чем по прочности и другим характеристикам. Поэтому при проектировании композиционных материалов с учётом долговечности необходимо вводить ограничения на наполнители по химическому сопротивлению, на пористость по размерам пор и их характеру, на добавки и т. д.

При решении проблемы долговечности необходимо изучить влияние условий деформирования на долговечность материалов. Деформирование может происходить под действием кратковременных, длительных статических, динамических и циклических нагрузок. Очевидно, что при кратковременном динамическом нагружении процессы переноса жидкости, её химического взаимодействия с материалом могут не успеть проявиться. В то же время при длительном нагружении главенствующими факторами в процессе деградации становятся процессы переноса и химического взаимодействия. Накопление дефектов в условиях переноса жидкости будет также зависеть от вида напряжённого состояния.

Вышеизложенные задачи решаются отдельно различными специалистами: материаловедами, конструкторами, механиками, но вполне очевидно, что для решения проблемы долговечности необходим комплексный подход, основанный на объединении усилий специалистов.

Показатели долговечности. При оценке долговечности зданий и сооружений, а также их элементов используют следующие показатели:

1. Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.
2. Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.
3. Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

Цель установления назначенного ресурса и назначенного срока службы – обеспечение принудительного заблаговременного прекращения применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или экономического анализа. И потребоваться это может до перехода объекта в предельное состояние.

При достижении объектом назначенного ресурса (назначенного срока службы) в зависимости от его назначения, особенностей эксплуатации, технического состояния и других факторов могут быть приняты следующие решения:

- снять объект с эксплуатации (списать);
- направить на средний или капитальный ремонт;
- использовать объект не по назначению;
- продолжить эксплуатацию.

Помимо назначенного ресурса используется понятие среднего ресурса между смежными капитальными ремонтами объекта.

Средний ресурс до капитального ремонта – это ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Полный средний ресурс – это ресурс объекта от начала его эксплуатации до снятия с эксплуатации, обусловленного достижением предельного состояния.

Полный назначенный ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации до снятия объекта с эксплуатации в связи с достижением предельного состояния.

Гамма-процентный ресурс до капитального ремонта – наработка до капитального ремонта, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс между капитальными ремонтами – наработка между капитальными ремонтами, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Средний срок службы между капитальными ремонтами - средний срок службы между смежными капитальными ремонтами.

Средний срок службы до капитального ремонта - средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Полный средний срок службы - средний срок службы от начала эксплуатации объекта до снятия с эксплуатации, обусловленного предельным состоянием. В полный срок службы входят продолжительности всех видов ремонта объекта.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

Полный назначенный срок службы - суммарная календарная продолжительность эксплуатации объекта от её начала до снятия с эксплуатации, обусловленного предельным состоянием.

Гамма-процентный срок службы - календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок службы до капитального ремонта - календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта до его первого капиталь-

ного ремонта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок службы между капитальными ремонтами - календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта между смежными капитальными ремонтами, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Требования огнестойкости. Выделяют 8 степеней огнестойкости зданий: I, II, III, IIIа, IIIб, IV, IVа и V в зависимости от значений пределов огнестойкости основных строительных конструкций, принимаемых в часах или минутах, и пределов распространения огня по ним, принимаемых в сантиметрах. Нормированию подлежат стены, перегородки, колонны, элементы лестничных клеток, перекрытий и покрытий (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Пределы огнестойкости строительных конструкций

Степень огнестойкости	Минимальные пределы огнестойкости строительных конструкций, ч (над чертой), и максимальные пределы распространения огня по ним, см (под чертой)								
	Стены				Колонны	Лестницы, площадки, ступени, балки и марши	Плиты, настилы и др.	Элементы покрытий	
	Несущие	Самонесущие	Наружные несущие	Внутренние несущие				Плиты, настилы	Балки, фермы, арки
I	<u>2,5</u> 0	<u>1,25</u> 0	<u>0,5</u> 0	<u>0,5</u> 0	<u>2,5</u> 0	<u>1</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,5</u> 0	<u>0,5</u> 0
II	<u>2</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>2</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,75</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0
III	<u>2</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>2</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,75</u> 0		
IIIа	<u>1</u> 0	<u>0,5</u> 0	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 0	<u>1</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 25	<u>0,25</u> 0
IIIб	<u>1</u> 40	<u>0,5</u> 40	<u>0,5</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>1</u> 40	<u>0,75</u> 0	<u>0,75</u> 25	<u>0,25</u> 0	<u>0,75</u> 25
IV	<u>0,5</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,5</u> 40	<u>0,25</u> 25	<u>0,25</u> 25		
IVа	<u>0,5</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 40	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0	<u>0,25</u> 0
V	Не нормируется								

1.1.2. Понятие о методе предельных состояний

Метод предельных состояний был введен в СССР в качестве основного руководящего принципа расчетов строительных конструкций в 1955 году. Он завоевал признание во всем мире и в настоящее время положен в основу систе-

мы Еврокодов, в которой получил название «метод частных коэффициентов надежности». Так как ценность здания определяется возможностью его эксплуатации, то состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно, называется предельным. Следует подчеркнуть, что в действующих нормах определение предельных состояний связывается непосредственно с условиями эксплуатации, а не с вытекающими из них расчетно-конструктивными требованиями. Заметим, что такие формулировки, как «обеспечение нормальной эксплуатации», «прекращение эксплуатации» и аналогичные им, являются бессодержательными с точки зрения тех понятий (усилия, перемещения и др.), с использованием которых формулируется рабочий аппарат проверки конструкций по предельным состояниям. Это привело к необходимости давать каждому определению предельного состояния множество разъяснений в форме списка явлений (потеря устойчивости, различные виды разрушения, значительные перемещения и т.п.), с которыми связывается то или иное нарушение эксплуатационных требований. Сами же понятия «полная непригодность к эксплуатации» и «затруднение нормальной эксплуатации», с использованием которых дается формулировка предельных состояний, во многом неясны и декларативны, что особенно затрудняет однозначную оценку степени поврежденности эксплуатирующихся конструкций.

Несмотря на полувековой период использования метода предельных состояний, его применение в инженерной практике до сих пор в большей степени является формальным. Инженеры-проектировщики дисциплинированно исполняют предписания действующих нормативных документов, основанные на методе предельных состояний, и плохо представляют себе его достоинства и недостатки. Проблема вероятностной сути выбора критериев практически скрыта и в строительных нормах носит рецептурный характер. В действующих нормах критериями предельного состояния являются признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные в нормативно-технической или конструкторской документации. Критерии предельного состояния не всегда связаны с критериями перехода в неработоспособное или неисправное состояние, т.е. возникновение отказа или повреждения некоторых объектов еще не означает, что они переходят в предельное состояние. И наоборот, может оказаться, что некоторый в данное время исправный и работоспособный объект уже перешел в предельное состояние.

Критерии предельных состояний обычно основываются на закономерностях и особенностях процессов возникновения отказов и повреждений объекта как до рассматриваемого времени, так и после него, т.е. критерии определяются поведением объекта за истекшее время его эксплуатации и прогнозируемым поведением объекта на последующий срок эксплуатации. Кроме того, принимаются во внимание последствия отказов и повреждений (степень ущерба, опасность для здоровья и жизни людей и др.).

Возможность достижения конструкцией того или иного предельного состояния зависит от многих факторов, в том числе:

- внешних нагрузок и других воздействий;
- качества и механических свойств материалов конструкций;
- общих условий работы конструкций, условий ее изготовления и т.п.

Целью расчета по предельным состояниям является получение надлежащей гарантии, что за время эксплуатации не наступит ни одно из недопустимых предельных состояний для конструкции в целом и отдельных элементов. Этот метод расчета не связан с понятием разрушения как критерием предельного состояния, а базируется на новом критерии – прекращении эксплуатации. Критерий метода предельных состояний может быть также назван критерием годности сооружения.

Прекращение эксплуатации здания, сооружения возможно в двух случаях:

- при потере несущей способности, которая является верхним пределом возможности эксплуатировать конструкцию;
- при чрезмерных деформациях (прогибах), наличие которых в некоторых сооружениях, например гибких, приводит к невозможности их эксплуатации еще до потери несущей способности, а также при чрезмерном образовании или раскрытии трещин.

Метод предельных состояний имеет две характерные особенности. Первая особенность состоит в том, что в основе метода лежит идея отказа от детального анализа всех состояний конструкции, кроме предельных состояний. Второй особенностью является то, что все исходные величины представляются в соответствующих нормах на проектирование некоторыми детерминированными нормативными значениями, а влияние их изменчивости учитывается коэффициентами надежности.

В соответствии с действующими нормами расчета конструкций по методу предельных состояний предполагается, что эксплуатация здания или сооружения прекратится ранее, чем будет исчерпана его фактическая несущая способность.

Параметрами сопротивления материалов силовым воздействиям, устанавливаемыми нормами проектирования строительных конструкций, являются нормативные сопротивления с учетом случайной изменчивости механических свойств материалов.

Назначение нормативных сопротивлений связано с уровнем обеспеченности. Нормативные сопротивления R^H назначаются при нормальном законе распределения Гаусса-Лапласа с обеспеченностью (доверительной вероятностью) не ниже 0,95.

Расчетным значением сопротивления материала называется значение сопротивления, получаемое делением нормативного сопротивления R^H на коэффициент надежности по материалу γ_m .

Первая группа предельных состояний. К предельным состояниям первой группы отнесены предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом.

Ниже приведены развернутые механические характеристики, связанные с достижением конструкциями предельного состояния первой группы:

- разрушение любого характера (пластическое, хрупкое, усталостное)-1.a;
- потеря устойчивости формы, приводящая к полной непригодности к эксплуатации-1.b;
- потеря устойчивости положения-1.c;
- переход в изменяемую систему-1.d;
- качественное изменение конфигурации-1.e;
- другие явления, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (чрезмерные деформации в результате ползучести, пластичности, сдвига в соединениях, раскрытия трещин, а так же образования трещин) - 1f.

Как видно, эти явления целиком относятся к физико-механическим и ни в какой мере не отражают экономическую сторону, однако и не препятствуют предположению, что кроме потери несущей способности в качестве критерия предельного состояния первой группы могут иметь место и такие события, как прекращение эксплуатации в связи с экономической нецелесообразностью дальнейшего содержания. Таким образом, например, завершила свое существование башня Киевского телецентра, для которой переход к новым типам антенн оказался связанным со слишком дорогой модернизацией.

Метод предельных состояний устанавливает две категории нагрузок: нормативные и расчетные. Нормативные нагрузки устанавливаются в нормах и представляют собой наибольшие величины внешних воздействий, допускаемые при нормальной эксплуатации здания или сооружения. Расчетными называются возможные наибольшие нагрузки за время эксплуатации сооружения. Отношение расчетной нагрузки к нормативной составляет коэффициент надежности по нагрузке. Коэффициент надежности по нагрузке корректирует неточно установленную нормативную нагрузку на основании полученной из опыта расчетной нагрузки. Коэффициент надежности по нагрузке зависит только от вида нагрузки.

Условия, в которых эксплуатируются конструкции, учитываются коэффициентами условий работы, которые характеризуют особенности и условности работы элементов по сравнению с элементом, принятым за единицу сравнения.

Условие совпадения наибольшего возможного (расчетного) усилия $N^{расч}$ с возможной наименьшей несущей способностью элемента составляет основную формулу (1.1) расчета метода предельных состояний:

$$N^{расч} = P^{норм} \cdot \gamma_f \leq (A, R^{норм}, \gamma_c, \gamma_m), \quad (1.1)$$

где $P^{норм}$ – нормативное значение внешней нагрузки, γ_f - коэффициент надежности по нагрузке, A – геометрическая характеристика сечения, C - ограничения на контролируемый параметр (например, допустимое предельное раскрытие трещины); γ_n - коэффициент, учитывающий значимость конструкции и объекта в целом, а именно возможные экономические и социальные последствия отказа (коэффициент надежности по ответственности); γ_c - коэффициент условий работы, $R^{норм}$ – нормативное сопротивление материала, γ_m - коэффициент надежности по материалу.

Классы ответственности зданий и сооружений (табл. 1.5) определяются уровнем возможного материального и (или) социального ущерба, связанного с прекращением эксплуатации или потерей целостности объекта.

Таблица 1.5

Рекомендации по учету класса ответственности сооружений

Класс объекта	Социальная и экономическая значимость	Примеры объектов	γ_n
I	Особо важные	Главные корпуса ТЭС и АЭС, резервуары емкостью более 10000 м ³ , крытые спортивные сооружения, театры и т.п.	1,0
II	Важные	Объекты промышленности, сельского хозяйства, связи, жилищно-гражданского назначения	0,95
III	Ограниченные	Склады, жилые одноэтажные дома, парники, временные здания и сооружения и т.п.	0,90

В упрощенном виде формулу (1.1) можно записать так:

$$N \leq S, \quad (1.2)$$

где N – усилие, действующее в расчетном элементе, конструкции;

S – предельное усилие, которое может воспринять рассчитываемый элемент.

Проверка конструкций по первому предельному состоянию должна быть обязательной во всех случаях.

Вторая группа предельных состояний. К предельным состояниям второй группы отнесены предельные состояния по развитию чрезмерных деформаций, образованию и раскрытию трещин от нагрузок, при достижении которых в конструкции, сохраняющей прочность и устойчивость, появляются деформации (трещины), исключающие возможность ее дальнейшей эксплуатации.

Прогибы и перемещения конструкций ограничивают, исходя из следующих требований:

- технологических;
- конструктивных;
- физиологических;
- эстетико-психологических.

Проверка конструкций по второму предельному состоянию производится в тех случаях, когда визуальным или инструментальным обследованием обнаружено появление чрезмерных деформаций.

При оценке строительных конструкций по прогибам (выгибам) и перемещениям должно быть выполнено условие

$$f \leq f_u, \quad (1.4)$$

где f — прогиб (выгиб) и перемещение элемента конструкции (или конструкции в целом), выявленные по результатам обследования; f_u — предельный прогиб (выгиб) и перемещение, устанавливаемые нормами.

Технологические требования. Технологические требования к деформациям конструкций связаны с обеспечением условий нормальной эксплуатации технологического и подъемно-транспортного оборудования, контрольно-измерительных приборов и т.д.

Горизонтальные предельные прогибы опор конвейерных галерей от ветровых нагрузок, ограничиваемые исходя из технологических требований, следует принимать равными $h/250$, где h — высота опор от верха фундамента до низа ферм или балок.

Горизонтальные предельные прогибы колонн (стоек) каркасных зданий от температурных климатических и усадочных воздействий следует принимать равными:

$h_s/150$ — при стенах и перегородках из кирпича, гипсобетона, железобетона и навесных панелей,

$h_s/200$ — при стенах, облицованных естественным камнем, из керамических блоков, из стекла (витражи), где h_s — высота этажа, а для одноэтажных зданий с мостовыми кранами — высота от верха фундамента до низа балок кранового пути.

Конструктивные требования. Конструктивные требования к конструкциям связаны с обеспечением целостности примыкающих друг к другу элементов конструкций и их стыков, с обеспечением заданных уклонов.

Прогиб элементов покрытий и перекрытий, ограниченный исходя из конструктивных требований, не должен превышать расстояния (зазора) между нижней поверхностью этих элементов и верхом перегородок, витражей, оконных и дверных коробок, расположенных под несущими элементами.

Зазор между нижней поверхностью элементов покрытий и перекрытий и верхом перегородок, расположенных под элементами, как правило, не должен превышать 40 мм. В тех случаях, когда выполнение указанных требований связано с увеличением жесткости покрытий и перекрытий, необходимо конструктивными мероприятиями избегать этого увеличения (например, путем размещения перегородок не под изгибаемыми балками, а рядом с ними).

Прогибы элементов покрытий должны быть такими, чтобы, несмотря на их наличие, был обеспечен уклон кровли не менее 1/200 в одном из направлений (кроме случаев, оговоренных в нормативных документах).

Физиологические и эстетико-психологические требования. Физиологические требования связаны с предотвращением вредных воздействий и ощущений дискомфорта при колебаниях.

Предельные прогибы, исходя из физиологических требований, следует определять по формуле

$$f_u = g(p+p_1+q)/30n_2(bp+p_1+q),$$

где g - ускорение свободного падения;

p - нормативное значение нагрузки от людей, возбуждающих колебания 0,25 кПа (25кг/м²);

p_1 - пониженное нормативное значение нагрузки на перекрытия - 0,3кПа;

q - нормативное значение нагрузки от веса рассчитываемого элемента и опирающихся на него конструкций;

n - частота приложения нагрузки при ходьбе человека - 1,5 Гц;

b – коэффициент, равный $125 \sqrt{Q/\alpha * p * a * l}$, где Q - вес одного человека (0,8 кН (80 кгс)); α – коэффициент, принимаемый 1,0 для элементов, работающих по балочной схеме, а в остальных случаях 0,5 (например, при опирании плит по трем или четырем сторонам).

Эстетико-психологические требования связаны с обеспечением благоприятных впечатлений от внешнего вида конструкций, с предотвращением ощущения опасности. Прогибы элементов конструкций не ограничиваются, исходя из эстетико-психологических требований, если не ухудшают внешний вид конструкций (например, мембранные покрытия, наклонные козырьки, конструкции с провисающим или приподнятым нижним поясом) или если элементы конструкций скрыты от обзора. Прогибы не ограничиваются, исходя из указанных требований, и для конструкций перекрытий и покрытий над помещениями, в которых люди пребывают непродолжительное время (например, трансформаторных подстанций, чердаков).

Вертикальные предельные прогибы элементов конструкций и нагрузки, от которых следует определять прогибы, приведены в табл. 1.6.

Предельные прогибы конструкций

Условия	Наименование	Пролет, м	Предельный прогиб в долях от пролета
Технологические	Элементы покрытия при наличии прогиба, уклон кровли не менее	-	1/200
Конструктивные	Покрытия и перекрытия при наличии перегородок под ними	-	Не более зазора между перекрытием и перегородкой (ориентировочно 40 мм)
	Перемычки и навесные стеновые панели над оконными и дверными проемами (ригели и прогоны остекления)	-	1/200
	Предельные выгибы междуэтажных элементов перекрытий от усилий предварительного обжатия	До 3 м Более 12 м	15 мм 40 мм
Физиологические	Плиты перекрытий, лестничные марши и площадки, прогибу которых не мешают смежные элементы	-	0,7 мм
Эстетико-психологические	Перемычки и навесные стеновые панели над оконными и дверными проемами, ригели и прогоны остекления	$l \leq 1$	1/120
		$l = 3$	1/150
		$l = 6$	1/200
		$l = 12$	1/250
	Свыше 24	1/300	
	Элементы лестниц (марши, площадки, косоуры), балконов, лоджий		То же

Для элементов конструкций неоговоренные предельные прогибы и перемещения от постоянных длительных и кратковременных нагрузок не должны превышать 1/150 от пролета или 1/75 от вылета консоли.

Предельные значения раскрытия трещин в конструкциях. Требования к трещиностойкости конструкций установлены в зависимости от их назначения (табл. 1.7), условий эксплуатации и чувствительности арматуры к агрессивным воздействиям. Для жилых зданий установлены две категории трещин: 2-я категория - допускается ограниченное по ширине непродолжительное раскрытие трещин a_{crc1} при условии обеспечения их последующего надежного закрытия; 3 категория – допускается ограниченное по ширине непродолжительное a_{crc1} и продолжительное a_{crc2} раскрытие трещин.

Категории требований к трещиностойкости железобетонных конструкций жилых зданий и предельно допустимая ширина раскрытия трещин

Условия работы конструкций	Арматура классов		
	AI, AII, AIII, AIIIb, Vp-I и A-IV	A-V, A-VI, Vp-II, K-7, K-19 при диаметре проволок 3,5 мм и более	B-II, Vp-II, K-7 при диаметре проволок 3 мм и менее
В закрытом помещении	$a_{\text{cre1}} = 0,4$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,3$ мм 3-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,3$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,2$ мм 3-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,2$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,1$ мм 3-кат.
На открытом воздухе и в грунте	$a_{\text{cre1}} = 0,4$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,3$ мм 3-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,2$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,1$ мм 3-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,8$ мм 2-кат.
В грунте при переменном уровне грунтовых вод	$a_{\text{cre1}} = 0,3$ мм 3-кат. $a_{\text{cre2}} = 0,2$ мм 3-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,2$ мм 2-кат.	$a_{\text{cre1}} = 0,1$ мм 2-кат.

Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. При эксплуатации на здания и сооружения действуют нагрузки, которые вызывают деформации в конструкциях. Нагрузки на конструкции здания определяются в соответствии со СНиП 2.01.07-85*. В зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые) нагрузки.

Постоянные нагрузки. К постоянным нагрузкам относят:

- вес частей сооружений, в том числе вес несущих и ограждающих строительных конструкций;
- вес и давление грунтов (насыпей, засыпок).

Вес конструкций и грунтов определяется по чертежам с проведением контрольных замеров сечений; при отсутствии рабочих чертежей или при наличии повреждений (коррозионных, биологических) – по результатам натуральных измерений сечений элементов конструкций.

Вес основных элементов конструкций определяется по формуле

$$G_0 = V_0 \cdot \rho ,$$

где V_0 - объем конструкции; ρ - плотность материала конструкции при температуре и влажности, соответствующей эксплуатационному состоянию, ед. измерения????

Расчетная нагрузка от собственного веса конструкций определяется по формуле

$$G = G_0 \cdot \gamma_f ,$$

где γ_f - коэффициент надежности по нагрузке.

В большинстве случаев на практике коэффициент надежности по нагрузке к собственному весу конструкций больше единицы, однако в специфических случаях, когда меньший вес конструкций не выгоден, он принимается равным 0,9. Примером такой невыгодной ситуации может служить расчет заглубленного резервуара на всплытие при наличии грунтовых вод. В этом случае наиболее невыгодной ситуацией будет состояние незаполненного резервуара, который своим весом должен компенсировать выталкивающую силу. В этом случае следует принимать $\gamma_f = 0,9$, тогда как при расчете прочности самого тела резервуара или грунтов основания γ_f принимается больше единицы.

Временные нагрузки. Временные длительные нагрузки. К временным длительным нагрузкам относят:

- вес временных перегородок, подливок и подбетонок под оборудование;
- вес стационарного оборудования: станков, аппаратов, моторов, емкостей, трубопроводов с арматурой, опорными частями и изоляцией, ленточных конвейеров, постоянных подъемных машин с канатами и направляющими, а также вес жидкостей и твердых тел, заполняющих оборудование;
- нагрузки на перекрытия от складироваемых материалов и стеллажного оборудования в складских помещениях, холодильниках, зернохранилищах, книгохранилищах, архивах и подобных помещениях;
- температурные технологические воздействия от стационарного оборудования;
- нагрузки от людей, животных, оборудования на перекрытия жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий с пониженными нормативными значениями;
- снеговые нагрузки с пониженным расчетным значением, определяемым умножением полного расчетного значения на 0,5;
- температурные климатические воздействия с пониженными нормативными значениями и др.

Кратковременные нагрузки. К кратковременным нагрузкам относят:

- нагрузки от людей, животных, оборудования на перекрытия жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий с полными нормативными значениями, кроме нагрузок, указанных выше;
- снеговые нагрузки с полным расчетным значением;
- температурные климатические воздействия с полным нормативным значением;
- ветровые нагрузки;
- гололедные нагрузки.

Снеговые нагрузки. Нагрузка от веса снегового покрова имеет восемь градаций по величине. Каждый географический район охватывает огромную территорию, в пределах которой изменчивость нагрузки от снега значительна.

При расчетах величину снеговой нагрузки на покрытия определяют по нормам или уточняют на основании данных ближайших метеостанций, распо-

ложенных в пределах 20 км от объекта и имеющих срок наблюдения не менее 20 лет.

Полное расчетное значение снеговой нагрузки S на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле

$$S = S_g \cdot \mu \cdot c_e, \quad (1.5)$$

где μ - коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие;

c_e - коэффициент, учитывающий влияние скорости ветра в зимний период на величину снеговой нагрузки

Следует обратить внимание на то, что при определении снеговых нагрузок, как правило, рассматривается несколько схем нагружения. При этом необходимо производить расчеты на все рекомендуемые схемы нагружения в отдельности и назначать сечения элементов конструкций, полученные в результате расчетов по наиболее невыгодной схеме. Допускается применение эквивалентных упрощенных схем снеговых нагрузок. При расчете рам и колонн производственных зданий допускается учет только равномерно распределенной снеговой нагрузки, за исключением мест перепадов покрытий.

Нормативное значение снеговой нагрузки следует определять умножением расчетного значения на коэффициент 0,7.

Снеговые нагрузки с полным расчетным значением S следует относить к кратковременным нагрузкам, а с пониженным расчетным значением, определяемым как $0,5 S$, к временным длительным нагрузкам.

Коэффициенты μ , установленные в соответствии с указаниями типовых схем для пологих (с уклонами до 12 % или с $f/l \leq 0,05$) покрытий однопролетных и многопролетных зданий без фонарей, проектируемых в районах со средней скоростью ветра за три наиболее холодных месяца $v \geq 2$ м/с, снижают умножением на коэффициент c_e , равный

$$c_e = (1,2 - 0,1v\sqrt{k})(0,8 + 0,002b),$$

где k — коэффициент, зависящий от высоты и типа местности; b — ширина покрытия, принимаемая не более 100 м.

Для покрытий с уклонами от 12 до 20 % однопролетных и многопролетных зданий без фонарей, проектируемых в районах с $v \geq 4$ м/с, коэффициент μ следует снижать умножением на коэффициент, равный 0,85.

Снижение снеговой нагрузки не распространяется на покрытия зданий в районах со среднемесячной температурой воздуха в январе выше минус 5°C , на покрытия зданий, защищенных от прямого воздействия ветра соседними более высокими зданиями, удаленными менее чем на $10 h_1$, где h_1 - разность высот соседнего и проектируемого зданий, и на участки покрытий у перепадов высот зданий и парапетов.

Нормативное значение веса снегового покрова следует определять умножением расчетного значения на коэффициент 0,7.

Зоны повышенных снегоотложений. В местах перепада высот в зданиях (возле парапетов, между фонарями и т.п.) при выпадении снега, сопровождающемся ветром, происходит скопление снега (образуются снеговые мешки), которое необходимо учитывать при проведении расчетов. Зачастую при возведении пристроек к существующим зданиям, при устройстве козырьков и навесов не учитывают повышенное снегоотложение в этих местах, что приводит к авариям. Нормами определяются схемы снеговых нагрузок на участках, имеющих перепады высот. Наиболее часто приходится встречаться с вариантами нагружения, приведенными на рис. 1.3. Формулы вычисления максимального момента для приведенных расчетных схем приведены в табл.1.8.

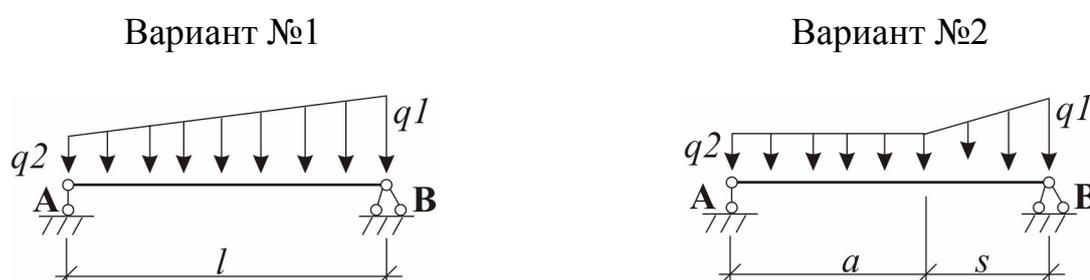


Рис. 1.3. Варианты схем нагружения снеговой нагрузкой в местах перепада высот покрытия

Таблица 1.8

Максимальный момент в балках в местах повышенного снегоотложения

Вариант нагружения	Реакции опор	Координата расчетного сечения	Максимальный момент
Вариант №1	$R_a = (q_1 - q_2)l/3 + q_2l/2$ $R_b = q_2l/2 + (q_1 - q_2)l/6$	$(q_1 - q_2) * X^2 - 2q_2 l * X - 2lR_a = 0$	$R_a * X - q_2 * X^2/2 - (q_1 - q_2) * X^3/6l$
Вариант №2	$R_a = q_2l/2 + (q_1 - q_2)S^2/6l$ $R_b = 0,5q_2l + 0,5S(q_1 - q_2) + 0,6667S * a/l$	$R_a - 2q_2 * X - 0.5 (q_1 - q_2) * (X - a)^2/S = 0$	$R_a * X - 0.5q_2 * X^2 - P(X - a)^3/6S = 0$ где $P = (q_1 - q_2) (X - a)/S$

Ветровые нагрузки. Ветровую нагрузку определяют как сумму средней и пульсационной составляющих.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m на высоте z над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 k c, \quad (1.6)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления, принимаемое в зависимости от ветрового района; k — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте; c — аэродинамический коэффициент.

При расчете многоэтажных зданий высотой до 40 м и одноэтажных производственных зданий высотой до 36 м при отношении высоты к пролету менее 1,5, размещаемых в местностях типов A и B (A — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра; B — городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м), пульсационную составляющую ветровой нагрузки не учитывают.

Коэффициент надежности по ветровой нагрузке следует принимать равным 1,4.

Температурные климатические воздействия. В случаях, предусмотренных нормами проектирования конструкций, следует учитывать изменение во времени средней температуры Δt и перепад температуры по сечению элемента.

Нормативные значения изменений средних температур по сечению элемента соответственно в теплое Δt_w и холодное Δt_c время года следует определять по формулам

$$\Delta t_w = t_w - t_{0c}; \quad (1.7)$$

$$\Delta t_c = t_c - t_{0w}, \quad (1.8)$$

где t_w, t_c — нормативные значения средних температур по сечению элемента в теплое и холодное время года; t_{0w}, t_{0c} — начальные температуры в теплое и холодное время года, определяемые по формулам

$$t_{0w} = 0,8t_{VII} + 0,2t_I; \quad (1.9)$$

$$t_{0c} = 0,2t_{VII} + 0,8t_I, \quad (1.10)$$

где t_I, t_{VII} — многолетние средние месячные температуры воздуха в январе и июле.

Коэффициент надежности по нагрузке γ_t для температурных климатических воздействий следует принимать равным 1,1.

1.2. Понятие о работоспособности конструкций. Внезапные и износные отказы. Резервирование прочности конструкций

Под работоспособностью понимается состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способности выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации

Интенсивность внезапных отказов. Отказ-событие заключается в нарушении работоспособного состояния объекта (который до возникновения отказа был работоспособным). Отказ элемента - явление случайное, но причины, обуславливающие появление отказа, связаны с определенными физическими и физико-механическими процессами, происходящими в материалах и конструкции на разных этапах его жизни. Протекание этих процессов зависит как от режимов работы (внутренних условий), так и от внешних условий работы элемента: температуры, влажности, давления и состава окружающей среды, вибрации и ударов, воздействия радиационных излучений и т. п.

Причиной возникновения отказов является превышение критических значений действующих нагрузок, предельно допустимых для данного материала или элемента. Следует учитывать, что критическое значение нагрузки не является строго постоянной величиной, а существует разброс значений около некоторой средней величины. Обычно указанный разброс подчиняется нормальному закону распределения. Кроме того, среднее значение и дисперсия изменяются при воздействии температуры, влажности и других физических и физико-химических факторов.

Пусть имеется материал или элемент, критическое значение напряжения (или нагрузок) которого распределяется по нормальному закону около среднего значения $\bar{\chi}_a$ и которому соответствует наибольшая плотность вероятности отказов. В действительности случайные величины, характеризующие критическое значение нагрузки для данного материала или элемента, непрерывно изменяются. Таким образом, речь идет уже не о просто случайной величине, а о случайной функции. Реализации (конкретный вид, принимаемый случайной функцией в каждом опыте) несколько отличаются друг от друга. Ряд реализаций случайной функции, полученных в результате группы опытов, образуют «семейство» реализаций этой функции. Оценку случайных функций производят с помощью характеристик, которые представляют в общем случае также функции. Основными характеристиками случайных функций являются:

- математическое ожидание;
- дисперсия и среднеквадратическое отклонение;
- корреляционная функция.

Использование случайных функций позволяет учитывать изменение физических параметров материалов, получать аналитическую оценку интенсивности отказов и других показателей надежности.

Чем выше качество проектирования и изготовления конструкции, тем меньше область возможного пересечения расчетных и фактических нагрузок и тем выше вероятность безотказной работы конструкции.

Интенсивность отказов конструкции приближенно вычисляется по формуле

$$\lambda \cong \frac{dq}{d\Delta\chi} \cdot \frac{d(\Delta\chi)}{dt}, \quad (1.11)$$

где

$$\Delta\chi = \overline{\chi_a} - \chi_b. \quad (1.12)$$

Значение $\Delta\chi$ может быть представлено через коэффициент запаса, который представляет собой отношение характеристик конструкции к действующим нагрузкам:

$$K_3 = \frac{\chi_a}{\chi_b}. \quad (1.13)$$

Тогда
$$\Delta\chi = \chi_b \left(\frac{\overline{\chi_a}}{\chi_b} - 1 \right) = \chi_b (K_3 - 1). \quad (1.14)$$

Нередко действующая нагрузка не остается постоянной, а колеблется около среднего значения χ_b . Если определение нагрузки подчинено нормальному закону, то можно считать, что имеется распределение значений критического напряжения с параметрами

$$\overline{\chi} = \overline{\chi_a} - \overline{\chi_b}; \sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}. \quad (1.15)$$

В общем случае вероятность отказа конструкции при случайном изменении нагрузок равна

$$q = f(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n), \quad (1.16)$$

где $\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n$ - разности между средними критическими значениями ($\overline{\chi_{пред,i}} = \chi_{a,i}$) и действующими значениями ($\chi_{раб,i} = \chi_b$) механических и других нагрузок (напряжений):

$$\Delta\chi_i = \overline{\chi_{пред,i}} - \chi_{раб,i} = \overline{\chi_{a,i}} - \chi_{b,i}. \quad (1.17)$$

Тогда интенсивность отказов можно вычислить по формуле

$$\lambda_i \cong \frac{dq}{dt} = \frac{d(\Delta\chi_1)}{\Delta\chi_1} \cdot \frac{d(\Delta\chi_1)}{dt} + \frac{d(\Delta\chi_2)}{d(\Delta\chi_2)} \cdot \frac{d(\Delta\chi_2)}{dt} + \dots + \frac{d(\Delta\chi_n)}{d(\Delta\chi_n)} \cdot \frac{d(\Delta\chi_n)}{dt}. \quad (1.18)$$

Здесь функции $\frac{dq}{d(\Delta\chi_i)}$ зависят от качества материала, конструкции и технологии изготовления; $\frac{d(\Delta\chi_i)}{dt}$ - функции изменения свойств материала в зависимости от их физико-химических характеристик, наличия защитных покрытий и других мер по защите от внешних воздействий, а также в зависимости от режимов и условий работы.

Знание физики отказов необходимо для правильного проектирования и эксплуатации конструкций, поскольку позволяет:

- сделать правильный выбор материалов и коэффициентов запаса;
- предусмотреть необходимые конструктивные меры уменьшения изменения $\Delta\chi$ для разных участков конструкции при влиянии температуры, влажности и других внешних факторов;
- предусмотреть необходимые регулировочные и контрольные органы для оценки и корректировки параметров, для устранения влияния времени работы, для создания защиты от влияния внешних факторов: температуры, давления и т.д.;
- учесть влияние режимов и условий работы конструкции на надежность в отношении отсутствия отказов и надежность в отношении отсутствия параметрических (постепенных) отказов.

Знание закономерностей отказов позволяет при конструировании заложить необходимую (возможную) надежность объекта.

В мире накоплен значительный статистический материал по авариям зданий и сооружений в зависимости от сроков их эксплуатации. Из табл. 1.9 и рис.1.4 видно, что максимальное количество аварий происходит в первые годы эксплуатации.

Таблица 1.9

Зависимость между сроком эксплуатации и аварийностью

Продолжительность эксплуатации до обрушения, лет	Число аварий	Проценты
До 10	142	32,4
11-20	87	19,9
21-30	38	8,7
31-40	17	3,9
41-50	33	7,6
51-60	21	4,8
61-70	29	6,6
71-80	11	2,5
Более 80	9	2,1
Не установлено	51	11,5
Всего	438	100,0



Рис. 1.4. График интенсивности отказов элементов как функция времени эксплуатации: 1- период приработки; 2- период нормальной эксплуатации; 3-период интенсивного износа

Это связано с наличием так называемого периода приработки, когда проявляется большинство дефектов, заложенных при проектировании и возведении. С увеличением возраста зданий и сооружений уменьшается влияние начальных дефектов и все более увеличивается вероятность аварий от повреждений и нарастающего естественного (физического) износа зданий и их конструкций.

Резервирование прочности конструкций. На стадиях проектирования и изготовления конструкций физические параметры имеют превосходство над расчетными параметрами. Это находит отражение при проведении контрольных испытаний элементов строительных конструкций кратковременной разрушающей нагрузкой. Превышение кратковременной разрушающей нагрузки над расчетной нагрузкой составляет для конструкций по виду материала следующие значения:

- металлические конструкции- 1,3...1,5;
- железобетонные конструкции - 1,8...2,3;
- деревянные конструкции- 2,4...2,8;
- каменные конструкции - 2,1...2,5.

Таким образом, создается эмпирический резерв (в дальнейшем резервирование) по несущей способности, который возникает по следующим причинам:

- методическим;
- технологическим;
- статистическим;
- функциональным;
- временным.

К методическим причинам резервирования относится определение расчетного аппарата по отношению к статистически вероятностной природе нормативных и расчетных сопротивлений, а также нагрузок и воздействий. Это означает, что условия предельных состояний записываются в виде аналитических выражений, где границы предельных состояний представлены в виде конкретного числа (расчетного сопротивления или прогиба, например), а их изменчивость не учитывается.

Геометрические параметры элементов конструкции имеют технологические и сортаментные допуски. Технологические возникают на стадии изготовления, а сортаментные - в связи с дискретным шагом размеров сортамента. К аналогичным результатам приводит использование типовых конструкций и узлов под унифицированную нагрузку. При проектировании и изготовлении неизбежно принимаются положительные (в сторону увеличения) технологические допуски и размеры сортамента по геометрическим параметрам. В этом заключается технологическая причина резервирования несущей способности конструкции.

При проектировании строительная конструкция абстрагируется расчетной схемой. Она может быть представлена в виде одного стержня (например, балка, стойка или плита) или системы стержней (например, ферма). Расчетная схема определяет условия соединения в стержнях, закрепления на опорах (шарнир, жесткая заделка), а также место, величину и характер действующих нагрузок. Используя методы строительной механики, в расчетной схеме определяют действующие усилия. В реальных условиях напряженно-деформированное состояние отличается от расчетных предпосылок. Наиболее простым отличием, влияющим на распределение величин внутренних усилий, является или не совсем «жесткое» защемление, или невозможность свободного поворота в шарнирной опоре. Усилия в расчетной схеме, как правило, больше, чем в реальной конструкции. Это относится к статической причине резервирования несущей способности.

Функциональное резервирование несущей способности связано со следующими факторами. Во-первых, расчетные сопротивления материалов принимают минимально вероятными, а расчетные нагрузки максимально вероятными (обеспеченность не менее 0,95). Однако такое положение в реальных условиях нормальной эксплуатации практически невозможно. Вероятность совпадения максимальных нагрузок и минимальной прочности материала оценивается величиной, равной $10^{-6} \dots 10^{-8}$. Во-вторых, в некоторых случаях несущая способность конструкции принимается завышенной, исходя из требований теплотехнического расчета (для кирпичных стен, например). В-третьих, в существующих нормах по проектированию конструкций при условиях эксплуатации, отличных от нормальных, учитывается система коэффициентов условий работы. Для этого расчетное сопротивление умножается на произведение этих коэффициентов. Однако известно, что кумулятивный повреждающий эффект от суммы различных факторов меньше, чем кумулятивный повреждающий эффект

от отдельных факторов. Это приводит к уменьшению расчетного сопротивления, а значит, к увеличению размеров сечения и, как следствие, несущей способности конструкции.

Временное резервирование несущей способности конструкции связано с отсутствием в расчетах в явном виде параметра времени, в пределах которого предполагается нормальное функционирование конструкции. В действующих нормах по проектированию строительных конструкций из основных материалов параметр времени учитывается при назначении расчетного сопротивления. Это означает, что расчетное сопротивление в материале конструкции в результате накопления повреждений достигнет действующего эксплуатационного напряжения в расчетных сечениях только к концу нормального (нормативного) срока эксплуатации.

Исследование каждой из вышеперечисленных причин резервирования является трудной и самостоятельной задачей.

1.3. Физический износ зданий, конструкций и их элементов

1.3.1. Понятие физического износа строительных конструкций и методы его оценки

Наиболее общей характеристикой процесса изменений, происходящих со зданием в течение жизненного цикла, является его износ, то есть последовательно нарастающая утрата потребительских свойств. Для определения степени такой утраты используют два производных понятия – моральный и физический износы.

Под физическим (материальным) износом конструкции, элемента, системы инженерного оборудования и здания в целом следует понимать утрату ими первоначальных технико-эксплуатационных качеств в результате воздействия природно-климатических факторов и жизнедеятельности человека.

Физический износ объектов недвижимости возникает как в процессе их старения, так и под влиянием внешних условий. Отметим, что сам характер эксплуатации не относится к числу факторов физического износа по той причине, что эксплуатационные нагрузки в абсолютном большинстве случаев являются статическими и по величине значительно ниже нормативных значений.

В зависимости от характера внешних воздействий физический износ можно разделить:

- на физический (природно-климатический) износ, или старение;
- на механический износ;
- на синергетический износ.

Физический (природно-климатический) износ, или старение, – износ от переменных нагрузжений, вызываемых циклическими изменением температурно-влажностных условий окружающей среды, например:

- коррозия металлических конструкций и арматуры железобетонных конструкций;
- эрозия;
- выветривание железобетонных и каменных конструкций;
- гниение и биоповреждения деревянных конструкций;
- износ под действием агрессивных сред.

Механический износ – износ от переменных напряжений, вызванных внешней многократно повторяющейся нагрузкой, например, истиранием.

Синергетический износ – износ, обусловленный совокупностью силовых нагрузок и природно-климатических факторов.

Кроме того, на строительные конструкции здания влияют и другие виды износа (рис.1.5).

В зависимости от скорости накопления отказов (повреждений) физический износ можно разделить на монотонный и интенсивный износ.

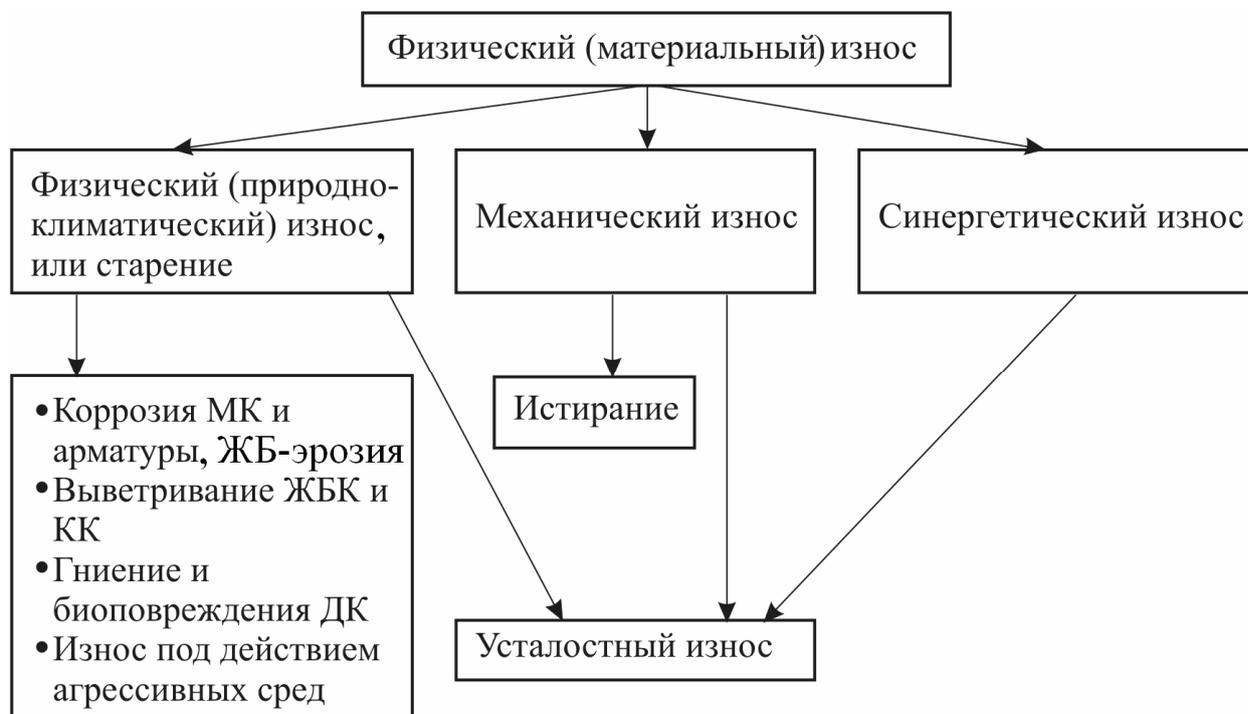


Рис. 1.5. Классификация физического износа в зависимости от характера внешних воздействий

Физический износ с учетом ремонтных мероприятий можно разделить:

- на естественный износ – процесс накопления повреждений без проведения мероприятий по простому воспроизводству и капитальному ремонту;
- на физический износ с учетом обслуживания и ремонта, который в свою очередь подразделяется на устранимый, частично устранимый и неустранимый износ.

Физический износ **по конечной цели оценки** (технической или экономической) предлагается различать двух форм. Физическим износом первой формы (стоимостный износ) следует считать износ, характеризуемый показателями, определяемыми при технической инвентаризации и переоценке основных фондов.

К физическому износу второй формы предлагается относить утрату способности выполнять заданные функции, заложенные при проектировании и возведении (несущую способность, прочность, устойчивость, влагостойкость, морозостойкость и др.).

Классификация физического износа по фазам жизненного цикла:

I фаза - интенсивный износ (период приработки, деформаций, дефектов, связанных с качеством материалов, изделий и конструкций, качеством строительно-монтажных работ, осадкой фундаментов и т.п.). Этот период не продолжителен, и на него распространяется гарантия, выдаваемая строителями (обычно на два года). В этот период производится так называемый послеосадочный ремонт.

II фаза - период нормальной эксплуатации, который характеризуется монотонным износом. Процесс износа конструктивных элементов и здания в целом замедляется в результате периодических капитальных ремонтов, замены и обновления конструктивных элементов. В этот период накапливаются необратимые деформации, приводящие к структурным изменениям материала, медленной его деградации.

III фаза – период интенсивного износа, характеризуется повторным усиленным нарастанием износа конструктивных элементов вследствие критического накопления «эксплуатационной усталости». На этой фазе износ здания остановить и компенсировать практически невозможно. Он достигает критического значения, и возникает вопрос о целесообразности ремонта или списания и разборки сооружения.

Следует отметить, что в настоящее время еще не до конца сложилась устойчивая терминология и единая классификация понятий физического износа, что приводит к определенным трудностям экспертизы зданий и сооружений.

1.3.2. Методы определения физического износа строительных конструкций

Существуют две основные формулы определения естественного физического износа с учетом его пропорциональности возрасту и предельному сроку службы:

$$И=100 \Phi (\Phi+Д)/2Д^2,$$

где И –износ здания, %;
Φ - фактический возраст здания;
Д - нормативный срок службы, годы.

$$И=100 \Phi (\Phi+Д)/2,67Д^2.$$

Различие между ними заключается в том, что первое выражение соответствует долговечности здания до износа 90 %, а второе выражение ограничивает срок службы здания износом 75 %, что на практике соответствует ветхому состоянию.

Приведенные формулы отражают параболический закон изменения физического износа и процесс естественной деградации здания в случаях, когда в нем не осуществляются процессы простого воспроизводства (капитальный ремонт).

Оценка физического износа по сводным таблицам визуальных признаков. Физический износ на момент его оценки выражается соотношением стоимости объективно необходимых ремонтных мероприятий, устраняющих повреждения конструкции, элемента, системы и здания в целом, и их восстановительной стоимости.

Физический износ отдельных конструкций, элементов, систем или их участков следует оценивать путём сравнения признаков физического износа, выявленных в результате визуального и инструментального обследования, с их значениями, приведёнными в ВСН 53-86(р) «Правила оценки физического износа жилых зданий».

Фактические сроки службы характеризуются реальными условиями эксплуатации во временном интервале. Вследствие потери качества происходит соответствующая утрата стоимости зданий и сооружений.

Величина физического износа – это количественная оценка технического состояния, характеризующая долю ущерба, потери по сравнению с первоначальным состоянием технических и эксплуатационных свойств конструкций за период эксплуатации. Физический износ здания с годами увеличивается (рис. 1.6). Фактически же в результате капитального и текущего ремонтов темпы роста физического износа снижаются.

Анализ обследования зданий в Москве и других городах России показывает, что износ как зданий в целом, так и отдельных его элементов происходит наиболее интенсивно в первый период эксплуатации (20-30 лет) и после 90-100 лет.

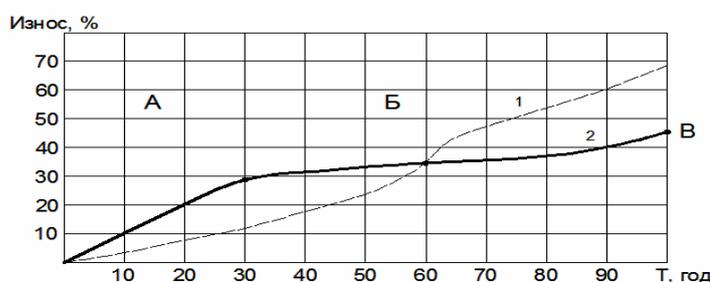


Рис. 1.6. Изменение физического износа жилых зданий:
1 – по данным С.К. Балашова; 2 – фактические данные

Ниже приведены (табл. 1.10 и 1.11) данные о физическом износе конструкций и элементов в укрупнённых показателях и характеристики состояния этих конструкций и элементов.

Таблица 1.10

Примерная стоимость капитального ремонта и восстановительная стоимость конструктивных элементов зданий

Физический износ, %	Оценка технического состояния	Общая характеристика технического состояния	Стоимость ремонта, %
0-20	Хорошее	Повреждений и деформаций нет. Имеются отдельные устраняемые при текущем ремонте мелкие дефекты, не влияющие на эксплуатацию конструктивного элемента. Капитальный ремонт может производиться лишь на отдельных участках, имеющих относительно повышенный износ	До 10
21-40	Удовлетворительное	Конструктивные элементы в целом пригодны для эксплуатации, но требуют капитального ремонта, который наиболее целесообразен именно на данной стадии	15...30
41-60	Неудовлетворительное	Эксплуатация конструктивных элементов возможна лишь при условии значительного капитального ремонта	40...80
61-80	Плохое	Состояние несущих конструктивных элементов аварийное, а несущих конструкций – весьма ветхое. Ограниченное выполнение конструктивными элементами своих функций возможно лишь по проведении охраняемых мероприятий или полной замены конструктивного элемента	90...120

На развитие физического износа влияет целый ряд факторов. Степень влияния некоторых из них приведена ниже в виде коэффициентов значимости:

- неиспользование жилого здания с отключением всех видов инженерного благоустройства..... 48;
- объём и характер капитального ремонта..... 14;
- периоды эксплуатации..... 3,2;
- уровень содержания и текущего ремонта..... 3,1;
- санитарно-гигиенические факторы (инсоляция и аэрация)..... 2,5;
- качество работ при капитальном ремонте..... 1,9;
- качество работ при сооружении здания..... 1,4;
- этажность..... 1,4;
- планировка здания..... 1,2;
- плотность заселения..... 1,1.

Физический износ конструкций и зданий связан со старением материалов. Интенсивность такого старения различна по времени.

Кроме временного (естественного) износа, конструкции зданий подвержены и другим видам материального износа: механическому, истиранию; усталостному при повторных знакопеременных нагрузках (температурных, ветровых); коррозии металлических деталей, конструкций и элементов; эрозии, выветриванию каменных и бетонных конструкций; гниению древесины, поражению её грибами и энтомоу вредителями.

Таблица 1.11

Классификация жилых зданий по физическому износу

Группа жилых зданий по показателю общего износа	Общая характеристика технического состояния здания	Потребность в капитальном ремонте
1 группа (до 10 %)	Неисправности основных строительных конструкций и инженерного оборудования отсутствуют. Существуют незначительные повреждения отдельных элементов	Техническое обслуживание и текущий ремонт
2 группа (до 20 %)	Наличие незначительных неисправностей инженерного оборудования, крыши, фасадов, систем благоустройства	Текущий ремонт отдельных элементов инженерного оборудования и других систем

<p>3 группа (до 30 %)</p>	<p>Неисправности фундаментов, стен, перекрытий, перегородок отсутствуют или имеются незначительные повреждения. Оконные и дверные заполнения, покрытия полов имеют значительные повреждения. Неисправности крыш, инженерного оборудования, наружных коммуникаций незначительны. Эксплуатация здания возможна с ограничениями</p>	<p>Для обеспечения нормальной эксплуатации необходим капитальный ремонт здания с восстановлением или заменой всех неисправных элементов</p>
<p>4 группа (до 40 %)</p>	<p>Фундаменты, стены, перекрытия, перегородки имеют значительные неисправности при ограниченном распространении. Оконные и дверные заполнения, крыша, инженерное оборудование имеют значительные неисправности при массовом их распространении по всему зданию. Эксплуатация возможна со значительными ограничениями</p>	<p>Для обеспечения нормальной эксплуатации необходим капитальный ремонт с восстановлением или частичной заменой фундаментов, стен, перекрытий, перегородок, инженерного оборудования, покрытия крыш, полов</p>
<p>5 группа (от 40 до 79 % для каменных зданий, от 40 до 65% для деревянных зданий)</p>	<p>Фундаменты, стены, перекрытия и перегородки имеют значительные неисправности при их массовом распространении по всему зданию. Эксплуатация здания должна быть немедленно прекращена</p>	<p>Требуется немедленный капитальный ремонт (реконструкция) всего здания с восстановлением фундаментов, стен и полной заменой крыши, перекрытий и перегородок</p>
<p>6 группа (свыше 70 % для каменных и свыше 65 % для деревянных зданий)</p>	<p>Основные строительные конструкции здания не способны выполнять заданные функции из-за значительного физического износа. Эксплуатация здания должна быть прекращена. Обеспечивается проведение охранных и поддерживающих работ</p>	<p>Проведение капитального ремонта нецелесообразно. Здание-памятник архитектуры подвергается частичной разборке и восстановлению в первоначальном виде. Рядовая застройка сносится</p>

Механизм и интенсивность действия этих процессов различны. Каждый из них в отдельности или в совокупности ведёт к постепенной утрате прочностных и эксплуатационных качеств конструкций, элементов и зданий в целом.

Наиболее распространёнными методами оценки физического (материального) износа являются:

- определение износа по нормативным срокам службы (обратная задача);
- обследование фактического состояния объекта в целом или его основных конструктивных элементов (частей, узлов);
- определение износа по объёму выполненных ремонтных работ для восстановления конструкции.

Важность обследования и уточнения расчёта величины физического износа определяется тем, что сроки, объёмы и виды ремонта назначаются в зависимости от физического износа конструкций и зданий в целом.

Определение износа конструкции, элемента или системы. Физический износ конструкции, элемента или системы, имеющих различную степень износа отдельных участков, следует определять по формуле

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_i * P_i / P_k,$$

где Φ_k – физический износ конструкции, элемента или системы;

Φ_i – физический износ участка конструкции, элемента или системы, определённый по ВСН 53-86 (р);

P_i – размеры (площадь или длина) повреждённого участка, m^2 или m ;

P_k – размеры всей конструкции, m^2 или m ;

n – число повреждённых участков.

Определение физического износа здания. Физический износ здания следует определять по формуле

$$\Phi_z = \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_{ki} * l_i,$$

где Φ_z – физический износ здания; Φ_{ki} – физический износ отдельной конструкции, элемента или системы; l_i – коэффициент, соответствующий доле восстановительной стоимости отдельной конструкции, элемента или системы в общей восстановительной стоимости здания; n – число отдельных конструкций, элементов или систем в здании.

Долю восстановительной стоимости отдельных конструкций, элементов и систем в общей восстановительной стоимости здания следует принимать по укрупнённым показателям восстановительной стоимости жилых зданий, утверждённым в установленном порядке, а для конструкций, элементов и систем, не имеющих утверждённых показателей, – по их сметной стоимости.

Аналитическая оценка физического износа. Экспериментальное обоснование искомой функциональной зависимости пока еще не может быть вполне достоверным, так как в распоряжении исследователей имеются весьма скудные экспериментальные данные, не систематизированные по единой методике. Поэтому в качестве первого приближения принимается экспоненциальный закон, имеющий определенное теоретическое обоснование и согласующийся с упомянутыми экспериментальными данными.

Известно, что экспоненциальному закону подчиняются химические реакции, которые играют важную роль при старении и коррозии, а также многие другие явления.

Теоретическим его обоснованием является пропорциональность скорости изменения какой-либо величины K (например, интенсивности отказов, потери прочности и т.п.).

$$K=K_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где K_0 – значение соответствующего параметра в начальный момент, λ – постоянная износа, измеряемая в единицах, обратных времени, и характеризующая относительную скорость изменения соответствующего параметра долговечности, как-то числа отказов и т.п.

Износ Z в относительных единицах равен

$$Z= 1-K/K_0=1- e^{-\lambda t},$$

или

$$Z=(1- e^{-\lambda t}) \cdot 100.$$

Теоретически для определения λ достаточно одного измерения, однако во избежание грубых ошибок лучше определить ее среднюю величину из множества измерений, если такое возможно.

Для упрощения расчетного анализа каждого звена конструкций зданий целесообразно уравнение связи между несущей способностью и исходными характеристиками представлять в виде произведения случайных функций, каждая из которых отражает влияние одного или двух параметров. Таким образом, нормализованная задача позволяет путем замены двух случайных функций одной получить одну суммарную функцию вероятности разрушения рассматриваемого звена. Для приближенного решения целесообразно использовать простые параметрические зависимости. Так, безотказность можно определить как

$$P(t)= P_1(t) P_2(t),$$

где $P_1(t)$ – вероятность появления внезапного отказа, равная $e^{-\lambda t}$ (λ – интенсивность отказа, равная $f(t)/P_1(t)$);

$P_2(t)$ – вероятность появления постепенного отказа:

$$P_2(t) = 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2 \times \pi \times \sigma}} \right) \times \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2 \times \sigma^2}} dt.$$

Следовательно, $P_1(t)$ представляет экспоненциальный закон надежности, а вероятность $P_2(t)$ - нормальный закон распределения.

Физический износ с учетом аварийной ситуации. Степень повреждения конструктивных элементов объекта в этом случае определяется с учетом совокупности двух факторов:

- наличия разрушений;
- наличия физического износа сохранившихся частей конструктивных элементов.

Степень повреждения конструктивных элементов объекта (Π_i) определяется по формуле

$$\Pi_i = P_q + (100 - P_q) * I_3,$$

где P_q - часть поврежденного или частично разрушенного конструктивного элемента, %;

I_3 – процент физического износа сохранившейся части конструктивного элемента.

Степень повреждения объекта Π определяется по формуле

$$\Pi = \Sigma(\Pi_i * B_i) / \Sigma(B_i),$$

где Π_i – степень повреждения i -го конструктивного элемента,

B_i - удельный вес i -го конструктивного элемента (принимается по укрупненным нормам восстановительного ремонта).

Техническое состояние объекта строительства можно оценить по величине риска аварии, представляемого в виде числа, показывающего, во сколько раз фактическая вероятность аварии превышает теоретическую, обусловленную действующими строительными нормами и закладываемую по умолчанию в объекты при их проектировании. Для любого здания и сооружения можно определить не только фактический риск аварии, но и два его стандартных значения:

- допустимое, являющееся верхней границей приемлемых рисков;
- предельное, при достижении которого на объекте должны быть начаты ремонтно-восстановительные работы для продления его жизненного цикла.

Фактический риск аварии зависит от состояния строительных конструкций, образующих несущую систему объекта. Исходя из теории квалиметрии, уровни надежности (μ) «слабых» конструкций можно принять за «единичные» показатели технического состояния объекта, а за «комплексные» показатели – законы распределения плотности вероятностей значений надежности, оставшихся в каждой группе конструкций. Очевидно, что нижняя граница этого распределения будет равна μ . Также очевидно, что вид закона должен зависеть от «возраста» исследуемого объекта. Математическая модель закона для объектов,

у которых фактический срок службы (T_{ϕ}) не превышает 45 % от нормативного срока службы ($T_{н}$), имеет вид

$$f(\zeta) = (2\zeta - 1) / \mu(1 - \mu);$$

для подержанных зданий

$$(0,45T_{н} < T_{\phi} < 0,7T_{н}) - f(\zeta) = 1 / (1 - \mu);$$

для старых и ветхих

$$(T_{\phi} > 0,7T_{н}) - f(\zeta) = 2(1 - \zeta) / (1 - \mu)^2,$$

где ζ из диапазона ($\mu > \zeta > 1$) являются значениями надежности конструкций в группе, включая «слабую» конструкцию.

«Интегральным» показателем технического состояния объекта является фактический риск аварии. Действительно, чем ближе этот риск к предельному значению, тем выше конструктивный износ объекта и, следовательно, ниже его остаточный ресурс.

Накопление повреждений в несущих конструкциях происходит по экспоненциальному закону вида

$$\Psi = \exp \{ - [(K - K_{д}) / (K_{п} - K_{д})] \},$$

где $K_{д}$ - допустимый риск аварии;

$K_{п}$ = предельный риск аварии.

Конструктивный износ и остаточный ресурс в этом случае определяются следующими формулами:

$$\lambda = 100 (1 - \psi),$$

$$T_0 = (T_{н} - T_{\phi}) \psi.$$

В приведенных выше зависимостях используются параметры, которые зачастую определяются комиссионно, путем анализа мнения отдельных специалистов и принятия затем соответствующего административного решения. Обоснованность таких решений можно оценить, используя методы теории вероятностей, математической статистики с применением современной компьютерной техники.

1.4. Диагностика состояния конструкций методом экспертных оценок

1.4.1. Сущность метода экспертных оценок

Многие параметры, входящие в зависимости, описывающие надежность, долговечность, различного вида износы, в большинстве случаев не поддаются

прямому измерению на объекте. В этом случае для оценки состояния привлекаются эксперты или группы экспертов, имеющих существенный опыт. Такой способ определения параметров получил название метода экспертных оценок. Сущность метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественной оценкой суждений и формальной обработкой результатов. Получаемое в результате обработки обобщенное мнение экспертов принимается как решение проблемы. Характерными особенностями метода экспертных оценок как научного инструмента решения сложных неформализуемых проблем являются, во-первых, научно обоснованная организация проведения всех этапов экспертизы, обеспечивающая наибольшую эффективность работы на каждом из этапов, и, во-вторых, применение количественных методов как при организации экспертизы, так и при оценке суждений экспертов и формальной групповой обработке результатов. Эти две особенности отличают метод экспертных оценок от обычной давно известной экспертизы, широко применяемой в различных сферах человеческой деятельности.

Экспертные коллективные оценки широко использовались в государственном масштабе для решения сложных проблем управления народным хозяйством уже в первые годы советской власти. В 1918 году при Высшем совете народного хозяйства был создан Совет экспертов, задачей которого являлось решение наиболее сложных проблем реорганизации народного хозяйства страны. При составлении пятилетних планов развития народного хозяйства страны систематически использовались экспертные оценки широкого круга специалистов.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом метод экспертных оценок широко применяется для решения важных проблем различного характера. В различных отраслях, объединениях и на предприятиях действуют постоянные или временные экспертные комиссии, формирующие решения по различным сложным неформализуемым проблемам.

Принимая решения, мы обычно предполагаем, что информация, используемая для их обоснования, достоверна и надежна. Но для многих научно-технических задач, являющихся по своему характеру качественно новыми и неповторяющимися, это предположение либо заведомо не реализуется, либо в момент принятия решения его не удается доказать.

Наличие информации и правильность ее использования в значительной степени определяют оптимальность выбранного решения. Кроме данных, состоящих из числовых статистических величин, информация включает в себя другие, не поддающиеся непосредственному измерению величины, например, предположения о возможных решениях и их результатах. Практика показывает, что затруднения, возникающие при поиске и выборе деловых решений, обусловлены, прежде всего, недостаточно высоким качеством и неполнотой имеющейся информации.

При выработке сложных решений возникают следующие связанные с информацией затруднения:

- исходная статистическая информация зачастую бывает недостаточно достоверной;
- некоторая часть информации имеет качественный характер и не поддается количественной оценке;
- в процессе подготовки решений часто возникают ситуации, когда в принципе необходимую информацию получить можно, однако в момент принятия решения она отсутствует, поскольку это связано с большими затратами времени или средств;
- существует большая группа факторов, которые могут повлиять на реализацию решения в будущем, но их нельзя точно предсказать;
- одна из наиболее существенных трудностей при выборе решений состоит в том, что любая научная или техническая идея содержит в себе потенциальную возможность различных схем ее реализации, а любое действие может приводить к многочисленным исходам. Проблема выбора наилучшего варианта решения может возникнуть и потому, что обычно существуют ограничения в ресурсах, а следовательно, принятие одного варианта всегда связано с отказом от других решений;
- при выборе наилучшего решения мы нередко сталкиваемся с многозначностью обобщенного критерия, на основе которого можно произвести сравнение возможных исходов. Многозначность, многомерность и качественное различие показателей являются серьезным препятствием для получения обобщенной оценки относительной эффективности, важности, ценности или полезности каждого из возможных решений.

В связи с этим одна из главных особенностей решения сложных проблем состоит в том, что применение расчетов здесь всегда переплетается с использованием суждений руководителей, ученых, специалистов. Эти суждения позволяют хотя бы частично компенсировать недостаток информации, полнее использовать индивидуальный и коллективный опыт, учесть предположения специалистов о будущих состояниях объектов. Закономерность развития науки и техники состоит в том, что новые знания, научно-техническая информация накапливаются в течение длительного периода времени. Нередко это накопление идет в скрытой форме в сознании ученых и разработчиков.

Опыт показывает, что использование несистематизированных суждений отдельных специалистов оказывается при решении многих сложных научных и технических проблем недостаточно эффективным вследствие многообразия взаимосвязей между основными элементами таких проблем и невозможности охвата их всех. При использовании традиционных процедур подготовки решений нередко не удается рассмотреть широкий диапазон факторов, учесть весь спектр альтернативных путей решения проблем.

Все это заставляет прибегать к комплектованию групп специалистов, представляющих в качестве экспертов различные области знаний. Применение групповой экспертизы позволяет не только рассмотреть множество аспектов и факторов, но и объединить различные подходы, с помощью которых руководи-

тель находит наилучшее решение. Комплексное использование интуиции (неосознанного мышления), логического мышления и количественных оценок с их формальной обработкой позволяет получить эффективное решение проблемы.

В процессе работы эксперты выполняют две основные функции: формируют объекты (альтернативные ситуации, цели, решения и т. п.) и производят измерение их характеристик (вероятности свершения событий, коэффициенты значимости целей, предпочтения решений и т. п.). Формирование объектов осуществляется экспертами на основе логического мышления и интуиции. При этом большую роль играют знания и опыт эксперта.

Методы опроса в настоящее время в нашей стране и за рубежом широко применяются для решения важных проблем различного характера. В различных отраслях, объединениях и на предприятиях действуют постоянные или временные экспертные комиссии, формирующие решения по различным сложным неформализуемым проблемам.

Все множество плохо формализуемых проблем условно можно разделить на два класса. К *первому классу* относятся проблемы, в отношении которых имеется достаточный информационный потенциал, позволяющий успешно решать эти проблемы. Основные трудности решения проблем первого класса при экспертной оценке заключаются в реализации информационной обработки и основываются на использовании принципа «хорошего измерителя». Данный принцип означает, что верны следующие гипотезы:

- эксперт является хранилищем большого объема рационально обработанной информации, и поэтому он может рассматриваться как качественный источник информации;
- групповое мнение экспертов близко к истинному решению проблемы.

Если эти гипотезы верны, то для построения процедур опроса и алгоритмов обработки можно использовать результаты теории измерений и математической статистики.

К *второму классу* относятся проблемы, в отношении которых информационный потенциал знаний недостаточен для уверенности в справедливости указанных гипотез. При решении проблем этого класса экспертов уже нельзя рассматривать как «хороших измерителей». Поэтому необходимо очень осторожно проводить обработку результатов экспертизы. Применение методов осреднения, справедливых для «хороших измерителей», в данном случае может привести к большим ошибкам. Например, мнение одного эксперта, значительно отличающееся от мнений остальных экспертов, может оказаться правильным. В связи с этим для проблем второго класса в основном должна применяться качественная обработка.

Область применения метода экспертных оценок весьма широка. Перечислим типовые задачи, решаемые методом экспертных оценок:

- составление перечня возможных событий за определенный промежуток времени;

- определение наиболее вероятных интервалов времени свершения совокупности событий;
- определение целей и задач с упорядочением их по степени важности;
- определение альтернативных вариантов решения задачи с оценкой их предпочтения;
- альтернативное распределение ресурсов для решения задач с оценкой их предпочтительности;
- нахождение альтернативных вариантов принятия решений в определенной ситуации с оценкой их предпочтительности.

Для решения перечисленных типовых задач в настоящее время применяются различные разновидности метода экспертных оценок. К основным видам относят анкетирование и интервьюирование; мозговой штурм; дискуссию; совещание; оперативную игру; сценарий.

Каждый из этих видов экспертного оценивания обладает своими преимуществами и недостатками, определяющими рациональную область применения. Во многих случаях наибольший эффект дает комплексное применение нескольких видов экспертизы.

Анкетирование и сценарий предполагают индивидуальную работу эксперта. Интервьюирование может осуществляться как индивидуально, так и с группой экспертов. Остальные виды экспертизы предполагают коллективное участие экспертов. Независимо от индивидуального или группового участия экспертов в работе целесообразно получать информацию от множества экспертов. Это позволяет получить на основе обработки данных более достоверные результаты, а также новую информацию о зависимости явлений, событий, фактов, суждений экспертов, не содержащуюся в явном виде в высказываниях экспертов.

При использовании метода экспертных оценок возникают свои проблемы. Основными из них являются подбор экспертов, проведение опроса экспертов, обработка результатов опроса, организация процедур экспертизы.

1.4.2. Организация экспертного оценивания

Первым этапом организации работ по применению экспертного оценивания является подготовка и издание руководящего документа, в котором формулируется цель работы и основные положения по ее выполнению. В этом документе должны быть отражены следующие вопросы: постановка задачи эксперимента, цели эксперимента; обоснование необходимости эксперимента; сроки выполнения работ; задачи и состав группы управления; обязанности и права группы; финансовое и материальное обеспечение работ.

Для подготовки этого документа, а также для руководства всей работой назначается руководитель экспертизы. На него возлагается формирование группы управления и ответственность за организацию ее работы.

После формирования группа управления осуществляет работу по подбору экспертной группы примерно в такой последовательности: уяснение решаемой проблемы; определение круга областей деятельности, связанных с проблемой; определение долевого состава экспертов по каждой области деятельности; определение количества экспертов в группе; составление предварительного списка экспертов с учетом их местонахождения; анализ качеств экспертов и уточнение списка экспертов в группе; получение согласия экспертов на участие в работе; составление окончательного списка экспертной группы.

Параллельно с процессом формирования группы экспертов группа управления проводит разработку организации и методики проведения опроса экспертов. При этом решаются следующие вопросы: место и время проведения опроса; количество и задачи туров опроса; форма проведения опроса; порядок фиксации и сбора результатов опроса; состав необходимых документов.

Следующим этапом работы группы управления является определение организации и методики обработки, данных опроса. На данном этапе необходимо определить задачи и сроки обработки, процедуры и алгоритмы обработки, силы и средства, необходимые для проведения обработки.

В процессе непосредственного проведения опроса экспертов и обработки его результатов группа управления выполняет комплекс работ в соответствии с разработанным планом, корректируя его по мере необходимости по содержанию, срокам и обеспечению ресурсами.

Последним этапом работ для группы управления является оформление результатов работы. На этом этапе производится анализ результатов экспертного оценивания; составление отчета; обсуждение и одобрение результатов; представление итогов работы на утверждение; ознакомление с результатами экспертизы организаций и лиц.

Подбор экспертов. Для реализации процедуры экспертного оценивания необходимо сформировать группу экспертов. Общим требованием при формировании группы экспертов является эффективное решение проблемы экспертизы.

Эффективность решения проблемы определяется характеристиками достоверности экспертизы и затрат на ее проведение.

Достоверность экспертного оценивания может быть определена только на основе практического решения проблемы и анализа ее результатов. Использование экспертов как раз и обусловлено тем, что отсутствуют какие-либо другие способы получения информации. Поэтому оценка достоверности экспертизы может осуществляться, как правило, только по апостериорным (послеопытным) данным. Если экспертиза проводится систематически с примерно одним и тем же составом экспертов, то появляется возможность накопления статистических данных по достоверности работы группы экспертов и получения устойчивой числовой оценки достоверности. Эту оценку можно использовать в качестве априорных (предварительных) данных о достоверности группы экспертов для последующих экспертиз.

Достоверность группового экспертного оценивания зависит от общего числа экспертов в группе, долевого состава различных специалистов в группе, от характеристик экспертов. Определение характера зависимости достоверности от перечисленных факторов является еще одной проблемой процедуры подбора экспертов.

Сложной проблемой процедуры подбора является формирование системы характеристик эксперта, существенно влияющих на ход и результаты экспертизы. Эти характеристики должны описывать специфические свойства специалиста и возможные отношения между людьми, влияющие на экспертизу. Важным требованием к характеристикам эксперта является измеримость этих характеристик. Еще одной проблемой является организация процедуры подбора экспертов, т.е. определение четкой последовательности работ, выполняемых в процессе подбора экспертов, и необходимых ресурсов для их реализации.

Максимальное число экспертов в группе проверяется на ограничение по финансовым ресурсам. Определив зависимость между достоверностью, количеством экспертов и расходами на оплату, группа управления представляет руководству эту информацию и формулирует возможные альтернативы решений. Такими альтернативами могут быть либо снижение достоверности результатов экспертного оценивания до уровня, обеспечивающего выполнение ограничения по расходам на оплату экспертов, либо сохранение исходного требования на достоверность экспертизы и увеличение расходов на оплату экспертов.

Следующим этапом работы по подбору экспертов является составление предварительного списка экспертов. При составлении этого списка проводится анализ качеств экспертов. Кроме учета качеств экспертов, определяются их местонахождение и возможности участия выбранных специалистов в экспертизе. При оценке качеств учитывается мнение людей, хорошо знающих кандидатов в эксперты.

После составления и утверждения списка экспертам посылается сообщение о включении их в состав экспертной группы. Если экспертное оценивание производится методом анкетирования, то одновременно с уведомлением о включении в экспертную группу всем экспертам высылаются анкеты с необходимыми инструкциями для их заполнения. Сообщением экспертам о включении их в экспертизу заканчивается работа по подбору экспертов.

Опрос экспертов. Опрос – главный этап совместной работы группы управления и экспертов, включающий:

- постановку задачи и предъявление вопросов экспертам;
- информационное обеспечение работы экспертов;
- выработку экспертами суждений, оценок, предложений;
- сбор результатов работы экспертов.

Можно назвать три типа задач, которые решаются в процессе опроса:

- оценка (качественная или количественная) заданных объектов;
- построение новых объектов;
- построение и оценка новых объектов.

При коллективной экспертизе используются следующие основные виды опроса: дискуссия, анкетирование и интервьюирование, метод коллективной генерации идей, или мозговой штурм.

Анкетирование может проводиться с обратной связью или без нее. При анкетировании с обратной связью опрос экспертов производится в несколько этапов с доведением до сведения экспертов некоторых результатов опроса на предыдущем этапе, включая оценки отдельных экспертов и их аргументацию.

Главным в организации опроса является обеспечение максимума информации и максимума творческой активности, самостоятельности эксперта. Необходимо стремиться довести до каждого эксперта по возможности всю информацию, относящуюся к анализируемому явлению, которой располагают как эксперты, так и организаторы опроса.

Однако возможности эксперта по переработке информации ограничены. В результате эксперт может принять решение, не используя всей информации, имеющейся в его распоряжении. Кроме того, новая информация воспринимается человеком с определенным внутренним сопротивлением и не сразу влияет на уже сложившиеся субъективные оценки. Отношение к новой информации благожелательнее, а восприятие и использование ее полнее, если она представляется в доходчивой, яркой и компактной форме.

Из этих психологических особенностей следует необходимость предоставления экспертам возможностей для фиксации поступающей информации путем ведения записей, использования технических средств, а также необходимость предварительной обработки информации и представления ее экспертам в наиболее воспринимаемой форме.

Следует подчеркнуть противоречивость значения обмена экспертами информацией, так как получение такой информации таит опасность потери творческой независимости в построении модели объекта экспертом. Разрешение этого противоречия в полной мере невозможно, и при каждой экспертизе ее организаторы должны находить разумный компромисс, прежде всего, путем выбора вида опроса, формы и степени общения экспертов.

Каждый из видов опроса имеет свои достоинства и недостатки в построении обмена информацией между экспертами и в организации их независимого творчества. Выбор того или иного вида опроса определяется многими факторами, из которых основными являются:

- цель и задачи экспертизы;
- существо и сложность анализируемой проблемы;
- полнота и достоверность исходной информации;
- требуемые объем и достоверность информации, получаемой в результате опроса;
- время, отведенное на опрос и экспертизу в целом;
- допустимая стоимость опроса и экспертизы в целом;
- количество экспертов и членов группы управления, их характеристики.

Анкетирование является наиболее эффективным и самым распространенным видом опроса, ибо позволяет наилучшим образом сочетать информационное обеспечение экспертов с их самостоятельным творчеством.

Формализация информации и шкалы сравнения. Рациональное использование информации, полученной от экспертов, возможно при условии преобразования ее в форму, удобную для дальнейшего анализа, направленного на подготовку и принятие решений. Возможности формализации информации зависят от специфических особенностей исследуемого объекта, надежности и полноты имеющихся данных, уровня принятия решения.

Формализация информации, полученной от экспертов, должна быть направлена на подготовку решения таких технических и хозяйственных задач, которые не могут быть в полной мере описаны математически, поскольку являются «слабоструктурированными», т.е. содержат неопределенности, связанные не только с измерением, но и самим характером исследуемых целей, средств их достижения и внешних условий.

При анализе перспектив необходимо не только представить в виде косвенных оценок часть информации, не поддающуюся количественному измерению, и не только выразить с помощью таких оценок количественно измеримую информацию, о которой в момент подготовки решения нет достаточно надежных данных. Самое важное – формализовать эту информацию так, чтобы помочь принимающему решение выбрать из множества действий одно или несколько, наиболее предпочтительные в отношении некоторого критерия.

Если эксперт в состоянии сравнить и оценить возможные варианты действий, приписав каждому из них определенное число, значит, он обладает определенной системой предпочтений. В зависимости от того, по какой шкале могут быть заданы эти предпочтения, экспертные оценки содержат больший или меньший объем информации и обладают различной способностью к формализации.

Исследуемые объекты или явления можно опознавать или различать на основе признаков или факторов. Фактор – это множество, состоящее, по крайней мере, из двух элементов, отражающих различные уровни некоторых подлежащих рассмотрению величин. Уровень одних факторов может быть выражен количественно (в рублях, процентах, квадратных метрах и т.д.), такие факторы называются количественными. Уровень других нельзя выразить с помощью числа, их называют качественными.

Факторы условно разделяют на дискретные и непрерывные. Дискретными являются факторы с определенным, обычно небольшим, числом уровней. Факторы, уровни которых рассматриваются как образующие непрерывное множество, называют непрерывными. В зависимости от целей и возможностей анализа одни и те же факторы могут трактоваться или как дискретные, или как непрерывные.

Рассмотрим основные логические аксиомы, которые используются в экспертных методах при формализации информации с помощью различных шкал.

При использовании *номинальных шкал* исследуемые объекты можно опознавать и различать на основе трех аксиом идентификации:

- 1) i либо есть j , либо есть не j ;
- 2) если i есть j , то j есть i ;
- 3) если i есть j и j есть k , то i есть k .

Факторы в данном случае выступают как ассоциативные показатели, обладающие информацией, которая может быть формализована в виде бинарных оценок двух уровней: 1 (идентичен) или 0 (различен).

В случаях, когда исследуемые объекты можно в результате сравнения расположить в определенной последовательности с учетом какого-либо существенного фактора (факторов), используются *порядковые шкалы*, позволяющие устанавливать равноценность или доминирование.

Предположим, что необходимо расположить в определенной последовательности n объектов по какому-либо фактору (критерию). Представим это упорядочение в виде матрицы $A(a_{ij})$, где $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Величины a_{ij} устанавливают соотношения между объектами и могут быть определены следующим образом:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1, \text{ если } i \text{ предпочтительнее } j; \\ -1, \text{ если } j \text{ предпочтительнее } i; \\ 0, \text{ если } i, j \text{ равноценны.} \end{cases}$$

Установим основные аксиомы, необходимые для соблюдения условий упорядочения. Соотношение $a_{ij} = +1$, означающее, что i предпочтительнее j , должно быть асимметричным; т.е. если $a_{ij} = +1$, то $a_{ji} = -1$, транзитивным, т.е., если $a_{ij} = +1$, $a_{jk} = +1$, то $a_{ik} = +1$.

Соотношение $a_{ij} = 0$, означающее, что i и j равноценны, называется соотношением эквивалентности. Такое соотношение должно быть:

- рефлексивным, т.е. $a_{ij} = 0$;
- симметричным, т.е., если $a_{ij} = 0$, то $a_{ji} = 0$;
- транзитивным, т.е., если $a_{ij} = 0$ и $a_{jk} = 0$, то $a_{ik} = 0$.

Кроме того, эти два соотношения должны быть совместимы, т.е. если $a_{ij} = +1$ и $a_{jk} = 0$, то $a_{ik} = +1$, а также если $a_{ij} = 0$ и $a_{jk} = +1$, то $a_{ik} = +1$.

И, наконец, упорядочение должно быть связным, т.е. для любых i и j или $a_{ij} = +1$, или $a_{ij} = -1$, или $a_{ij} = 0$.

Использование порядковых шкал позволяет различать объекты и в тех случаях, когда фактор (критерий) не задан в явном виде, т.е. когда мы не знаем признака сравнения, но можем частично или полностью упорядочить объекты на основе системы предпочтений, которой обладает эксперт.

Любое множество A будем называть упорядоченным, если для любых двух его элементов X и Y установлено, что либо X предшествует Y , либо Y

предшествует X . Иногда не удастся установить строгое предшествование для всех элементов множества, но можно произвести «групповое» упорядочение, когда упорядочиваются подмножества равноценных элементов. Далее можно поставить задачу сравнения и упорядочения этих подмножеств.

Использование порядковых шкал позволяет производить преобразования полученных от экспертов оценок, соответствующих всем монотонно возрастающим функциям. Так, например, положительные оценки могут быть заменены их квадратами, или логарифмами, или любой другой монотонно возрастающей функцией.

Для формализации оценок, полученных от экспертов, часто используют *интервальные шкалы*. При использовании таких шкал можно применять почти все обычные статистические процедуры. Исключением являются те процедуры, которые предполагают знание «истинно» нулевой точки шкалы, которая вводится здесь условно.

Интервальные шкалы предполагают возможность трансформации оценок, полученных на одной шкале, в оценки на другой шкале при помощи уравнения $x' = ax + b$.

Разности между значениями на шкале интервалов становятся мерами на шкале отношений, т.е. на обычной числовой шкале, т.к. в результате вычитания можно избавиться от постоянного слагаемого b .

В ряде случаев при формализации экспертных оценок используется свойство аддитивности, которое присуще только шкале отношений. Наличие аддитивности выражается следующими аксиомами:

- 1) если $j = a$ и $i > 0$, то $i + j > a$;
- 2) $i + j = j + i$;
- 3) если $i = a$ и $j = b$, то $i + j = a + b$;
- 4) $(i + j) + k = i + (j + k)$.

Обычная ситуация, когда необходимо принять решение с учетом аддитивности, заключается в том, что имеется несколько (по крайней мере два) качественных факторов. При наличии нескольких факторов, характеризующих конкретные объекты, существует множество реальных свойств и типов связей объектов.

В зависимости от характера и цели исследуемой проблемы факторы, по которым различаются объекты, могут быть количественно сравнимы или несравнимы между собой, частично сравнимы (т.е. не любой с любым, а лишь некоторые из них), упорядочены по степени их важности и т.д. Несοизмеримость различных факторов обусловлена не только необходимостью применения разных единиц измерения, но и тем, что каждый фактор, выражая определенное свойство, одновременно является оценкой отношения к данному свойству со стороны принимающего решение.

В практике часто возникают ситуации, когда необходимо принять решение с учетом многих факторов. Вопрос о том, какие именно факторы следует считать наиболее важными, зависит от качественных особенностей объекта решения и целей, которым должно отвечать это решение.

Например, при рассмотрении нескольких вариантов плана или вариантов организационно-технических мероприятий следует принимать во внимание факторы времени, затрат, технических и социальных результатов, экономической эффективности и т.д. Обычно все разнообразие факторов пытаются привести к однозначной комплексной оценке, причем наиболее удобной и распространенной оценкой является денежная.

Однако поскольку последствия любого решения, особенно решений, связанных с безопасностью эксплуатации, выходят за рамки стоимостных показателей, необходимы измерители, характеризующие значимость, полезность того или иного фактора (или их комплекса). Хотя вопрос о создании достаточно обоснованной формализованной системы таких измерителей еще далек от окончательного решения, можно указать некоторые общие черты, обеспечивающие подход к формализации этого процесса и к использованию того или иного логико-математического аппарата.

В случае, когда все факторы задают по некоторой разработанной номинальной шкале (т.е. задают по этой шкале некоторый признак «а» и исходное множество элементов M), то цель состоит в выборе подмножества элементов $M(a)$, обладающих этим признаком. В таких случаях производится сравнение элементов, точнее их свойств, с признаком-эталоном, а результат – разбиение множества – можно рассматривать как упорядочение по двухэлементной шкале, по которой каждому из элементов присваивается балл, равный либо нулю, либо единице.

В случае, когда факторы заданы по порядковой шкале или по нескольким порядковым шкалам, цель состоит в упорядочении элементов исходного множества, в выявлении с помощью экспертов скрытой упорядоченности, которая, по предположению, присуща этому множеству. Необходимым условием решения этой задачи является допущение о транзитивности. Чем полнее упорядочены элементы, тем легче применить логико-математические и комбинаторные методы к решению таких задач.

В зависимости от существа или важности того или иного фактора на этапе подготовки и принятия решений могут быть использованы различные шкалы. Такие факторы, как затраты, прибыль, время, могут быть оценены по порядковой или интервальной шкале (в рублях, днях процентах или условных единицах). Для оценки таких факторов, как срок окупаемости или сравнительная эффективность вариантов, может быть использована интервальная шкала; качественные или социальные факторы могут оцениваться по порядковым или номинальным шкалам.

Обработка экспертных оценок. Задачи обработки. После проведения опроса группы экспертов осуществляется обработка результатов. Исходной информацией для обработки являются числовые данные, выражающие предпочтения экспертов, и содержательное обоснование этих предпочтений. Целью обработки является получение обобщенных данных и новой информации, содержащейся в скрытой форме в экспертных оценках. На основе результатов обработки формируется решение проблемы.

Наличие как числовых данных, так и содержательных высказываний экспертов приводит к необходимости применения качественных и количественных методов обработки результатов группового экспертного оценивания. Удельный вес этих методов существенно зависит от класса проблем, решаемых экспертным оцениванием.

При решении проблем, относящихся к первому классу (имеется достаточный уровень знаний и информация), эксперты рассматриваются как «хорошие в среднем измерители». Под термином «хорошие в среднем измерители» понимается возможность получения результатов измерения, близких к истинным. Для множества экспертов их суждения группируются вблизи истинного значения. Отсюда следует, что для обработки результатов группового экспертного оценивания проблем первого класса можно успешно применять методы математической статистики, основанные на осреднении данных.

Проблемы второго класса, для решения которых еще не накоплен достаточный информационный потенциал, более сложные, и в связи с этим суждения экспертов могут очень сильно отличаться друг от друга. Более того, суждение одного эксперта, сильно отличающееся от остальных мнений, может оказаться истинным. Очевидно, что применение методов осреднения результатов групповой экспертной оценки при решении проблем второго класса может привести к большим ошибкам. Поэтому обработка результатов опроса экспертов в этом случае должна базироваться не на методах использующих принципы осреднения, а на методах качественного анализа. Учитывая, что проблемы первого класса являются наиболее распространенными в практике экспертного оценивания, основное внимание уделяется методам обработки результатов экспертизы именно для первого класса проблем.

В зависимости от целей экспертного оценивания и выбранного метода измерения при обработке результатов опроса возникают следующие задачи:

- построение обобщенной оценки объектов на основе индивидуальных оценок экспертов;
- построение обобщенной оценки на основе парного сравнения объектов каждым экспертом;
- определение относительных весов объектов;
- определение согласованности мнений экспертов;
- определение зависимостей между ранжировками;
- оценка надежности результатов обработки.

Задача построения обобщенной оценки объектов по индивидуальным оценкам экспертов возникает при групповом экспертном оценивании. Решение этой задачи зависит от использованного экспертами метода измерения.

При решении многих задач недостаточно осуществить упорядочение объектов по одному показателю или некоторой совокупности показателей. Желательно иметь численные значения для каждого объекта, определяющие относительную его важность по сравнению с другими объектами. Иными словами, для многих задач необходимо иметь оценки объектов, которые не только осуществляют их упорядочение, но и позволяют определять степень предпочтительности одного объекта перед другим. Для решения этой задачи можно непосредственно применить метод непосредственной оценки. Однако эту же задачу при определенных условиях можно решить путем обработки оценок экспертов.

Определение согласованности мнений экспертов производится путем вычисления числовой меры, характеризующей степень близости индивидуальных мнений. Анализ значения меры согласованности способствует выработке правильного суждения об общем уровне знаний по решаемой проблеме и выявлению группировок мнений экспертов. Качественный анализ причин группировки мнений позволяет установить существование различных взглядов, концепций, выявить научные школы, определить характер профессиональной деятельности и т.п. Все эти факторы дают возможность более глубоко осмыслить результаты опроса экспертов.

Обработкой результатов экспертного оценивания можно определять зависимости между ранжировками различных экспертов и тем самым устанавливать единство и различие в мнениях экспертов. Важную роль играет также установление зависимости между ранжировками, построенными по различным показателям сравнения объектов. Выявление таких зависимостей позволяет вскрыть связанные показатели сравнения и, возможно, осуществить их группировку по степени связи. Важность задачи определения зависимостей для практики очевидна. Например, если показателями сравнения являются различные цели, а объектами — средства достижения целей, то установление взаимосвязи между ранжировками, упорядочивающими средства с точки зрения достижения целей, позволяет обоснованно ответить на вопрос, в какой степени достижение одной цели при данных средствах способствует достижению других целей.

Оценки, получаемые на основе обработки результатов, представляют собой случайные объекты, поэтому одной из важных задач процедуры обработки является определение их надежности. Решению этой задачи должно уделяться соответствующее внимание.

Обработка результатов экспертизы представляет собой трудоемкий процесс. Выполнение операций вычисления оценок и показателей их надежности вручную связано с большими трудовыми затратами даже в случае решения простых задач упорядочения. В связи с этим целесообразно использовать вычислительную технику и особенно ЭВМ. Применение ЭВМ выдвигает пробле-

му разработки машинных программ, реализующих алгоритмы обработки результатов экспертного оценивания.

Групповая оценка объектов. Рассмотрим алгоритмы обработки результатов экспертного оценивания множества объектов. Пусть m экспертов произвели оценку n объектов по l показателям. Результаты оценки представлены в виде величин x_{ij}^h , где j – номер эксперта, i – номер объекта, h – номер показателя (признака) сравнения. Если оценка объектов произведена методом ранжирования, то величины x_{ij}^h представляют собой ранги. Если оценка объектов выполнена методом непосредственной оценки или методом последовательного сравнения, то величины x_{ij}^h представляют собой числа из некоторого отрезка числовой оси, или баллы. Обработка результатов экспертного оценивания существенно зависит от рассмотренных методов измерения.

Рассмотрим случай, когда величины $x_{ij}^h (i = 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, l)$ получены методами непосредственной оценки или последовательного сравнения, т.е. x_{ij}^h являются числами, или баллами. Для получения групповой оценки объектов в этом случае можно воспользоваться средним значением оценки для каждого объекта

$$x_i = \sum_{h=1}^l \sum_{j=1}^m q_h x_{ij}^h k_j (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1.19)$$

где q_h – коэффициенты весов показателей сравнения объектов;

k_j – коэффициенты компетентности экспертов.

Коэффициенты весов показателей и компетентности экспертов являются нормированными величинами:

$$\sum_{h=1}^l q_h = 1; \sum_{j=1}^m k_j = 1. \quad (1.20)$$

Коэффициенты весов показателей могут быть определены экспертным путем. Если q_{hj} – коэффициент веса h -го показателя, даваемый j -м экспертом, то средний коэффициент веса h -го показателя по всем экспертам равен

$$q_h = \sum_{j=1}^m q_{hj} k_j (h = 1, 2, \dots, l). \quad (1.21)$$

Получение групповой экспертной оценки путем суммирования индивидуальных оценок с весами компетентности и важности показателей при измерении свойств объектов в кардинальных шкалах основывается на предположении о выполнении аксиом теории полезности фон Неймана-Моргенштерна как для индивидуальных, так и для групповых оценок и условий неразличимости объектов в групповом отношении, если они неразличимы во всех индивидуальных оценках (частичный принцип Парето). В реальных задачах эти условия, как

правило, выполняются, поэтому получение групповой оценки объектов путем суммирования с весами индивидуальных оценок экспертов широко применяется на практике.

Коэффициенты компетентности экспертов можно вычислить по апостериорным данным, т.е. по результатам оценки объектов. Основной идеей этого вычисления является предположение о том, что компетентность экспертов должна оцениваться по степени согласованности их оценок с групповой оценкой объектов.

Алгоритм вычисления коэффициентов компетентности экспертов имеет вид рекуррентной процедуры:

$$x_i^t = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{t-1} (i = 1, 2, \dots, n); \quad (1.22)$$

$$\lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^t (t = 1, 2, \dots); \quad (1.23)$$

$$k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t; \sum_{j=1}^m k_j^t = 1 (j = 1, 2, \dots, m). \quad (1.24)$$

Вычисления начинаются с $t=1$. В формуле (1.22) начальные значения коэффициентов компетентности принимаются одинаковыми и равными $k_j^0 = 1/m$. Тогда по формуле (1.22) групповые оценки объектов первого приближения равны средним арифметическим значениям оценок экспертов

$$x_i^1 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n). \quad (1.25)$$

Далее вычисляется величина λ^1 по формуле (1.25):

$$\lambda^1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^1 \quad (1.26)$$

и значение коэффициентов компетентности первого приближения по формуле (1.24):

$$k_j^1 = \frac{1}{\lambda^1} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^1. \quad (1.27)$$

Используя коэффициенты компетентности первого приближения, можно повторить весь процесс вычисления по формулам (1.22), (1.23), (1.24) и получить вторые приближения величин x_i^2, λ^2, k_j^2 .

Повторение рекуррентной процедуры вычислений оценок объектов и коэффициентов компетентности естественно ставит вопрос о ее сходимости. Для

рассмотрения этого вопроса исключим из уравнений (1.22), (1.24) переменные k_j^{t-1} и x_i^t и представим эти уравнения в векторной форме

$$x^t = \frac{1}{\lambda^{t-1}} Bx^{t-1}; k^t = \frac{1}{\lambda^t} Ck^{t-1} (t = 1, 2, \dots), \quad (1.28)$$

где матрицы B размерности $n \times n$ и C размерности $m \times m$ равны

$$B = XX', C = X'X, X = \|x_{ij}\|. \quad (1.29)$$

Величина λ^t в уравнениях (1.28) определяется по формуле (1.23).

Если матрицы B и C неотрицательны и неразложимы, то, как это следует из теоремы Перрона – Фробениуса, при $t \rightarrow \infty$ векторы x^t и k^t сходятся к собственным векторам матриц B и C , соответствующим максимальным собственным числам этих матриц:

$$x = \lim_{t \rightarrow \infty} x^t, k = \lim_{t \rightarrow \infty} k^t. \quad (1.30)$$

Предельные значения векторов x и k можно вычислить из уравнений:

$$\begin{aligned} Bx = \lambda_B x, \sum_{i=1}^n x_i = 1, |B - \lambda_B E| = 0, \\ Ck = \lambda_C k, \sum_{j=1}^m k_j = 1, |C - \lambda_C E| = 0, \end{aligned} \quad (1.31)$$

где λ_B, λ_C - максимальные собственные числа матриц B и C .

Условие неотрицательности матриц B и C легко выполняется выбором неотрицательных элементов x_{ij} матрицы X оценок объектов экспертами.

Условие неразложимости матриц B и C практически выполняется, поскольку если эти матрицы разложимы, то это означает, что эксперты и объекты распадаются на независимые группы. При этом каждая группа экспертов оценивает только объекты своей группы. Естественно, что получать групповую оценку в этом случае нет смысла. Таким образом, условия неотрицательности и неразложимости матриц B и C , а следовательно, и условия сходимости процедур (1.22), (1.23), (1.24) в практических условиях выполняются.

Следует заметить, что практическое вычисление векторов групповой оценки объектов и коэффициентов компетентности проще выполнять по рекуррентным формулам (1.22), (1.23), (1.24). Определение предельных значений этих векторов по уравнению (1.31) требует применения вычислительной техники.

Рассмотрим теперь случай, когда эксперты производят оценку множества объектов методом ранжирования так, что величины x_{ij} есть ранги. Обработка результатов ранжирования заключается в построении обобщенной ранжировки. Для построения такой ранжировки введем конечномерное дискретное пространство ранжировок и метрику в этом пространстве. Каждая ранжировка множества объектов j -м экспертом есть точка R_j в пространстве ранжировок.

Ранжировку R_j можно представить в виде матрицы парных сравнений, элементы которой определим следующим образом:

$$a_{kl} = \begin{cases} 1, \text{если } O_k \succ O_l, \\ -1, \text{если } O_l \prec O_k, \\ 0, \text{если } O_k \asymp O_l. \end{cases}$$

Очевидно, что $a_{kk} = 0$, поскольку каждый объект эквивалентен самому себе. Элементы матрицы $\|a_{kl}\|$ антисимметричны $a_{kl} = -a_{lk}$. Если все ранжируемые объекты эквивалентны, то все элементы матрицы парных сравнений равны нулю. Такую матрицу будем обозначать R_0 и считать, что точка в пространстве ранжировок, соответствующая матрице R_0 , является началом отсчета.

Обращение порядка ранжируемых объектов приводит к транспонированию матрицы парных сравнений.

Метрика $d(R_i, R_j)$ как расстояние между i -й и j -й ранжировками определяется единственным образом формулой

$$d(R_i, R_j) = \frac{1}{2} \sum_{k,l=1}^n |a_{kl}^i - a_{kl}^j|,$$

если выполнены следующие пять аксиом:

1. $d(R_i, R_j) \geq 0$, причем равенство достигается, если ранжировки R_i и R_j тождественны;

2. $d(R_i, R_j) = d(R_j, R_i)$;

3. $d(R_i, R_h) + d(R_h, R_j) \geq d(R_i, R_j)$,

причем равенство достигается, если ранжировка «лежит между» ранжировками R_i и R_j . Понятие «лежит между» означает, что суждение о некоторой паре $O_k O_l$ объектов в ранжировке совпадает с суждением об этой паре либо в R_i , либо в R_j или же в R_i $O_k \succ O_l$, в R_j $O_l \succ O_k$, а в R_h $O_k \asymp O_l$;

4. $d(R_i', R_j') = d(R_i, R_j)$, где R_i' получается из R_i некоторой перестановкой объектов, а R_j' из R_j той же самой перестановкой. Эта аксиома утверждает независимость расстояния от перенумерации объектов.

5. Если две ранжировки R_i, R_j одинаковы всюду, за исключением n -элементного множества элементов, являющегося одновременно сегментом обеих ранжировок, то $d(R_i, R_j)$ можно вычислить, как если бы рассматривалась ранжировка только этих n объектов. Сегментом ранжировки называется множество, дополнение которого непусто и все элементы этого дополнения находятся либо впереди, либо позади каждого элемента сегмента. Смысл этой аксиомы состоит в том, что если две ранжировки полностью согласуются в начале и конце сегмента, а отличие состоит в упорядочении средних n объектов, то естественно принять, что расстояние между ранжировками должно равняться расстоянию, соответствующему ранжировкам средних n объектов.

Пространство ранжировок при двух объектах можно изобразить в виде трех точек, лежащих на одной прямой. Расстояния между точками равны $d(R_1, O) = d(R_2, O) = 1, d(R_1, R_2) = 2$. При трех объектах пространство всех возможных ранжировок состоит из 13 точек.

Используя введенную метрику, определим обобщенную ранжировку как такую точку, которая наилучшим образом согласуется с точками, представляющими собой ранжировки экспертов. Понятие наилучшего согласования на практике чаще всего определяют как медиану и среднюю ранжировку.

Медиана есть такая точка в пространстве ранжировок, сумма расстояний от которой до всех точек (ранжировок экспертов) является минимальной. В соответствии с определением медиана вычисляется из условия

$$R_M \Leftarrow \min_R \sum_{j=1}^m d(R_j, R).$$

Средняя ранжировка есть такая точка, сумма квадратов расстояний от которой до всех точек (ранжировок экспертов) является минимальной. Средняя ранжировка определяется из условия

$$R_C \Leftarrow \min_R \sum_{j=1}^m d^2(R_j, R).$$

Пространство ранжировок конечно и дискретно, поэтому медиана и средняя ранжировка могут быть только какими-либо точками этого пространства. В общем случае медиана и средняя ранжировка могут не совпадать ни с одной из ранжировок экспертов.

Если учитывается компетентность экспертов, то медиана и средняя ранжировка определяются из условий:

$$R_M \Leftarrow \min_R \sum_{j=1}^m k_j d(R_j, R); \quad R_C \Leftarrow \min_R \sum_{j=1}^m k_j d^2(R_j, R),$$

где k_j - коэффициенты компетентности экспертов.

Если ранжировка объектов производится по нескольким показателям, то определение медианы вначале производится для каждого эксперта по всем показателям, а затем вычисляется медиана по множеству экспертов:

$$R_{M_j} \Leftarrow \min_R \sum_{h=1}^l q_h d(R_j^h, R) \quad (j=1, 2, \dots, m);$$

$$R_M \Leftarrow \min_R \sum_{j=1}^m k_j d(R_{M_j}, R),$$

где q_h - коэффициенты весов показателей.

Основным недостатком определения обобщенной ранжировки в виде медианы или средней ранжировки является трудоемкость расчетов. Естественный способ отыскания R_M или R_C в виде перебора всех точек пространства ранжировок неприемлем вследствие очень быстрого роста равномерности пространства при увеличении количества объектов и, следовательно, роста трудоемкости вычислений. Можно свести задачу отыскания R_M или R_C к специфической задаче целочисленного программирования. Однако это не сильно уменьшает вычислительные трудности.

Расхождение обобщенных ранжировок при различных критериях возникает при малом числе экспертов и несогласованности их оценок. Если мнения экспертов близки, то обобщенные ранжировки, построенные по критериям медианы и среднего значения, будут совпадать.

Сложность вычисления медианы или средней ранжировки привела к необходимости применения более простых способов построения обобщенной ранжировки. К числу таких способов относится способ сумм рангов.

Этот способ заключается в ранжировании объектов по величинам сумм рангов, полученных каждым объектом от всех экспертов. Для матрицы ранжировок $\|r_{ij}\|$ составляются суммы

$$r_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

Далее объекты упорядочиваются по цепочке неравенств $r_1 < r_2 < \dots < r_n$.

Для учета компетентности экспертов достаточно умножить каждую i -ю ранжировку на коэффициент компетентности j -го эксперта $0 \leq k_j \leq 1$. В этом случае вычисление суммы рангов для i -го объекта производится по следующей формуле:

$$r_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} k_j \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

Обобщенная ранжировка с учетом компетентности экспертов строится на основе упорядочения сумм рангов для всех объектов.

Следует отметить, что построение обобщенной ранжировки по суммам рангов является корректной процедурой, если ранги назначаются как места объектов в виде натуральных чисел $1, 2, \dots, n$. Если назначать ранги произвольным образом, как числа в шкале порядка, то сумма рангов, вообще говоря, не сохраняет условие монотонности преобразования и, следовательно, можно получать различные обобщенные ранжировки при различных отображениях объектов на числовую систему. Нумерация мест объектов может быть произведена единственным образом с помощью натуральных чисел. Поэтому при хорошей согласованности экспертов построение обобщенной ранжировки по методу сумм рангов дает результаты, согласующиеся с результатами вычисления медианы.

Еще одним более обоснованным в теоретическом отношении подходом к построению обобщенной ранжировки является переход от матрицы ранжировок к матрице парных сравнений и вычисление собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу этой матрицы. Упорядочение объектов производится по величине компонент собственного вектора.

1.4.3. Оценка согласованности мнений экспертов

При ранжировании объектов эксперты обычно расходятся во мнениях по решаемой проблеме. В связи с этим возникает необходимость количественной оценки степени согласия экспертов. Получение количественной меры согласованности мнений экспертов позволяет более обоснованно интерпретировать причины расхождения мнений.

В настоящее время известны две меры согласованности мнений группы экспертов: дисперсионный и энтропийный коэффициенты конкордации.

Дисперсионный коэффициент конкордации. Рассмотрим матрицу результатов ранжировки n объектов группой из m экспертов $\|r_{ij}\|$ ($j=1, \dots, m; i=1, \dots, n$), где r_{ij} - ранг, присваиваемый j -м экспертом i -му объекту. Составим суммы рангов по каждому столбцу. В результате получим вектор с компонентами:

$$r_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (1.32)$$

Величины r_i рассмотрим как реализации случайной величины и найдем оценку дисперсии. Как известно, оптимальная по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценка дисперсии определяется формулой

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2, \quad (1.33)$$

где \bar{r} - оценка математического ожидания, равная

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i. \quad (1.34)$$

Дисперсионный коэффициент конкордации определяется как отношение оценки дисперсии (1.35) к максимальному значению этой оценки

$$W = \frac{D}{D_{\max}}. \quad (1.35)$$

Коэффициент конкордации изменяется от нуля до единицы, поскольку $0 \leq D \leq D_{\max}$.

Вычислим максимальное значение оценки дисперсии для случая отсутствия связанных рангов (все объекты различны). Предварительно покажем, что оценка математического ожидания зависит только от числа объектов и количества экспертов. Подставляя в (1.34) значение r_i из (1.32), получаем

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}. \quad (1.36)$$

Рассмотрим вначале суммирование по i при фиксированном j . Это есть сумма рангов для j -го эксперта. Поскольку эксперт использует для ранжировки натуральные числа от 1 до n , то, как известно, сумма натуральных чисел от 1 до n равна

$$\sum_{i=1}^n r_{ij} = \frac{n(n+1)}{2}. \quad (1.37)$$

Подставляя (1.37) в (1.36), получаем

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \cdot \frac{n(n+1)}{2} \sum_{j=1}^m = \frac{(n+1)m}{2}. \quad (1.38)$$

Таким образом, среднее значение зависит только от числа экспертов m и числа объектов n .

Для вычисления максимального значения оценки дисперсии подставим в (1.33) значение r_i из (1.32) и возведем в квадрат двучлен в круглой скобке. В результате получаем

$$D = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} \right)^2 - 2\bar{r} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} + n\bar{r}^2 \right]. \quad (1.39)$$

Учитывая, что из (1.36) следует

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} = n\bar{r},$$

получаем

$$D = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} \right)^2 - n\bar{r}^2 \right]. \quad (1.40)$$

Максимальное значение дисперсии достигается при наибольшем значении первого члена в квадратных скобках. Величина этого члена существенно зависит от расположения рангов - натуральных чисел в каждой строке i . Пусть, например, все m экспертов дали одинаковую ранжировку для всех n объектов. Тогда в каждой строке матрицы $\|r_{ij}\|$ будут расположены одинаковые числа. Следовательно, суммирование рангов в каждой i -й строке дает m -кратное повторение i -го числа:

$$\sum_{j=1}^m r_{ij} = im.$$

Возводя в квадрат и суммируя по i , получаем значение первого члена в (1.40):

$$\sum_{i=1}^n i^2 m^2 = m^2 \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{m^2 (n+1)(n+2)n}{6}. \quad (1.41)$$

Теперь предположим, что эксперты дают несовпадающие ранжировки, например, для случая $n=m$ все эксперты присваивают разные ранги одному объекту. Тогда

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{m(m+1)}{2} \right)^2 = \frac{m^2 (m+1)^2 n}{4}.$$

Сравнивая это выражение с m^2 при $m=n$, убеждаемся, что первый член в квадратных скобках формулы (1.37) равен второму члену и, следовательно, оценка дисперсии равна нулю. Таким образом, случай полного совпадения ранжировок экспертов соответствует максимальному значению оценки дисперсии. Подставляя (1.41) в (1.40) и выполняя преобразования, получаем

$$D_{\max} = \frac{m^2(n^3 - n)}{12(n-1)}. \quad (1.42)$$

Введем обозначение

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2. \quad (1.43)$$

Используя (1.43), запишем оценку дисперсии (1.33) в виде

$$D = \frac{1}{n-1} S. \quad (1.44)$$

Подставляя (1.42), (1.43), (1.44) в (1.35) и сокращая на множитель $(n-1)$, запишем окончательное выражение для коэффициента конкордации

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}. \quad (1.45)$$

Данная формула определяет коэффициент конкордации для случая отсутствия связанных рангов.

Если в ранжировках имеются связанные ранги, то максимальное значение дисперсии в знаменателе формулы (1.35) становится меньше, чем при отсутствии связанных рангов. Можно показать, что при наличии связанных рангов коэффициент конкордации вычисляется по формуле

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (1.46)$$

где

$$T_j = \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k) \quad (1.47)$$

В формуле (1.45) T_j - показатель связанных рангов в j -й ранжировке, H_j - число групп равных рангов в j -й ранжировке, h_k - число равных рангов в k -й группе связанных рангов при ранжировке j -м экспертом. Если совпадающих

рангов нет, то $H_j=0$, $h_k=0$ и, следовательно, $T_j=0$. В этом случае формула (1.47) совпадает с формулой (1.45).

Коэффициент конкордации равен 1, если все ранжировки экспертов одинаковы. Коэффициент конкордации равен нулю, если все ранжировки различны, т.е. совершенно нет совпадения.

Коэффициент конкордации, вычисляемый по формуле (1.45) или (1.46), является оценкой истинного значения коэффициента и, следовательно, представляет собой случайную величину, имеющую определенный закон распределения.

Энтропийный коэффициент конкордации (коэффициент согласия) определяется формулой

$$W = 1 - \frac{H}{H_{\max}}, \quad (1.48)$$

где H – энтропия, вычисляемая по формуле

$$H = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log p_{ij}, \quad (1.49)$$

где H_{\max} - максимальное значение энтропии. В формуле для энтропии p_{ij} - оценки вероятностей j -го ранга, присваиваемого i -му объекту. Эти оценки вероятностей вычисляются в виде отношения количества экспертов m_{ij} , приписавших объекту O_i ранг j , к общему числу экспертов.

$$p_{ij} = \frac{m_{ij}}{m}. \quad (1.50)$$

Максимальное значение энтропии достигается при равновероятном распределении рангов, т. е. когда $m_{ij} = m/n$. Тогда

$$p_{ij} = \frac{m}{mn} = \frac{1}{n}. \quad (1.51)$$

Подставляя это соотношение в формулу (1.49), получаем

$$H_{\max} = - \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n = n \log n. \quad (1.52)$$

Коэффициент согласия изменяется от нуля до единицы. При $W_s = 0$ расположение объектов по рангам равновероятно, поскольку в этом случае $H = H_{\max}$. Данный случай может быть обусловлен либо невозможностью ранжи-

ровки объектов по сформулированной совокупности показателей, либо полной несогласованностью мнений экспертов. При $W_9 = 1$, что достигается при нулевой энтропии ($H=0$), все эксперты дают одинаковую ранжировку. Действительно, в этом случае каждому фиксированному объекту O_i все эксперты присваивают один и тот же ранг j , следовательно, $p_{ij} = 1$, а $p_{kj} = 0$ ($k \neq j, k = 1, 2, \dots, n$). Поэтому и $H=0$.

Сравнительная оценка дисперсионного и энтропийного коэффициентов конкордации показывает, что эти коэффициенты дают примерно одинаковую оценку согласованности экспертов при близких ранжировках. Однако если, например, вся группа экспертов разделилась в мнениях на две подгруппы, причем ранжировки в этих подгруппах противоположные (прямая и обратная), то дисперсионный коэффициент конкордации будет равен нулю, а энтропийный коэффициент конкордации будет равен 0,7. Таким образом, энтропийный коэффициент конкордации позволяет зафиксировать факт деления мнений на две противоположные группы. Объем вычислений для энтропийного коэффициента конкордации несколько больше, чем для дисперсионного коэффициента конкордации.

Обработка парных сравнений объектов. При решении задачи оценки большого числа объектов (ранжирование, определение относительных весов, балльная оценка) возникают трудности психологического характера, обусловленные восприятием экспертами множества свойств объектов. Эксперты сравнительно легко решают задачу парного сравнения объектов. Возникает вопрос, каким образом получить оценку всей совокупности объектов на основе результатов парного сравнения, не накладывая условия транзитивности? Рассмотрим алгоритм решения этой задачи. Пусть m экспертов производят оценку всех пар объектов, давая числовую оценку

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } O_i \succ O_j, \\ 0,5, \text{ если } O_i \sim O_j, \\ 0, \text{ если } O_i \prec O_j. \end{cases} \quad (1.53)$$

Если при оценке пары O_i, O_j m_i экспертов высказались в пользу предпочтения $O_i \succ O_j$, m_j экспертов высказались наоборот ($O_j \succ O_i$) и m_h экспертов считают эти объекты равноценными, то оценка математического ожидания случайной величины r_{ij} равна

$$x_{ij} = M[r_{ij}] = \frac{m_i}{m} + 0,5 \frac{m_h}{m} + 0 \frac{m_j}{m}. \quad (1.54)$$

Общее количество экспертов равно сумме

$$m = m_i + m_h + m_j. \quad (1.55)$$

Определяя отсюда m_h и подставляя его в (1.54), получаем

$$x_{ij} = \frac{1}{2} + \frac{m_i - m_j}{2m} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (1.56)$$

Очевидно, что $x_{ij} + x_{ji} = 1$. Совокупность величин x_{ij} образует матрицу $n \times n$, на основе которой можно построить ранжировку всех объектов и определить коэффициенты относительной важности объектов.

Введем вектор коэффициентов относительной важности объектов порядка t следующей формулой:

$$k^t = \frac{1}{\lambda^t} X k^{t-1} \quad (t = 1, 2, \dots), \quad (1.57)$$

где $X = \|x_{ij}\|$ - матрица $n \times n$ математических ожиданий оценок пар объектов, $k^t = (k_1^t, k_2^t, \dots, k_n^t)$ - вектор коэффициентов относительной важности объектов порядка t . Величина λ^t равна

$$\lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} k_j^{t-1}. \quad (1.58)$$

Коэффициенты относительной важности первого порядка есть относительные суммы элементов строк матрицы X . Действительно, полагая $t=1$, из (1.57) получаем

$$k_i^1 = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}}; \quad \sum_{i=1}^n k_i^1 = 1. \quad (1.59)$$

Коэффициенты относительной важности второго порядка ($t=2$) есть относительные суммы элементов строк матрицы X^2 .

$$k_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{jk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ij} x_{jk}}; \quad \sum_{i=1}^n k_i^2 = 1. \quad (1.60)$$

Если матрица X неотрицательна и неразложима, то при увеличении порядка $t \rightarrow \infty$ величина λ^t сходится к максимальному собственному числу матрицы X

$$\lambda_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda^t, \quad (1.61)$$

а вектор коэффициентов относительной важности объектов стремится к собственному вектору матрицы X , соответствующему максимальному собственному числу λ_0 :

$$k = \lim_{t \rightarrow \infty} k^t; \sum_{i=1}^n k_i = 1. \quad (1.62)$$

Определение собственных чисел и собственных векторов матрицы производится решением алгебраического уравнения и системы линейных уравнений

$$|X - \lambda E| = 0, \quad (1.63)$$

$$Xk = \lambda_0 k; \sum_{i=1}^n k_i = 1, \quad (1.64)$$

где E - единичная матрица; k – собственный вектор матрицы X , соответствующий максимальному собственному числу λ_0 . Компоненты собственного вектора есть коэффициенты относительной важности объектов, измеренные в шкале отношений.

С практической точки зрения вычисление коэффициентов относительной важности объектов проще производить последовательной процедурой по формуле (1.57) при $t = 1 \dots n$. Как показывает опыт, 3-4 последовательных вычислений достаточно, чтобы получить значения λ_0 и k , близкие к предельным значениям, определяемым уравнениями (1.63), (1.64).

Матрица $X = \|x_{ij}\|$ неотрицательная, поскольку все ее элементы (1.56) неотрицательны. Матрица называется неразложимой, если перестановкой рядов (строк и одноименных столбцов) ее нельзя привести к треугольному виду:

$$X = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & \dots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{l1} & A_{l2} & \dots & A_{ll} \end{pmatrix}, \quad (1.65)$$

где A_{ij} - неразложимые подматрицы матрицы X . Представление матрицы X в виде (1.65) означает разбиение объектов на l доминирующих множеств:

$$A_{ll} \succ A_{l-l-1} \succ \dots \succ A_{11}. \quad (1.66)$$

При $l=n$ матрица X неразложима, т. е. существует только одно доминирующее множество, совпадающее с исходным множеством объектов. Разложимость матрицы X означает, что среди экспертов имеются большие разногласия в оценке объектов.

Если матрица X неразложима, то вычисление коэффициентов относительной важности k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) позволяет определить, во сколько раз один объ-

ект превосходит другой объект по сравниваемым показателям. Вычисление коэффициентов относительной важности объектов позволяет одновременно построить ранжировку объектов. Объекты ранжируются так, что первым объектом считается объект, у которого коэффициент относительной важности наибольший. Полная ранжировка определяется цепочкой неравенств

$$k_1 > k_2 > k_3 > \dots > k_n,$$

из которой следует

$$O_1 \succ O_2 \succ O_3 \succ \dots \succ O_n.$$

Если матрица X является разложимой, то определить коэффициенты относительной важности можно только для каждого множества A_{ii} . Для каждой матрицы A_{ii} определяется максимальное собственное число и соответствующий этому числу собственный вектор. Компоненты собственного вектора и есть коэффициенты относительной важности объектов, входящих в множество A_{ii} . По этим коэффициентам осуществляется ранжировка объектов данного множества. Общая ранжировка объектов дается соотношением

$$\underbrace{O_{i1} \succ \dots \succ O_{in_i}}_{A_{ii}} \succ \dots \succ \underbrace{O_{i1} \succ \dots \succ O_{in_i}}_{A_{ii}} \succ \dots \succ \underbrace{O_{11} \succ \dots \succ O_{1n_1}}_{A_{11}}.$$

Таким образом, если матрица X неразложима, то по результатам парного сравнения объектов возможно измерение предпочтительности объектов как в шкале отношений, так и в шкале порядка (ранжирование). Если же матрица X разложима, то возможно только ранжирование объектов.

Следует отметить, что отношение предпочтения $O_i \succ O_j$ может быть выражено любым положительным числом C . При этом должно выполняться условие $x_{ij} + x_{ji} = C$. В частности, можно выбрать $C=2$ так, что если $O_i \succ O_j$, то $x_{ij} = 2$, если $O_i \sim O_j$, то $x_{ij} = 1$, и если $O_i \prec O_j$, то $x_{ij} = 0$.

Определение взаимосвязи ранжировок. При обработке результатов ранжирования могут возникнуть задачи определения зависимости между ранжировками двух экспертов, связи между достижением двух различных целей при решении одной и той же совокупности проблем или взаимосвязи между двумя признаками.

В этих случаях мерой взаимосвязи может служить коэффициент ранговой корреляции. Характеристикой взаимосвязи множества ранжировок или целей будет являться матрица коэффициентов ранговой корреляции. Известны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена определяется формулой

$$\rho = \frac{K_{12}}{\sqrt{D_1 D_2}}, \quad (1.67)$$

где K_{12} - взаимный корреляционный момент первой и второй ранжировок, D_1 , D_2 - дисперсии этих ранжировок. По данным двум ранжировкам оценки взаимного корреляционного момента и дисперсии вычисляются по формулам

$$K_{12} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{1j} - \bar{r}_1)(r_{2j} - r_2), \quad (1.68)$$

$$D_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{1j} - \bar{r}_1)^2; D_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{2j} - \bar{r}_2)^2, \quad (1.69)$$

где n - число ранжируемых объектов, r_{1j} , r_{2j} - ранги в первой и второй ранжировках соответственно, \bar{r}_1 , \bar{r}_2 - средние ранги в первой и второй ранжировках. Оценки средних рангов определяются формулами

$$\bar{r}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (r_{1j} - \bar{r}_1)^2; \bar{r}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{2j}. \quad (1.70)$$

Вычислим оценки средних рангов и дисперсий в предположении, что в ранжировках отсутствуют связанные ранги, т. е. обе ранжировки дают строгое упорядочение объектов. В этом случае средние ранги (1.70) представляют собой суммы натуральных чисел от единицы до n , поделенные на n . Следовательно, средние ранги для обеих ранжировок одинаковы и равны

$$\bar{r} = \bar{r}_1 = \bar{r}_2 = \frac{n(n+1)}{n \cdot 2} = \frac{n+1}{2}. \quad (1.71)$$

При вычислении оценок дисперсий заметим, что если раскрыть круглые скобки в формулах (1.69), то под знаком сумм будут находиться натуральные числа и их квадраты. Две ранжировки могут отличаться друг от друга только перестановкой рангов, но сумма натуральных чисел и их квадратов не зависит от порядка (перестановки) слагаемых. Следовательно, дисперсии (1.69) для двух любых ранжировок (при отсутствии связанных рангов) будут одинаковы и равны

$$\begin{aligned} D = D_1 = D_2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_i)^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{j=1}^n r_{ij}^2 - 2r_i \sum_{j=1}^n r_{ij} + n\bar{r}_i^2 \right) = \\ &= \frac{1}{n-1} \left[\frac{(n+1)(2n+1)n}{6} - 2\bar{r}_i^2 n + \bar{r}_i^2 n \right] = \frac{n(n+1)}{12} \quad (i=1,2). \end{aligned} \quad (1.72)$$

Подставляя значение K_{12} из (1.68) и D_1, D_2 из (1.72) в формулу (1.67), получим оценку коэффициента ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho = \frac{12}{n^3 - n} \sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - \bar{r} \right) \left(r_{2j} - \bar{r} \right). \quad (1.73)$$

Для проведения практических расчетов удобнее пользоваться другой формулой для коэффициента корреляции Спирмена. Ее можно получить из (1.73), если воспользоваться тождеством

$$2 \sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - \bar{r} \right) \left(r_{2j} - \bar{r} \right) \equiv \sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - \bar{r} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(r_{2j} - \bar{r} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - r_{2j} \right)^2. \quad (1.74)$$

В равенстве (1.74) первые две суммы в правой части, как это следует из выражения (1.72), одинаковы и равны

$$\sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - \bar{r} \right)^2 + \sum_{j=1}^n \left(r_{2j} - \bar{r} \right)^2 = \frac{n(n+1)(n-1)}{12} = \frac{n^3 - n}{12}. \quad (1.75)$$

Подставляя в формулу (1.73) значение суммы из (1.74) и используя равенство (1.75), получаем следующую удобную для расчетов формулу коэффициента ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{j=1}^n \left(r_{1j} - r_{2j} \right)^2. \quad (1.76)$$

Коэффициент корреляции Спирмена изменяется от -1 до $+1$. Равенство единице достигается, как это следует из формулы (1.76), при одинаковых ранжировках, т. е. когда $r_{1j} = r_{2j}$. Значение $\rho = -1$ имеет место при противоположных ранжировках (прямая и обратная ранжировки). При равенстве коэффициента корреляции нулю ранжировки считаются линейно независимыми.

Оценка коэффициента корреляции, вычисляемая по формуле (1.76), является случайной величиной. Для определения значимости этой оценки необходимо задаться величиной вероятности β , принять решение о значимости коэффициента корреляции и определить значение порога ε по приближенной формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \Psi \left(\frac{1-\beta}{2} \right), \quad (1.77)$$

где n – количество объектов, $\Psi(x)$ – функция, обратная функции

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

для которой имеются таблицы. После вычисления порогового значения оценка коэффициента корреляции считается значимой, если $|\rho| < \varepsilon$.

Для определения значимости оценки коэффициента Спирмена можно воспользоваться критерием Стьюдента, поскольку величина

$$t = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}} \quad (1.78)$$

приблизительно распределена по закону Стьюдента с $n-2$ степенями свободы.

Если в ранжировках имеются связанные ранги, то коэффициент Спирмена вычисляется по следующей формуле:

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho + T_1 + T_2}{\sqrt{(1-T_1)(1-T_2)}}, \quad (1.79)$$

где ρ - оценка коэффициента ранговой корреляции Спирмена, вычисляемая по формуле (1.76), а величины T_1 , T_2 равны

$$T_1 = \frac{3}{n^3 - n} \sum_{k_1} k_1(k_1 - 1); T_2 = \frac{3}{n^3 - n} \sum_{k_2} k_2(k_2 - 1). \quad (1.80)$$

В этих формулах k_1 и k_2 - количество различных связанных рангов в первой и второй ранжировках соответственно.

Коэффициент ранговой корреляции Кендалла при отсутствии связанных рангов определяется формулой

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n \text{sign}[(r_{1i} - r_{1j})(r_{2i} - r_{2j})],$$

где n - количество объектов, r_{ij} - ранги объектов, $\text{sign } x$ - функция, равная

$$\text{sign } x = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0, \\ -1 & \text{при } x < 0, \\ 0 & \text{при } x = 0. \end{cases}$$

Сравнительная оценка коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и Кендалла показывает, что вычисление коэффициентов Спирмена производится по более простой формуле. Кроме того, коэффициент Спирмена дает более точный результат, поскольку он является оптимальной по критерию минимума средней квадрата ошибки оценкой коэффициента корреляции. Отсюда следует, что при практических расчетах корреляционной зависимости ранжировок предпочтительнее использовать коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Использование метода экспертных оценок помогает формализовать процедуры сбора, обобщения и анализа мнений специалистов с целью преобразования их в форму, наиболее удобную для принятия обоснованного решения. Но следует заметить, что метод экспертных оценок не может заменить ни административных, ни технических решений, он лишь позволяет пополнить информацию, необходимую для подготовки и принятия таких решений. Широкое использование экспертных оценок правомерно только там, где для анализа состояния невозможно применить более точные методы.

Экспертные методы непрерывно развиваются и совершенствуются. Основные направления этого развития определяются рядом факторов, в числе которых можно указать стремление расширить области применения, повысить степень использования математических методов и электронно-вычислительной техники, а также изыскать пути устранения выявляющихся недостатков. Однако уже и сегодня экспертные оценки в сочетании с другими математико-статистическими методами и компьютерными технологиями являются важным инструментом совершенствования процедур проведения экспертиз и решения задач диагностики на всех уровнях.

1.5. Классификация повреждений и дефектов несущих конструкций и их элементов. Задачи диагностики

Часто дефекты могут служить причиной появления повреждений. Повреждения подразделяются на незначительные (конструкции сохраняют работоспособность) и значительные (отказ конструкций). Незначительные повреждения могут со временем перерасти в значительные. Дефекты и повреждения можно классифицировать:

- по причинам появления;
- по условиям возникновения;
- по внешним признакам;
- по характерным местам проявления;
- по степени влияния на эксплуатационные характеристики;
- по стадиям заложения;
- по времени появления;
- по видам конструкций.

Дефекты и повреждения по причинам появления можно подразделить:

- на связанные с неблагоприятными грунтовыми условиями; неправильным ведением строительства с рядом стоящим зданием и т.д.;
- на конструкторско-технологические, связанные с перегрузками, механическими повреждениями, износами;
- на связанные с природными бедствиями (землетрясениями, наводнениями, ураганными ветрами);
- на техногенные, появляющиеся вследствие пожаров, взрывов, неудовлетворительной эксплуатации.

По условиям возникновения дефекты и повреждения подразделяются:

- на структурные дефекты, возникающие при твердении бетонов, структурировании полимера в клеевом соединении, при сварке и т.п.;
- на силовые дефекты (от механических нагрузок);
- на температурно-влажностные возникающие под воздействием повышенных или отрицательных температур, при периодическом замачивании и высыхании материала конструкции;
- на коррозионные, возникающие при воздействии эксплуатационной среды, агрессивной к материалу конструкций;
- на биологические, например, разрушение материала конструкции бактериями, грибами, водорослями или продуктами их жизнедеятельности;
- на энтомологические, например, разрушение конструкции насекомыми, для которых материал конструкции является источником питания или средой обитания.

По внешним признакам дефекты и повреждения подразделяются:

- на разрывы, выражающиеся в разделении элемента конструкции на части от механических нагрузок;
- на трещины (поверхностные и глубинные), которые характеризуются количеством, длиной, шириной раскрытия, глубиной проникновения, ориентацией относительно действующих напряжений от механических нагрузок, температурно-влажностных воздействий; на трещины, образующиеся при формировании структуры материала (например, бетона или полимерной композиции);
- на выгибы (прогибы), проявляющиеся в искривлении нейтральной оси элемента в результате ползучести, виброползучести от механических нагрузок;
- на погибы - местное искривление элементов сечения (например, полки уголков);
- на мацерацию (поверхностное разрушение) сечений элементов конструкций в результате коррозионных или биологических воздействий.

Характерными местами появления дефектов и повреждений являются:

- сечения конструкций в пролете или между точками закрепления (разрывы, трещины, погибы, возникающие в зоне действия максимальных усилий);

- опорные зоны конструкций (смятие опорной зоны, трещины, разрывы, возникающие в зоне действия максимальной поперечной силы);
- узловые соединения (недопустимые сдвиги, разрушение связей, смятие соединяемых элементов, разрушение связи или соединяемых элементов, возникающее от комбинации нормальных и касательных напряжений).

Дефекты и повреждения по степени влияния на эксплуатационные характеристики конструкций можно разделить на следующие:

- влияющие на прочностные и деформационные характеристики конструкций, например, снижение несущей способности или увеличения прогибов;
- влияющие на теплофизические свойства, например, снижение сопротивления теплопередачи и т.п.;
- влияющие на внешний вид, например, снижение эстетических качеств.

Из статистического анализа причин аварий (табл. 1.12) зданий следует, что наибольшее число аварий происходит по причине некачественного изготовления конструкций и неправильного монтажа. Значительное количество аварий происходит из-за ошибок при проектировании. При этом основные ошибки в проектировании происходят из-за недостаточности знаний. При возведении зданий и сооружений небрежность исполнения проектных решений является основной причиной последующих аварий.

При рассмотрении статистики причин аварий (табл.1.13 и табл. 1.14) следует считаться с определенным перекосом оценок в сторону завышения причины «Неудачное проектное решение, ошибки проекта». Это связано с тем, что в отличие от других участников строительного процесса проектировщики находятся в невыгодном положении. Конкретный дефект изготовления и монтажа обрушившейся конструкции (например, дефектный сварной шов) трудно обнаружить в груде исковерканных конструкций даже опытным специалистам.

Таблица 1.12

Причины аварий зданий и сооружений различного назначения
(по усредненным данным отечественных и зарубежных авторов)

Причины аварий	Доля в общем числе; %
Недоработка норм проектирования	4 %
Неудачное проектное решение, ошибки проекта	25,1%
Низкое качество материалов	6 %
Дефекты изготовления и монтажа	48,3 %
Неправильное содержание профилактика и ремонт	15,7 %
Прочие причины и их сочетание	0,9 %

Статистические сведения по причинам аварий

Причина аварии	Доля в общем числе; %
Проектирование	23,3
В том числе:	
недостаточность знаний	8,6
недостатки нормативных документов	0,83
ошибочность конструктивного замысла	5,55
ошибки расчета	0,55
ошибки изображения	0,55
небрежность в проектировании	4,16
другое	3,06
Исполнение	36,88
В том числе:	
недостаточность знаний	5,03
дефекты качества элементов	3,35
недостаточная квалификация исполнителей	5,03
небрежность исполнения	11,32
отступления от проекта	5,87
другое	6,28
Эксплуатация	34,97
В том числе:	
недостаточность знаний	8,43
ошибки надзора	8,68
чрезмерное нагружение	1,49
случайные перегрузки	3,97
небрежное обслуживание	10,91
другое	1,49
Другие причины	4,85

В то же время проект, по которому было возведено здание, может быть детально и всесторонне проанализирован и наличие даже незначительных ошибок, фактически, может быть, и не приведших к аварии, всегда будет обнаружено квалифицированной экспертизой.

Авария всегда ошибка специалиста, вне зависимости от того, вызвана ли она недооценкой внешней нагрузки или недостаточной несущей способностью, которая образовалась в процессе создания и эксплуатации объекта. Полные обрушения конструкций, к счастью, являются относительно редкими событиями. Однако наблюдается огромное количество неработоспособных состояний отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений, когда только благо-

приятное стечение обстоятельств или другие случайные факторы не дали развиться катастрофическому разрушению.

Анализ дефектов конструкций, выполненный отечественными исследователями (табл.1.15), показал, что дефекты возникают как из-за ошибок проектирования (4 %), неудовлетворительной эксплуатации зданий (8 %), некачественного изготовления конструкций (17,6 %), низкого качества монтажа (41,6 %), так и совокупности указанных причин и факторов (17,6 %).

Таблица 1.14

Распределение аварий по типам зданий и сооружений

Тип сооружения	Число аварий	Доля в общем числе; %%
Здания	223	39,5
Автомобильные мосты	79	14,0
Железнодорожные мосты	80	14,2
Инженерные сооружения	40	7,1
Крановые конструкции	88	15,6
Прочие	22	9,6

Таблица 1.15

Характерные нарушения при изготовлении и поставке конструкций

Нарушения	Удельный вес, %	
	Стальные конструкции	Сборный железобетон
Отсутствие документов, удостоверяющих качество	-	8
Некомплектность поставки	13	9
Отсутствие закладных деталей	-	18
Отклонения в геометрии	27	36
Повреждения антикоррозионной защиты	39	14
Неполная заводская готовность	8	-
Непроектные узлы и соединения	6	-
Прочие нарушения	7	15

Многочисленные нарушения допускаются и при монтаже стальных и сборных железобетонных конструкций (табл. 1.16), они составляют 50 % случаев от общего числа зарегистрированных нарушений. При этом основное количество нарушений относится к реализации узлов сопряжения и опирания.

Характерные нарушения при монтаже конструкций

Нарушения	Конструкции %	
	Стальные	Железобетонные
Повреждения элементов	16,24	15,98
Дефекты узла опирания	11,89	7,33
Несоответствие сопряжения проекту	19,50	21,68
Дефекты монтажной сварки	10,41	11,03
Пропуск соединений	3,42	2,13
Перекосы и смещения	7,46	1,12
Отсутствие антикоррозионной защиты монтажных узлов и соединений	19,67	14,31
Пропуск элементов	5,20	0,67
Отсутствие замоноличивания и подливки	2,02	12,26
Прочие нарушения	4,19	4,49

Дефекты и повреждения в узловых соединениях. Основными видами связей в узлах строительных конструкций являются:

- контактные соединения (лобовая врубка, лобовой упор, шов кирпичной кладки, опирания конструкций);
- дискретные связи (болтовые, заклепочные, нагельные, гвоздевые);
- монолитные соединения (сварной шов, клеевой шов).

Вместе с соединительными деталями (фасонками, накладками) связи образуют узловое соединения (узлы).

Источниками дефектов и повреждений узловых соединений могут служить:

- на стадии проектирования - ошибки в выборе способов передачи усилия, неправильное назначение элементов в соединениях, как-то болтов, заклепок, клея, марки электродов; неправильное назначение длины сплошных соединений, количества дискретных связей, площади контактных соединений; неправильный учет температурно-влажностных условий эксплуатации; неучет анизотропии прочностных деформационных характеристик, выбор конструктивных решений, вызывающих концентрацию напряжений;

- на стадии изготовления - непровары, наплывы, шлаковые включения, уменьшение высоты катета шва, перекосы болтов и заклепок, неплотности в соединениях, непрочности в клеевых швах и т.п.;

- при эксплуатации - перегрузки, коррозионные повреждения, температурно-влажностные воздействия, биологические и энтомологические вредители и др.

Внешними признаками дефектов и повреждений являются:

- трещины в сварных швах, элементах соединения (фасонках, накладках, клеевых швах);
- разрывы в элементах соединения, в сварных швах, в зубчатых стыках;
- уменьшение размеров сечения при коррозионных и биологических воздействиях (сварные швы, нагели в древесине, фасонки, накладки);
- уменьшение количества рабочих связей (срез болтов и заклепок, разрушение клеевых соединений, разрушение анкеров и вклеенных стержней);
- смещение элементов соединения относительно друг друга (смятие болтов и заклепок, изгиб нагелей, смятие древесины и др.).

При диагностировании дефектов и повреждений в узловых соединениях определяют:

- размер дефекта (длину трещины, ширину ее раскрытия и глубину для клеевых соединений, положение на конструкции, глубину коррозионных повреждений, размеры сварного шва);
- количество поврежденных связей (число разрушенных болтов, заклепок);
- размеры соединительных деталей (высоту, длину и толщину фасонки и накладки);
- положение узлового соединения в системе конструкции для оценки дополнительных усилий;
- отклонение от проекта (использование материалов, не соответствующих проекту, увеличенная или уменьшенная величина шва);
- величину смещения элементов (табл.1.17) относительно друг друга.

Смещения элементов в узлах в основном характерны для конструкций из древесины, т.к. их соединения, за исключением клеевых, весьма податливые.

Распознавание причин и характера повреждений строительных конструкций зданий и сооружений имеет большое практическое значение как для технической эксплуатации, так и при проектировании и строительстве новых зданий. Следует отметить, что данные диагностики используются не только для ремонта и усиления зданий, но и для повышения качества разрабатываемых проектов, совершенствования технологии изготовления конструкций и методов возведения зданий и сооружений. Изучение и обобщение причин аварий зданий и сооружений, характерных признаков состояния конструкций, предшествующих обрушению или снижающих долговечность, является задачей диагностики.

Диагностика – наука об установлении и изучении признаков, характеризующих состояние строительных конструкций зданий и сооружений, для определения возможных отклонений и предотвращения нарушений нормального режима их эксплуатации.

Пределные смещения в соединениях деревянных конструкций

Вид соединения	Деформация соединения, мм
Примыкание поперек волокон для элементов из цельной древесины	0,3
То же для элементов из клееной древесины	2,0
Соединение на нагелях всех видов, кроме клеенных и сопряжений стальных элементов с деревянными	2,0
Соединения на лобовых врубках и примыкания торца в торец	1,5
Соединения на металлических пластинах всех типов	1,0
Соединения на клеенных стержнях из арматурной стали, работающие на выдергивание или продавливание поперек волокон	0,5
То же при работе на выдергивание или продавливание вдоль волокон	0,25
Клеевые соединения по кромке и помощью зубчатого стыка	0,0

С одной стороны, диагностика является частью обследования здания, а с другой стороны - это самостоятельная научная дисциплина, обладающая своим предметом и методами исследования. Диагностика оперирует определенными специфическими и узаконенными в своде правил понятиями.

Диагностика как всякая наука имеет свой предмет и методы изучения, а также свою характерную терминологию.

Дефект - отдельное несоответствие конструкций какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом.

Повреждение - неисправность, полученная конструкцией при изготовлении, транспортировании, монтаже или эксплуатации.

Категория технического состояния - степень эксплуатационной пригодности строительной конструкции или здания и сооружения в целом, установленная в зависимости от доли снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик конструкций.

Оценка технического состояния – установление степени повреждения и категории технического состояния строительных конструкций или зданий и сооружений в целом на основе сопоставления фактических значений параметров с проектными и нормативными значениями.

В зависимости от категории технического состояния конструкция или здание в целом классифицируются следующим образом.

Исправное состояние - категория технического состояния, при котором количественное и качественное значение параметров всех критериев оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений соответствуют требованиям нормативных документов (СНиП, СП; ТСН, ГОСТ, ТУ и т.д.).

Работоспособное состояние - категория технического состояния, при котором некоторые из численно оцениваемых контролируемых параметров не отвечают требованиям проекта, норм и стандартов, но имеющиеся нарушения требований, например по деформативности, а в железобетоне и по трещиностойкости, в данных конкретных условиях эксплуатации не приводят к нарушению работоспособности и несущая способность конструкций с учетом влияния имеющихся дефектов и повреждений обеспечивается.

Ограниченно работоспособное состояние – категория технического состояния строительной конструкции, при котором имеются дефекты и повреждения, приведшие к некоторому снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения и функционирование конструкции возможно при контроле ее состояния, продолжительности и условий эксплуатации.

Недопустимое состояние - категория технического состояния строительной конструкции или здания, характеризующаяся снижением несущей способности.

Аварийное состояние - категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, характеризующаяся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения (необходимо срочное проведение противоаварийных мероприятий).

Физический износ здания - ухудшение технических и связанных с ними эксплуатационных показателей здания, вызванное объективными причинами.

Нельзя забывать, что современное строительство существенно изменилось и качественно, и количественно. Повысилась этажность зданий и насыщенность технологическим оборудованием. В то же время ввиду массовости строительства с повышенными требованиями к экономии материалов снижаются коэффициенты запаса прочности и надежности конструкций.

Грамотная техническая эксплуатация зданий и сооружений предполагает знание основных повреждающих воздействий на конструкции в период их эксплуатации и степени опасности имеющихся на момент обнаружения повреждений.

В последние годы значительно увеличились объемы применения при производстве отделочных работ подвесных потолков, гипсокартона. Обладая несомненными эстетическими и технологическими достоинствами, они закрывают основные несущие конструкции, затрудняя доступ к ним для осмотра эксплуатирующими службами. Зачастую несвоевременное обнаружение развивающихся дефектов приводит к неожиданному обрушению строительных кон-

струкций. Тем важнее проведение квалифицированной диагностики состояния конструкций при строительстве и ремонтах зданий и сооружений.

Главная задача диагностики как науки состоит в разработке методов и средств получения всеобъемлющей информации о техническом состоянии объектов, мероприятий, направленных на предупреждение повреждений, и эффективных способов восстановления.

Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЧНОСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ

2.1. Микромеханика и кинетика разрушения

2.1.1. Зарождение микротрещин

Элементы теории дефектов в твердых телах. Советский ученый академик Я.И. Френкель, используя простейшую физическую модель деформирования идеальной кристаллической решетки, установил, что теоретическая прочность кристаллического материала должна в сотни раз превосходить его техническую прочность. Столь высокое значение теоретической прочности кристаллов долгие годы не находило экспериментального подтверждения, и лишь в 1952 г. удалось, разработав технологию получения бездефектных нитевидных кристаллов в лабораторных условиях, показать реальность указанных значений. Так, для нитевидных кристаллов железа (так называемых «усов») получена прочность при растяжении 13400 МПа. Напомним, что для Ст.3 предел текучести при растяжении равнялся 240 МПа. Физическое объяснение существенного различия между теоретической и технической прочностью материалов было найдено в 1954 г.

Во всех реальных кристаллических твердых телах имеются в большем или меньшем количестве элементарные дефекты кристаллической структуры, оказывающие влияние, нередко решающее, на макроскопические свойства и состояние твердых тел.

Таковыми дефектами являются:

- точечные дефекты - вакансии, межузельные атомы и др.;
- одномерные (линейные) дефекты – дислокации;
- двумерные (поверхностные) дефекты – границы зерен и двойников, дефекты упаковки и др.
- трехмерные (объемные) дефекты - пустоты, включения и т.д.

Большие успехи в изучении прочности и пластичности материалов в последние годы достигнуты в связи с развитием представлений о роли дефектов структуры в пластической деформации и в разрушении твердых тел, а также в теории точечных дефектов и теории дислокаций.

С точки зрения процессов возникновения отказов наибольший интерес представляют механизм и кинетика образования и развития элементарных структурных дефектов, процессы их перемещения и скопления, влияние дефектов на макроскопические свойства материалов.

Рассмотрим более подробно вышеперечисленные виды дефектов и их влияние на механические характеристики материалов.

Точечные дефекты. Как упоминалось, под точечными дефектами понимаются вакансии – узлы кристаллической решетки, в которых отсутствует атом или ион (незаполненные места в решетке); спаренные вакансии (две или более соединенные одиночные вакансии); межузельные атомы основного материала и посторонние атомы, образующие растворы замещения или внедрения. Наиболее распространенным типом дефектов в кристалле являются вакансии, которые оказывают наибольшее влияние на механизм и кинетику процессов ползучести, длительного разрушения, образования диффузионной пористости, обезуглероживания и других процессов, связанных с переносом атомов в материалах. В реальных кристаллах вакансии постоянно зарождаются и исчезают под действием тепловых флуктуаций. При пластической деформации, облучении, закалке стали происходит большое число неравновесных процессов, приводящих к возникновению или поглощению точечных дефектов и нарушению их равновесной концентрации.

Установлено влияние точечных дефектов на физические свойства материалов. Например, для многих металлов влияние вакансий на предел текучести выражается в увеличении предела текучести примерно на 100 Па на 1 % концентрации вакансий; при типичных концентрациях вакансий, возникающих во время деформации (примерно 0,003 %), это влияние сравнительно невелико.

Дислокации. Дислокациями называются одномерные (линейные) дефекты, искажения структуры кристаллической решетки.

Согласно современным представлениям, дислокации определяют в значительной степени механическую прочность твердых тел, особенно на начальной стадии нагружения, в начале процесса пластической деформации и разрушения. До недавнего времени основное внимание дислокационной теории было направлено на выявление влияния на механические свойства кристаллов внутренних напряжений, возникающих вокруг дефектов структуры. В последние годы теория дислокаций все больше внимания уделяет изучению кинетики деформации в связи с перемещением дислокаций и отысканию кинетических уравнений, в основу которых положены представления об элементарных процессах перемещения дефектов решетки.

Дислокации в кристалле образуют изолированные замкнутые петли, изолированные скопления вокруг большого количества частиц включений и выделений, двумерные и трехмерные сетки. Дислокация не может оборваться внутри кристалла; обрывы могут быть только на поверхности другой дислокации, на поверхности кристалла, на границе зерен или другом дефекте более общего типа.

Дислокации являются источниками внутренних напряжений; они создают поля напряжений в кристаллической решетке, приводящие к соответствующим локальным деформациям, смещениям. Вблизи дислокационной линии (в области ядра дислокации) развиваются большие искажения и напряжения. Дислокация остается в кристалле только потому, что ее выход затруднен. Срыв и перемещение дислокаций требует затрат определенной энергии и происходит при пластической деформации под действием внешних сил и термической активации. При длительном приложении внешних сил для развития этих процессов достаточно сравнительно малых напряжений.

Различают два типа движения дислокаций:

- движение в плоскости скольжения (скольжение);
- движение, при котором дислокация выходит из плоскости скольжения (переползание).

При небольших напряжениях и температуре переползание дислокаций маловероятно. Переползание дислокаций всегда связано с диффузией, является активационным процессом (для переползания дислокаций всегда требуется энергия активации) и существенно зависит от температуры.

О количестве дислокаций судят по их плотности, т.е. по числу дислокационных линий, пересекающих единицу площади. Так, для отожженных сталей плотность дислокаций составляет $10^5 \dots 10^7$ линий на 1 см^2 . Дислокации в процессе пластического деформирования не только перемещаются, но и множатся. При этом их плотность может увеличиваться на несколько порядков. Увеличение плотности дислокаций в связи с их взаимодействием создает энергетические препятствия их движению.

Существенным достижением дислокационных теорий прочности, безусловно, является установление физической сущности пластической деформации, которая неизбежно сопутствует любому виду разрушения, в том числе и хрупкому. В связи с этим нашла теоретическое объяснение диалектическая сущность роли пластической деформации в подготовке к зарождению хрупкого разрушения. В рамках дислокационных теорий прочности установлены принципиальные схемы зарождения хрупких трещин в стали, связанные с движением и размножением дислокаций. На рис. 2.1 показано несколько таких схем, объясняющих зарождение трещины на границе зерен стали.

Все дислокационные механизмы можно разделить на несколько групп. Прежде всего, это случаи, когда принудительное слияние многих дислокаций ведет к формированию полости (рис. 2.1, а). Далее следуют механизмы, связанные с заторможенным сдвигом, при котором возникновение микротрещины обусловлено полями упругих напряжений в голове скопления (рис. 2.1, б). Может наблюдаться вскрытие самой плоскости скольжения (рис. 2.1, в...д). Довольно четко объединяются схемы пересечения «двойник–двойник», «полоса скольжения–полоса скольжения» (рис 2.1, е). Существует вариант образования зародыша трещины при разрыве или частичном смещении дислокационной стенки. Однако во многих случаях невозможно провести четкую грань между

различными вариантами и исключить существование еще серии механизмов, отличных от рассмотренных.

Именно движение дислокаций под воздействием напряжений сдвига является физической причиной появления пластических деформаций в стали как в поликристаллическом материале.

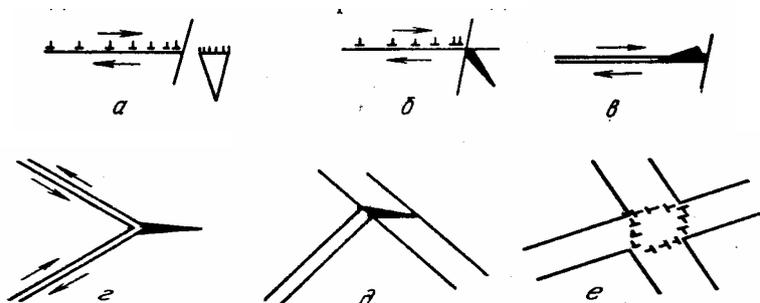


Рис. 2.1. Механизмы слияния дислокаций:

- а) слияние головных дислокаций; б) вскрытие трещин в вершине заторможенного сдвига под действием напряжений; в) вскрытие плоскости скольжения;
- г) вскрытие искривленной плоскости скольжения; д) разрушение при пересечении плоскостей скольжения; е) вариант возникновения микротрещин при пересечении плоскостей скольжения

Пластическая деформация не только контролирует процесс подрастания субкритических трещин, но и служит его основной движущей силой.

2.1.2. Рост докритических трещин

Потенциально возможные дислокационные механизмы процесса (рис. 2.2) изучены меньше, чем дислокационные реакции образования микротрещин.

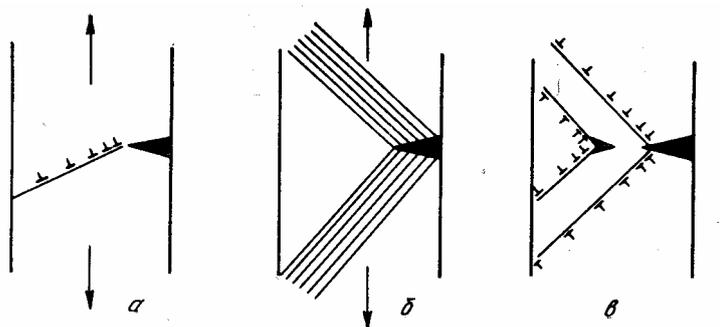


Рис. 2.2. Механизмы докритического подрастания микротрещин:
а) механизм Орована; б) механизм Паркера; в) механизм Коттрела

В инженерных методах расчета прочности и деформативности элементов конструкций дислокационные теории не используются, они привлекаются лишь

для физического объяснения процессов пластической деформации и разрушения.

Процесс разрушения состоит из двух стадий: докритической и закритической. На первой из них протекает пластическая деформация, ведущая к зарождению и медленному вязкому подрастанию микротрещин. В литературе описано несколько потенциально возможных дислокационных механизмов процесса подрастания трещин.

Первый из них – это механизм Орована (рис. 2.2, а), он сформулирован для кристаллических материалов. При одноосном растяжении кубического кристалла существовавшая ранее малая трещина, не способная к самостоятельному росту, инициируется приближающейся полосой скольжения. Когда расстояние между полосой и трещинкой становится достаточно малым, возникающие в вершине последней высокие растягивающие напряжения вызывают скол. В условиях многих близко расположенных полос скольжения трещина удлиняется таким путем до достижения размеров, удовлетворяющих условию Гриффитса. Лишь после этого начинается ее распространение за счет высвобождения упругой энергии. Схема Орована близка к модели Паркера, предполагающей встречу двух пачек скольжения в окрестностях поверхности трещины (рис. 2.2, б). Третьим является механизм, синтезирующий классический механизм образования микротрещин по Коттреллу с исходной поверхностной трещиной (рис. 2.2, в). Предполагается возможным слияние трещины, генерируемой по Коттреллу, с поверхностной трещиной.

Таким образом, разрушение на макроуровне подготавливается системой дефектов в структуре материала, начиная с молекулярного уровня. В рамках дислокационных теорий прочности установлены принципиальные схемы зарождения хрупких трещин в связи с движением и размножением дислокаций. На рис. 2.3 показаны две такие схемы.

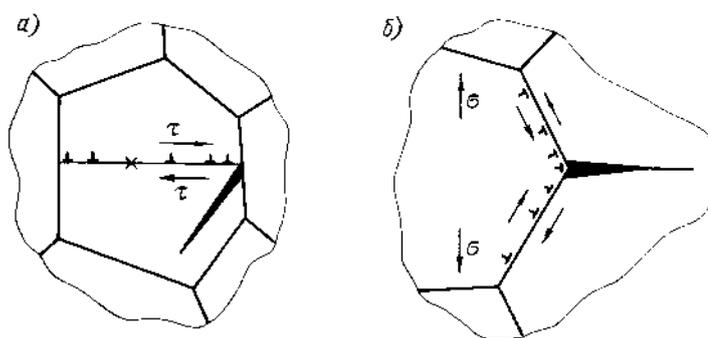


Рис. 2.3. Схемы образования трещин в металле:
а) у границы зерна; б) в пересечении плоскостей сдвига

Теория дислокаций интенсивно развивается с 1934 г., однако лишь 1953 г. в связи с развитием электронной микроскопии удалось обнаружить дислокации экспериментально. Интересным фактом является практическое совпадение теоретических представлений о движении и размножении дислокаций с экспериментальными данными, что является редким событием в физике.

Тем не менее, стройная и изящная теория дислокаций в плане предсказания механических свойств реальных материалов может выполнять лишь качественную роль, подсказывая правильный выбор феноменологических гипотез.

Кинетическая концепция процессов механического разрушения материалов. Классические представления о пластической деформации конструкционных материалов и разрушении как о критических событиях, наступающих тогда, когда действующие в материале напряжения достигают некоторой критической величины, бытовали еще до недавнего времени. Основная масса формул для технических расчетов построена именно на таких представлениях. Согласно им, при напряжениях, меньших предела упругости, пластические деформации вообще не могут развиваться, а разрушение тела происходит (практически мгновенно) только тогда, когда напряжения достигнут предела прочности. Однако в последние годы этому взгляду противопоставляется другой подход, согласно которому разрушение материалов рассматривается не как критическое событие, а как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале во времени с момента приложения к нему нагрузки, в том числе меньше критической. Начиная с 1952 г. в лаборатории физики прочности ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР под руководством С.Н. Журкова были организованы систематические исследования температурно-временной зависимости прочности твердых тел, и этим заложено начало серьезного развития кинетической концепции прочности.

В соответствии с кинетической теорией одним из фундаментальных свойств прочности является ее зависимость от времени; деформация и разрушение должны характеризоваться не предельными напряжениями, а скоростью деформации и разрушения. Пределы упругости, текучести, прочности являются с этой точки зрения лишь некоторыми условными характеристиками.

Скорость процессов механического разрушения нагруженного твердого тела и, соответственно, время до разрушения зависят от структуры и свойств конкретных материалов, а также от напряжения, вызываемого нагрузкой, и температуры.

Наибольшее признание получила установленная экспериментально для многих материалов (металлов, сплавов, полимеров и каменных материалов) следующая температурно-временная зависимость прочности от напряжения σ , абсолютной температуры T и времени τ от момента приложения постоянной нагрузки до разрушения образца.

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(k \cdot T)], \quad (2.1)$$

где τ_0 , U_0 и γ - параметры, характеризующие прочностные свойства твердого тела, постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

Одним из основных аспектов в описании кинетики разрушения механизм межатомного взаимодействия. Множитель $\exp(U_0)/(k \cdot T)$, входящий в формулу Журкова, имеет название фактор Больцмана. Этот фактор «управляет» ходом таких процессов, как испарение, диффузия, развитие химических реакций и т.д. Общим, что объединяет эти явления, служит неравномерность распределения тепловой энергии между атомами тела, порождаемая хаотичностью движения. Атомы с избыточной тепловой энергией называются активированными, а процессы, ими обусловленные, - активационными (или термоактивационными). Процесс разрушения имеет термоактивационную (или термофлуктуационную) природу. Кинетика развития подобных процессов определяется вероятностью преодоления «энергетических барьеров», т.е. перехода системы через состояние с повышенной потенциальной энергией. Величина U , стоящая в числителе показателя Больцмановского фактора, является тем барьером, который должен преодолеть активированный атом. Отношение энергии активации U к средней тепловой энергии, приходящейся на одну степень свободы атомов тела $k \cdot T$, определяет скорость развития процесса. Согласно Я.И. Френкелю, колебания атомов можно представить как кратковременные «толчки» данного атома попеременно в разные стороны от положения равновесия на дне «потенциальной ямы». Вследствие хаотичности теплового движения такие колебания атомов время от времени нарушаются. В силу же последовательных толчков со стороны «соседей» или же в результате случайно совпавшего группового толчка, атом может превысить среднюю амплитуду обычных колебаний, и его энергия может оказаться значительно больше, чем средняя энергия. Это событие называется *флуктуацией*.

Вероятность возникновения флуктуаций атомов одинакова как в нагруженных, так и в ненагруженных телах. Однако в ненагруженных телах велика вероятность рекомбинационных процессов. Поэтому возникающие время от времени разрывы связей будут быстро залечиваться. В нагруженном теле приложенное напряжение приводит к ослаблению межатомных связей вдоль направления действия растягивающей силы. Это означает, что потенциальный барьер, определяющий прочность связи, понизится с U_0 до $U(\sigma)$ на величину $\Delta U(\sigma)$. К тому же, в момент термофлуктуационного распада напряженной связи атомы под действием растягивающей силы удаляются друг от друга, и вероятность рекомбинации снижается.

Многочисленные исследования подтвердили справедливость термофлуктуационных воззрений на разрушение твердых тел и позволили уточнить значения параметров, входящих в уравнение долговечности, а также определить их физический смысл.

- Значение предэкспоненциального множителя τ_0 является величиной постоянной для всех материалов и равной $\tau_a = 10^{-13}$ с.

- Величина энергии активации разрушения U_0 постоянна для данного материала и не зависит от его структурных изменений и условий испытания.
- Значение величины γ зависит от структурных изменений в материале, но не зависит от условий испытаний.

Более поздние исследования показали, что теория С.Н. Журкова не вполне отвечает реальным процессам, происходящим при разрушении твердых тел. Вид формулы (2.1) предполагает постоянство во всем диапазоне температур и нагрузок всех констант материала: U_0 , τ_0 , γ . Однако это невозможно для существующих материалов: неограниченное повышение температуры приведет обычные твердые тела к плавлению, а аморфные термопласты – к размягчению или потере целостности (деструкции полимерных молекул).

Значит, для каждого вещества существует предельная температура, при достижении которой происходит распад его на фрагменты. Этой предельной температуре отвечает положение полюса.

$$\tau = \tau_m \cdot \exp[(U_0 - \gamma \cdot \sigma) / R] (T^{-1} - T_m^{-1}), \quad (2.2)$$

где τ_m , U_0 и T_m - физические константы материала: τ_m – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц - атомов, групп атомов, сегментов), с; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, кДж/моль; γ - структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа);

T_m - предельная температура существования твердого тела, при которой материал разрушается или размягчается, К;

R -универсальная газовая постоянная, кДж/(моль К); τ - время до разрушения (долговечность), с;

T - температура, К.

Структура формулы говорит о том, что отсчет обратной температуры идет не от $1/T = 0$, а от $1/T_m$, т.е. существует некоторая предельная температура, выше которой материал не работает, причем долговечность материала τ_m в этом случае минимальна.

Процессы разрушения низкомолекулярных соединений и полимеров сильно отличаются. Так, для разрушения и деформации металлов и других низкомолекулярных кристаллов требуется разрыв межатомных связей. Для разрушения полимеров необходим разрыв связей между атомами в основной полимерной цепи, а деформация возможна путем разрыва (и восстановления в других положениях) межмолекулярных связей между звеньями и сегментами цепи.

Кинетика накопления разрывов межатомных связей. Феноменологические исследования температурно-силовой зависимости долговечности позволили предположить, что сущностью разрушения является распад напряженных межатомных связей, вызываемый тепловыми флуктуациями. Примеры полученных временных зависимостей показаны на рис. 2.4.

Методы, примененные для обнаружения разрывов молекул, показывают развертывание этих процессов во времени – рост накопления продуктов – и выявляют однотипную форму данных временных зависимостей – затухание с течением времени.

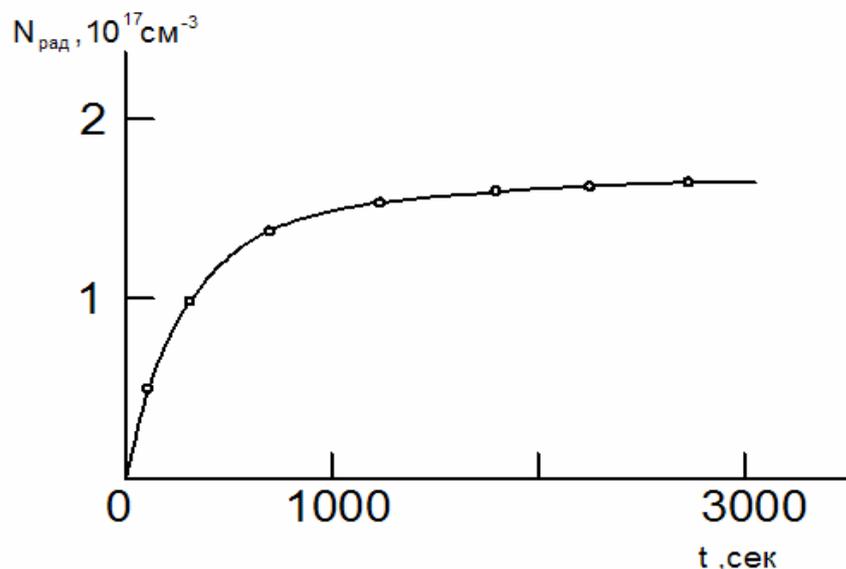


Рис. 2.4. Экспериментальная зависимость числа разрушенных межатомных связей от времени для полиэтилена

Получение определенного комплекса прямых данных по молекулярному разрушению полимеров позволяет перейти к рассмотрению разрушения на следующем этапе – этапе локализации разрушения, этапе перехода от разрывов одиночных межатомных связей к разрывам сплошности.

Зародышевые трещины. Накопившиеся к последнему времени экспериментальные данные привели к возникновению понятия «первичный очаг разрушения». Под ним понимается наиболее мелкая трещина, получившая название «зародышевой».

Интересные данные по распределению несплошностей по размерам были получены с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2.5, рис. 2.6) для ряда материалов, которые находились в эксплуатации.

Распределение микронесплошностей по размерам имело два максимума. Один максимум в области несплошностей зародышевого размера (примерно 0,1 мкм), второй блочного размера. Наблюдался и третий максимум в области размеров примерно 10 мкм, близкий к размеру зерна. Исследованием ползучести сталей установлено, что размеры образующихся микропор (табл. 2.1) составляет от 0,05...0,1 мкм, до 10...15 мкм. При этом средний размер пор составлял примерно 1...1,3 мкм.



а)

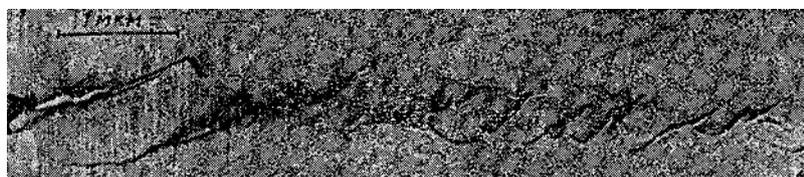


б)

Рис. 2.5. Зародышевые и структурные несплошности в деформированных материалах (металлах):
а - сканирующая микроскопия; б - высоковольтная микроскопия



а)



б)

Рис. 2.6. Зародышевые и структурные несплошности в деформированных каменных материалах:
а - сканирующая микроскопия; б - высоковольтная микроскопия

Таблица 2.1

Размеры L и максимальная концентрация
зародышевых микронесплошностей в материалах

Материал	L , мкм		N , м ⁻³	
	Кристаллические материалы			
	Рентген	Микроскопия	Рентген	Микроскопия
Алюминий	0,14	0,2	10^{17}	-
Никель	0,08	0,1	10^{18}	$2 \cdot 10^{18}$
Золото	-	0,2	-	$2 \cdot 10^{17}$
Медь, цинк	-	0,25	-	$5 \cdot 10^{18}$
Сталь	-	0,1	-	-
Соль	2	1...3	10^{13} - 10^{14}	10^{14}
Полимерные материалы				
Полиэтилен	-	0,015	-	$6 \cdot 10^{21}$
Полипропилен	-	0,02	-	$7 \cdot 10^{20}$
Целлюлоза	-	0,08	-	10^{18}
Полиэфирная смола	-	0,09	-	$5 \cdot 10^{17}$
Поливинилхлорид	-	0,3	-	10^{18}

На рис. 2.7 изображена экспериментальная функция распределения по размерам зародышевых микротрещин, образующихся в нагруженных металлах, полученная при помощи просвечивающей и растровой микроскопии.

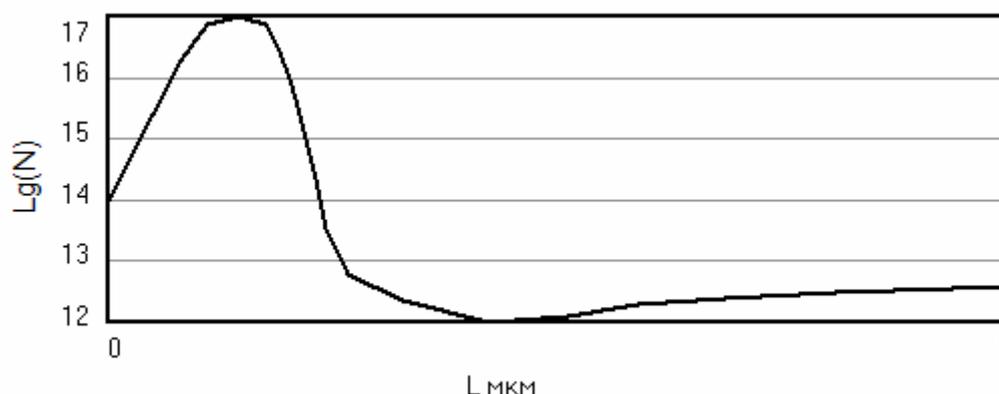


Рис. 2.7. Экспериментальная функция распределения по размерам микротрещин, образующихся в нагруженных металлах

Исследования при помощи обладающей большим разрешением просвечивающей высоковольтной электронной микроскопии показали, что в пластичных металлах зародышевые трещины имеют клиновидную форму с соотношением длины к ширине 5:1. Тщательные исследования кинетики роста зароды-

шевых трещин показали, что в нагруженном материале микротрещины, размеры которых меньше, чем зародышевых, неустойчивы.

Экспериментальные данные получены при помощи просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами и рассеяния видимого света, прецизионного измерения и обусловленного трещинообразованием изменения плотности.

Видно, что распределение имеет острый максимум, указывающий, что в нагруженном теле преимущественным образом возникают микротрещины определенного размера, примерно 150...200 нм.

Концентрация таких трещин на много порядков больше, чем микротрещин большего или меньшего размера. Это явление характерно для всех исследованных к настоящему времени материалов. При нагружении образуются в основном микротрещины определенного размера. Время их образования составляет около 10^{-9} с.

Они быстро увеличиваются до тех пор, пока не достигнут размера зародышевых микротрещин. После того, как достигается предельная величина (около 150 нм), дальнейший рост размеров микротрещин прекращается. Начиная с этого момента, в процессе разрушения растет лишь концентрация зародышевых трещин, а размер их остается постоянным. Дальнейшие исследования на сталях и сплавах показали, что более крупные несплошности состоят из 15...20 слившихся мелких несплошностей.

Кинетика накопления зародышевых микротрещин. Концентрация зародышевых трещин, как показал опыт, не может быть бесконечно большой. Разрушение образца происходило во всех случаях при достижении определенной одной и той же критической концентрации C^* микротрещин. Это явление имеет общий характер. Все исследованные материалы независимо от режима их нагружения разрушаются при достижении определенного для каждого из них значения концентрации зародышевых трещин. Более того, измерения растущей магистральной трещины показали, что в вершине ее концентрация зародышевых трещин также имеет критическую величину.

С точки зрения силового подхода к разрушению этот результат является неожиданным. Действительно, априори, исходя из того, что любая трещина является концентратором напряжений, а скорость разрушения зависит от напряжения экспоненциально, можно было бы ожидать, что появление одной микротрещины уже должно приводить к разрушению. Объяснение этому явлению дано с точки зрения термодинамики. Как доказано, трещинообразование выгодно с энергетической точки зрения, если оно приводит к выделению энергии, т.е. если энерговыделение из тела больше его энергоемкости (способности поглощать выделяемую энергию). Трещинообразование локализуется, если мощность выделения свободной энергии превышает величину, среднюю по телу; до этого момента энергетически выгоднее делокализованное (рассеянное) накопление микротрещин.

2.1.3. Переход трещин в лавинную стадию роста. Вязкость разрушения

Рост докритических трещин. Теория Гриффитса. Разрыв материала не происходит сразу по всему сечению, а начинается с небольшой трещины. Как известно, в вершине трещины происходит концентрация напряжений.

В целом среднее напряжение недостаточно для разрушения, но в каждый момент времени нагрузка локально действует на небольшой участок в вершине трещины, что в итоге может привести к обрушению конструкции. Для этого маленького участка около края трещины, с учетом эффекта концентрации, напряжения в вершине трещины достаточно велики, чтобы углубить трещину. Трещины постепенно подрастают и, в конечном счете, одна или несколько из них начинают преобладать в росте, достигают критической длины, после чего процесс разрушения приобретает лавинообразный характер, приводя в конечном итоге к распаду тела на части.

А. Гриффитс предложил энергетический подход к описанию хрупкого разрушения материалов. Согласно этой теории реальная прочность твердого тела в значительной мере зависит от врожденных и образовавшихся дефектов в его структуре.

Принцип Гриффитса основан на том, что потенциальная энергия твердого тела, накопленная им в процессе упругого деформирования, перед разрушением превращается в поверхностную энергию образующихся новых поверхностей.

Следовательно, трещина будет распространяться в том случае, если высвобожденная энергия упругих деформаций превосходит увеличение поверхностной энергии при образовании новых поверхностей. В результате был получен новый критерий (2.3) оценки прочности

$$\sigma = \sqrt{2\gamma E / \pi a}, \quad (2.3)$$

где a - размер трещины, γ - свободная поверхностная энергия тела, σ - приложенное напряжение, E - модуль упругости материала. Единицы изм.???

В момент потери устойчивости материала напряжение и размер трещины принимают предельные значения.

Теория А. Гриффитса была разработана применительно к хрупким материалам типа стекол. Для тел, не обладающих идеальной упругостью, образование новой поверхности при развитии трещины сопровождается остаточными деформациями, что характерно для металлов и бетонов.

Дальнейшее развитие данная концепция получила в работах Р. Ирвина и Е. Орована. Ими предложено рассматривать энергию на образование новых поверхностей тела при разрушении как сумму истинной удельной поверхностной

энергии и энергии, поглощаемой пластической деформацией $\gamma_{пл}$ в приповерхностном слое тела (2.4).

$$\sigma = \sqrt{(2\gamma + \gamma_{пл})E / \pi a}. \quad (2.4)$$

Теория Гриффитса-Ирвина-Орована может быть применена лишь в том случае, если возникающие в зоне предразрушения пластические деформации значительно уступают размерам трещины.

Деформационный критерий разрушения. Предполагается, что:

- максимальные растягивающие напряжения не превосходят сопротивления отрыву σ_0 ;
- до напряжений σ_0 действует закон Гука;
- при превышении напряжения σ_0 образуется щель – аналог трещины;
- поверхности щели могут притягиваться на расстоянии, меньшем чем δ , или не взаимодействовать.

Если G – энергия разрушения, то $\delta \cdot \sigma_0 = G$. Критическое условие перехода трещины в стадию быстрого роста имеет следующий вид:

$$\sigma = (2/\pi)\sigma_0 \arccos \exp(-c/\ell).$$

Величина 2ℓ – длина трещины, т. е. полный размер щели за вычетом краевых участков с ослабленными связями

$$c = \pi E \delta / 8(1 - \nu^2) \sigma_0.$$

Критерий предельных напряжений. В описании процесса разрушения материалов наряду с энергетическим подходом существенное значение имеет и силовой критерий, учитывающий распределение критических напряжений, деформаций или смещений вблизи вершины (кончика) трещины. Впервые предложили силовой подход для определения начала распространения трещины в деформируемом твердом теле К. Витхард, М.Л. Вильямс и Дж. Р. Ирвин. Согласно их теории существуют три основных типа разрушений материалов при распространении трещины в условиях действия внешних нагрузок:

- нормальный разрыв или отрыв;
- поперечный сдвиг;
- продольный сдвиг.

Был получен силовой критерий для определения начала срагивания и роста трещины в деформируемом твердом теле, который заключается в следующем. Распространение трещины происходит тогда, когда коэффициент интенсивности напряжений становится равным некоторой постоянной для каждого материала максимальной величине $K_I = K_{Ic}$. Последующий рост трещин может происходить устойчиво и неустойчиво. Если внешняя нагрузка постоянна, то трещина неподвижна. Для роста трещины необходимо приращение величин

ны внешней нагрузки. Рассмотренные выше модели составляют основу линейной механики разрушения, главной особенностью которой является то, что размеры зоны предразрушения у конца трещины малы по сравнению с длиной и шириной исходной трещины.

Постоянные для каждого материала коэффициенты интенсивности напряжений K_{1c} , K_{2c} , K_{3c} определяются экспериментально.

Вязкость разрушения. Реальный материал, как правило, содержит дефекты, в частности трещины, и, тем не менее, в определенных условиях способен надежно работать. Можно считать, что стали обладают иммунитетом против мелких трещин. Например, установлено, что узкие и неглубокие трещины с размерами, не превышающими 0,25 мм, не влияют на предел прочности. Поскольку такие трещины всегда имеются в реальном металле, опасение вызывает не их присутствие, а условия работы напряженной системы.

Под вязкостью разрушения (понятие введено Ирвином) понимают сопротивление материала продвижению в нем трещины. Суть вопроса состоит в определении протяженности трещины, которой материал может сопротивляться при той или иной нагрузке. Каждому данному материалу, размеру образца, характеру приложенных напряжений отвечает свой критический размер трещины, отделяющий состояние стабильности от состояния ее быстрого распространения. Чем выше вязкость материала, тем больше этот размер.

В количественном отношении вязкость разрушения характеризуют коэффициентом интенсивности напряжений и энергией деформации, освобождающейся при распространении трещин, на единицу длины трещины или движущей силой трещины G . Как было показано выше, эти величины жестко связаны. Критическую величину фактора интенсивности напряжений, отвечающую моменту неустойчивости трещины, обозначают K_c . Эта величина имеет ряд значений, зависящих от условий нагружения у вершины трещины. По мере увеличения толщины образца K_c уменьшается, так как условие плоского напряженного состояния переходит в условие плоской деформации. Изменяется и характер разрушения. Минимальное значение K_{ic} характеризует прочность в состоянии плоской деформации.

Величина G - движущая сила трещины на единицу ее длины - представляет собой другой общепринятый критерий для определения вязкости разрушения. G_c - значение, отвечающее мгновению неустойчивости трещины для плоского напряженного состояния, G_{ic} - для плоской деформации.

Согласно Ирвину, $K_c^2 = EG_c/\pi$ для плоского напряженного состояния; $K_{ic}^2 = EG_{ic}/\pi(1-\nu^2)$ для плоской деформации.

Испытание состоит в следующем. По мере распространения трещины сила G возрастает. Для каждого вида нагружения определяют точку неустойчивости и значение G_c . Величины G_{ic} и K_{ic} не зависят от размеров образца в отличие от G_c и K_c . Поэтому G_{ic} и K_{ic} представляют больший интерес для общей оценки материала.

Ветвление трещин. Первая теоретическая работа, в которой рассматривался эффект ветвления трещины, по предложению Орована, была выполнена Э. Иоффе. Орован полагал, что при высоких скоростях роста трещины появится тенденция к ее отклонению от основной оси и ветвлению. Иоффе рассмотрела трещину конечной длины, распространяющуюся в упругом изотропном материале, в предположении, что взаимодействие между концами трещины отсутствует. Определялось поле напряжений в вершине трещины в зависимости от скорости ее движения.

Вычисления показывают, что напряжения в окрестностях вершины трещины возрастают с ростом ее скорости. Если трещина распространяется перпендикулярно к максимальным растягивающим напряжениям, то при скорости, превышающей 0,6 скорости поперечных волн, напряжения перестают быть наибольшими в направлении распространения трещины и возникает состояние, при котором распространение трещины становится более вероятным в других направлениях, т. е. трещина будет в этих условиях искривлять свою траекторию. По мнению Иоффе, искривление трещины должно вести к ветвлению, так как вблизи трещины в различных направлениях существуют примерно равные напряжения.

Первое упоминание об экспериментальном наблюдении ветвления имеется у Орована, который обнаружил этот эффект на листах целлофана. Был исследован также процесс разрушения полиметилметакрилата в виде листов, содержащих надрез длиной от 1 до 2 см. Движение трещины регистрировали осциллографом при разрыве трещиной проводящих полосок. Все трещины разветвлялись, пройдя 2/3 сечения пластины. Если трещины росли из короткого надреза, ветвление наступало при больших скоростях. Скорость, при которой начиналось ветвление, составила 600 м/с, что соответствует примерно 0,95 предельной скорости трещины.

Своеобразные явления ветвления протекают при разрыве металлических образцов, покрытых поверхностно - активным металлом. Трещина, обнаруживаемая радиографическим методом и способная перемещаться со скоростью до 7,5 м/с, разделялась на конце на очень большое число вторичных трещин, которое возрастало с величиной упругих напряжений; нередко эти трещины образуются веером. Исследования показали, что в стенках магистральной трещины образуется разветвленная сетка ультрамикротрещин. Микроскопическое ветвление и увеличение микротрещин оказываются параллельными процессами.

Следует отметить, что, несмотря на внешнее подобие, ветвление, интересующее нас, и ветвление, обусловленное поверхностно-активными металлами, мигрирующими в район вершины медленной трещины, - явления, по-видимому, разные. Первое обусловлено изменением поля упругих напряжений в вершине быстрой трещины и вызвано ее скоростью, второе неразрывно связано с диффузионными процессами и при очень больших скоростях (порядка скорости упругих волн) наблюдаться, вероятно, не может.

Объединение микротрещин. Часто оказывается, что монолитная в макроскопическом отношении трещина представляет собой в микроскопическом плане совокупность микрощелей, смещенных вдоль и поперек направления распространения трещины. Для квазихрупких или вязких материалов реальна именно система трещин, в то время как отдельную монолитную трещину можно рассматривать лишь как известное и очень удобное теоретическое приближение.

Типичным примером разрушения, происходящего вследствие объединения системы микротрещин, является завершающая стадия ползучести, когда основная трещина, перемещаясь по межкристаллитному сочленению, присоединяет многие мелкие. Образование систем микротрещин до разрушения и в его процессе — это не исключение, а правило. Микротрещины могут возникать на самых ранних стадиях пластической деформации, особенно в поликристаллических материалах, где всегда возможны перегрузки отдельных зёрен. Всегда или почти всегда реальный металл работает с готовыми или появляющимися на самых ранних этапах деформирования микротрещинами. К моменту наступления критической стадии разрушения (росту магистральной трещины) материал оказывается пронизанным микроскопическими зародышами разрушения.

2.1.4. Переход от микроразрушений к образованию макроскопических и магистральных трещин. Трещиностойкость материалов

Концентрационный критерий разрушения. Накопление зародышевых микронесплошностей не может длиться бесконечно. Во всех случаях образцы разрываются после достижения одной и той же характерной для материала концентрации C^* зародышевых трещин. Это явление имеет общий характер; все исследованные материалы независимо от режима их нагружения разрываются при достижении определенного для каждого из них значения критической концентрации зародышевых трещин. Более того, измерения растущей магистральной трещины показали, что в вершине ее концентрация зародышевых трещин также имеет критическую величину C^* .

Если размер зародышевых трещин меньше критического ($l \leq l^*$), то имеет место их делокализованное множественное накопление. В силу равновероятности центров такого трещинообразования оно носит хаотичный характер. Из-за хаотичности накопление трещин сопровождается спонтанной статистической кластеризацией (укрупнением начальных трещин), которая в конце концов приводит к появлению трещины критического размера l^* , после чего процесс дальнейшего трещинообразования локализуется. Таким образом, развитие зародышевых трещин ($l \leq l^*$) содержит две стадии, и критерием их смены является формирование «крупной» трещины размера l^* .

Когда же наступает стадия локализованного разрушения? Рассмотрение статистической кластеризации, основанное на вероятностном анализе, показало, что трещинообразование, делокализованное в объеме тела вследствие спонтанной кластеризации имеет предел, минимальное значение которого равно основанию натурального логарифма e .

Критическая концентрация C^* зародышевых трещин, обуславливающая потерю устойчивости и разрушение тела, связана с их размером ℓ зависимостью

$$C^{*-1/3} = e \cdot \ell. \quad (2.5)$$

Это условие было названо «концентрационным критерием разрушения».

Появление крупных трещин и их быстрый рост за счет поглощения мелких, зародышевых трещин вносит в процесс новые корреляции и тем самым переводит его в новую стадию. Для небольших лабораторных образцов вторая стадия обычно вызывает полное разрушение. Однако в крупных гетерогенных материалах на второй стадии образуются лишь более крупные трещины (рис. 2.8), стабилизация которых обусловлена гетерогенностью.

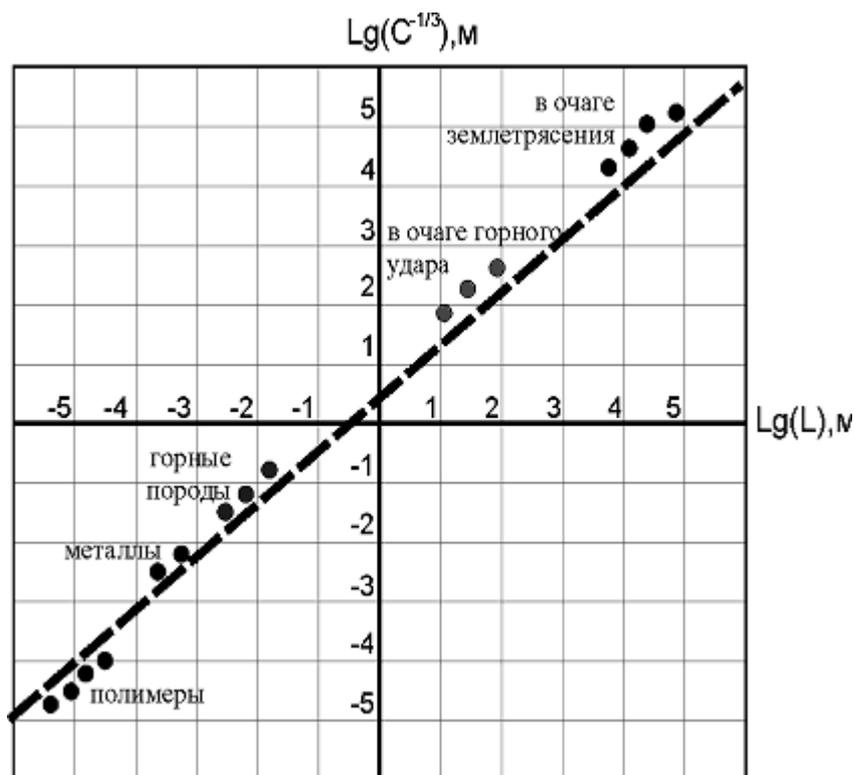


Рис. 2.8. Зависимость между размерами трещин ℓ и их концентрацией C в материалах перед разрушением

В заключение остановимся на проблеме взаимодействия макро - и микро-трещин между собой. В силовом подходе такое взаимодействие осуществляется только за счет полей механических перенапряжений. Учет атомной динамики

открывает новые возможности для взаимодействия трещин. После взрывообразного появления микротрещины скорость ее роста уменьшается, по крайней мере, на два порядка. Такой характер поведения микротрещин свидетельствует об ограниченном запасе накопленной энергии в локальном объеме перед ее образованием. С другой стороны, появление новой микротрещины в окрестностях старой приводит к быстрому росту скорости развития трещины примерно на 1,5 порядка. Этот эффект объясняется тем, что новая микротрещина при своем зарождении выделяет часть упругой энергии, которая резонансно поглощается старой, обуславливая увеличение скорости ее роста. Таким образом, характер взаимодействия микротрещин определяется в первую очередь не полями их упругих напряжений, а скоростью поступления энергии из их окружения. Скачкообразный характер роста наблюдается и при взаимодействии магистральной трещины с микротрещинами. Скорость роста магистральной трещины скачкообразно увеличивается при зарождении около ее вершины микротрещин. Следовательно, упругая энергия, выделяемая зарождающимися микротрещинами, способна влиять на скорость роста магистральных макротрещин.

По-видимому, соотношение между диссипативной способностью локального объема материала и величиной высвобождаемой при зарождении микротрещин энергии обуславливает скорость роста магистральных трещин и является определяющим в переходе от стадии накопления зародышевых микротрещин к катастрофическому разрушению на самых ранних стадиях пластического деформирования.

2.1.5. Классификация несплошностей в бетонах по размерам. Масштабные уровни трещинообразования

Структура бетонов (табл. 2.2) состоит из нескольких масштабных уровней (в порядке увеличения масштаба):

- отдельного кристалла;
- кристаллического сростка;
- цементирующего вещества;
- цементного микробетона;
- мелкозернистого бетона;
- крупнозернистого бетона.

Каждому из уровней соответствует свой структурный элемент (включение), выступающий в роли концентратора напряжений. К ним относят:

- дефекты кристаллической решетки;
- поры кристаллического сростка (рис. 2.9);
- капиллярные поры;
- остаточные частицы цемента;
- макропоры или зерна заполнителя.

На масштабном уровне крупнозернистого бетона роль матрицы исполняет мелкозернистый бетон, в роли включений могут выступать зерна заполнителя, макропоры.

Таблица 2.2

Характерные размеры трещин, выявленные экспериментально
в материалах

Наименование масштабного уровня	Размеры трещин		Размер относительно дислокации (поз.№3)
	Ед.	Мм	
МИКРОУРОВЕНЬ			
Вакансия	$2...3 \text{ \AA}^0$	$1...3 \times 10^{-7}$	2×10^{-2}
Порог	$5...50 \text{ \AA}^0$	$5...50 \times 10^{-7}$	22×10^{-2}
Дислокация	100 \text{ \AA}	1×10^{-5}	1
Группа дислокаций	100...1000 \text{ \AA}	$1...10 \times 10^{-5}$	5
МЕЗОУРОВЕНЬ			
Субзерно	0,1...1 мкм	$0,1...1 \times 10^{-3}$	50
Участок зерна	1...20 мкм	$1...20 \times 10^{-3}$	1000
УРОВЕНЬ ЗЕРНА			
Зерно, дендрит	10...200 мкм	$10...200 \times 10^{-3}$	10×10^2
МАКРОУРОВЕНЬ			
Группа зерен, волокно	0,2...0.5 мм	$2...5 \times 10^{-1}$	3×10^4
Участок образца	1 мм	1	10^5
Образец в целом	1...10 мм	1...10	10^6

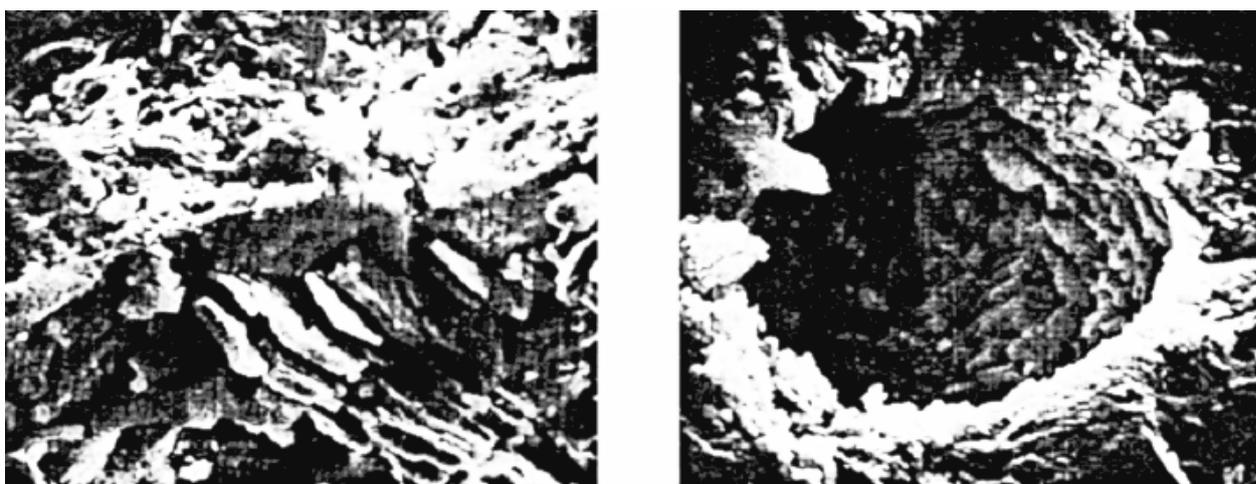
На масштабном уровне мелкозернистого бетона матрицей является цементный микробетон, в роли включений в зависимости от вида и назначения бетона выступают зерна заполнителя, поры, воздухововлечения, ячеистые поры.

На масштабном уровне цементного микробетона роль матрицы играет цементирующее вещество, роль включений – непрореагировавшие зерна цемента.

Уровень цементирующего вещества представляется состоящим из матрицы (кристаллического сростка) и включений (пор цементирующего вещества). Кристаллический сросток можно рассматривать как композит особого типа, в котором неоднородность создается контактами кристаллов.

На уровне отдельного кристалла роль матрицы играют кристаллическая решетка из анионов и катионов, а роль включений (неоднородностей) – вакансии, замещения, дислокации, поверхностные трещины кристалла.

Включения в бетоне выполняют двоякую функцию. С одной стороны, как структурные элементы они выполняют структурообразующую функцию, с другой стороны, они являются своеобразными дефектами и при действии механических нагрузок становятся концентраторами напряжений. В силу гетерогенного строения бетонов концентрация напряжений в них носит локальный характер. Локальный, то есть местный, характер концентрации напряжений обуславливает объективное формирование неоднородного в объеме поля напряжений.



а)

б)

Рис. 2.9. Концентраторы напряжений на масштабном уровне пор в бетоне:
а - крупные кристаллы в стенках пор, являющиеся концентраторами напряжений;
б - трещины, зародившиеся на контуре поры в плоскостях спайности кристаллитов

Естественно предположить, что концентрация напряжений в материале проявляется вблизи включений на всех масштабных уровнях его структуры рис. 2.10. Величина напряжения, возникающего на каждом последующем уровне структуры материала, будет усиливаться от действия включений каждого предыдущего уровня структуры. Причем максимальные напряжения на каждом последующем уровне структуры будут создаваться в зонах максимальной концентрации напряжений каждого предыдущего уровня структуры. Результатом такого последовательного усиления будет являться то, что напряжение «ответственное» за процесс образования, развития трещины и разрушение материала, становится много больше средней величины макроскопического напряжения, определяемого в расчете на все рабочее сечение материала. Масштабные уровни структуры и усиление напряжений по масштабным уровням структуры бетонов условно показаны в табл. 2.3.

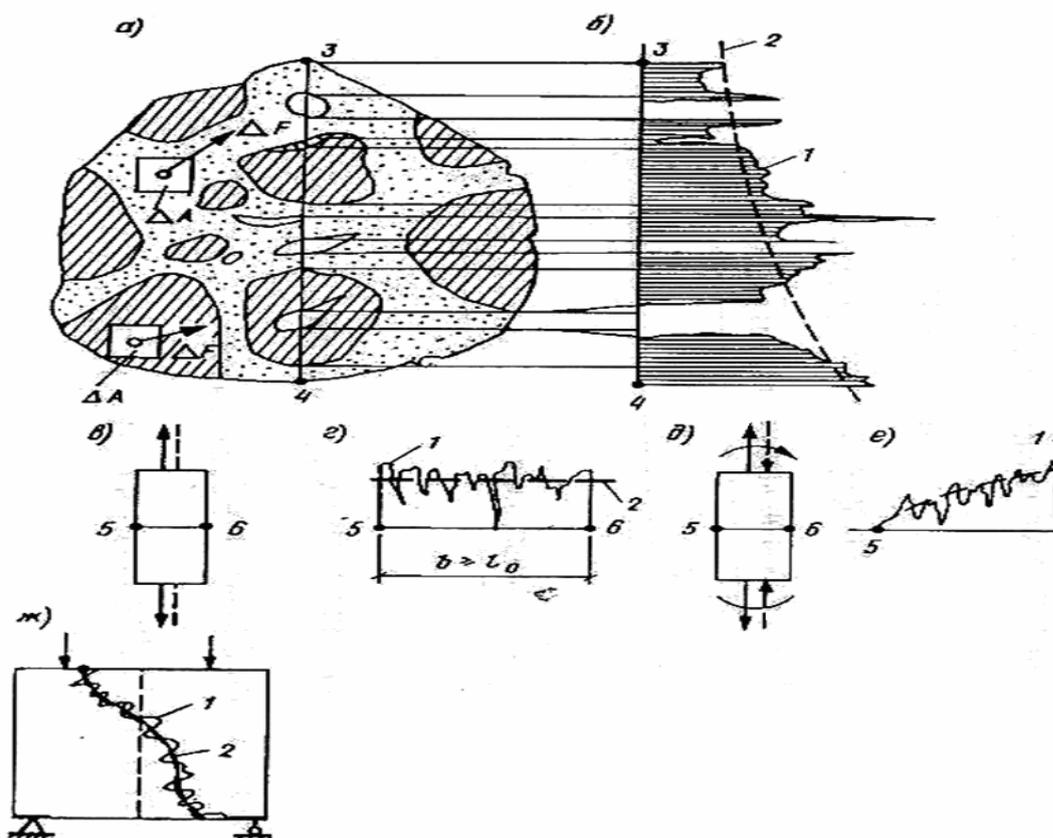


Рис. 2.10. Действительные (1) и сглаженные (2) эпюры напряжений (3-4, 5-6 – сечения)

Таким образом, напряженное состояние бетонов при механическом нагружении характеризуется концентрацией и локализацией напряжений на всех масштабных уровнях структуры и оценивается величиной среднего макроскопического напряжения σ_0 (интегральная характеристика) и максимального локального напряжения разрушения σ_{\max} .

Академиком Чернышовым Е.М. предлагается выделять 4 уровня трещинообразования строительных композиционных материалов.

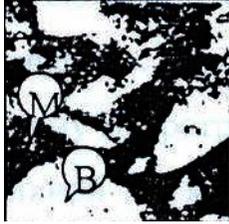
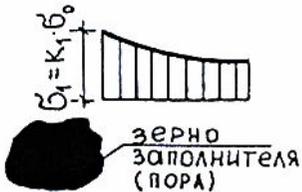
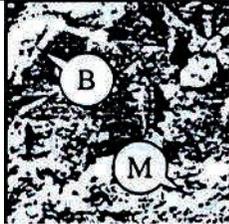
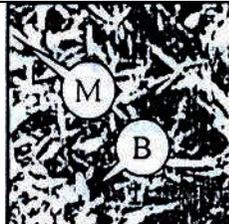
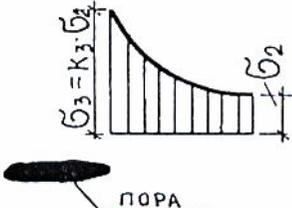
Макромасштабный уровень (уровень крупнозернистого бетона). В этом случае в качестве матрицы выступает мелкозернистый бетон, а в качестве блокирующих макротрещины армирующих элементов используется традиционная арматура, размещенная в соответствующей зоне строительной конструкции.

Мезомасштабный уровень (уровень мелкозернистого бетона). В качестве матрицы в этом случае выступает цементный микробетон с присущими ему трещинами размером 0,1...0,9 мм.

Микромасштабный уровень (уровень цементного микробетона) – матрицей в нем является цементирующее вещество с присущими ему микротрещинами размером 10...80 мкм.

Таблица 2.3

Структурные уровни композиционных материалов и формирование напряжений
(на примере мелкозернистого бетона)

Масштабный уровень	Наименование материала	Наименование и размер включений, м	Схема роста напряжений
Мелкозернистого бетона $(0,2-0,5) \times 10^1$	Плотный мелкозернистый бетон	 Зерна мелкого заполнителя $(2-4) \times (10^{-2}-10^{-4})$	 зерно заполнителя (пора)
Цементного микробетона $(2-5) \times 10^2$	Цементный микробетон	 Непрореагировавшие зерна цемента $(1-20) \times 10^{-5}$	 ОСТАТОЧНОЕ зерно цемента
Цементирующего вещества $(5-7) \times 10^3$	Цементирующее вещество микробетона	 Капиллярные поры $1 \times 10^{-8}-20 \times 10^{-6}$	 ПОРА

Субмикромасштабный уровень (уровень цементирующего вещества). Его матрица представлена скрытокристаллической и кристаллической морфологическими разностями новообразований. Система основных новообразований цементного камня характеризуется размером частиц 0,04...0,2 мкм и микропор 0,08...1 мкм, присутствующие зародышевые «технологические» субмикротрещины имеют порядок 0,1...2,0 мкм.

В соответствии с известными представлениями бетон рассматривают как гетерогенную систему с содержащимися в ней «врожденными дефектами», с явно выраженной неоднородной и неупорядоченной структурой, с нарушениями сплошности в виде неоднородного порового пространства и возможных трещин усадки.

Трещины в строительных композитах имеют разнообразную форму и размер, но вершины любых трещин одинаковы, поскольку располагаются на одном и том же уровне структуры композита (субмикромасштабном).

Энергетическим условием продвижения трещин в материале является превышение величины энергии, высвобождающейся при их образовании, над величиной энергии, необходимой для создания новой поверхности разрушения. Иными словами, условие трещиностойкости материала определяется соотношением его потенциала сопротивления разрушению и работы, затрачиваемой внешними силами для разрыва связей структуры материала. Работу раскрытия трещины, отнесенную к единице площади разрушения, можно определить как произведение перемещения берегов трещины на напряжение, которое производит это перемещение.

Очевидно, можно считать, что работа раскрытия трещины отнесенная к единице площади разрушения, то есть удельная работа разрушения, одинакова (при прочих равных условиях) для трещин различных размеров, трещин принадлежащих разным масштабным уровням структуры.

Величины перемещения берегов субмикро - и макротрещин значительно отличаются; отличаются и перемещения берегов одной и той же макротрещины в окрестностях вершины и на удалении от нее. Чем ближе берега трещины к вершине, тем меньше величина их перемещения. Из равенства удельных работ раскрытия трещины и неравенства величин перемещения берегов трещин следует вывод о том, что напряжения, вызывающие эти перемещения или соответствующие этим перемещениям, также различны.

В настоящее время изучение разрушения на разных масштабных уровнях только развивается, и разные исследователи приводят в литературе свои данные (табл. 2.4) несколько отличные от выше приведенной классификации.

Таблица 2.4

Классификация пор строительных материалов по размерам, используемая в различных работах	
Радиусы пор, м	
По Г.И.Горчакову	Капиллярные поры Контракционные поры Гелевые поры
По А.Е. Шейкину	Некапиллярные поры Макрокапилляры Переходные капилляры Микрокапилляры
По А.В. Волженскому	Пустоты Капиллярные макропоры Переходные поры Микропоры
По Ю.М.Бутту	Крупные поры Капиллярные макропоры Капиллярные макропоры Гелевые поры
По Т.Пауэрсу	Макропоры Поры между частицами геля Поры геля
По Р.Фельдману	Микропоры Адсорбционные поры Межслоевые
По А.В. Лыкову	Макрокапилляры Микрокапилляры
По М.М. Дубину	Крупные поры Переходные поры Микропоры

2.1.6. Торможение трещин в бетоне

Как уже указывалось, структуре бетона свойственны различные дефекты: трещины, поры, полости. Коэффициент концентрации напряжений для пор в упругом материале составляет 3-10. У острых, расположенных внутри хрупких материалов он может достичь 10^2-10^3 . В этом случае уже при довольно низких значениях средних растягивающих напряжений напряжения у кончиков трещин будут достигать предельных значений, вызывая практически мгновенное хрупкое разрушение, то есть трещины будут быстро достигать своей критической длины, при которой появляется тенденция к их неограниченному росту. Этим во многом объясняется низкая прочность бетона при растяжении. Однако при сжатии и комбинациях сжатия с растяжением бетон ведет себя как нелинейный материал. Да и при растяжении остаточная прочность превышает ту, которая следует при учете указанных высоких коэффициентов концентрации напряжений у дефектов.

Причины отсутствия хрупкого разрушения состоят в механизмах торможения внутренних трещин. В качестве факторов торможения выступают:

- зерна заполнителя (рис. 2.11, а...г);
- трещины иного направления и ветвления, поры;
- разрыхленные мелкими порами участки цементного камня и другие неоднородности структуры.

Поры «снимают» концентрацию напряжений с кончиков трещин, а зерна заполнителя, огибаясь трещинами, затрудняют их развитие, встречные же трещины направляют их по новым, менее опасным направлениям. При сжатии в месте зигзага трещины будет происходить зажатие берегов трещины (рис. 2.11, д).

С энергетической точки зрения торможение сводится к интенсивной диссипации энергии движения трещин. Торможение трещин приводит к пластическому характеру разрушений с развитием псевдопластических деформаций, которые, например в случае сжатия, могут быть весьма значительными. Фактор самоторможения трещин (рис. 2.11, б) нашел подтверждение в статистической теории прочности бетонов.

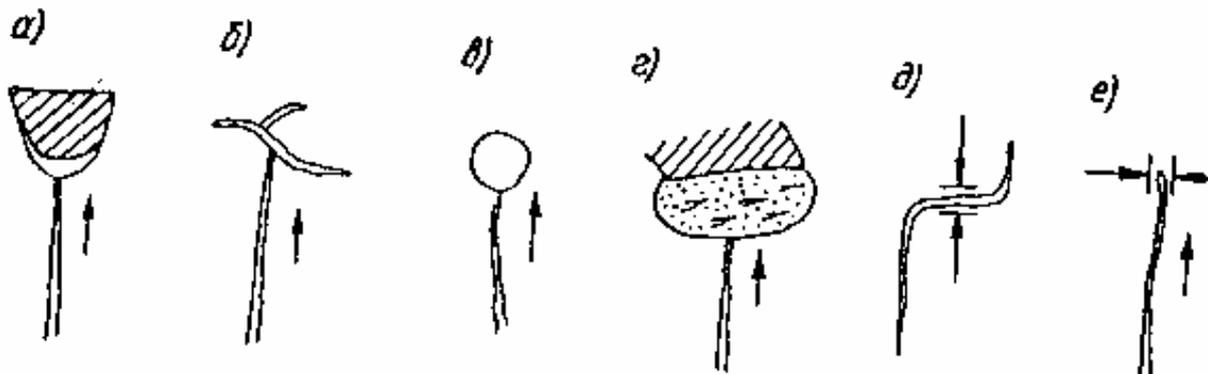


Рис.2.11. Механизмы торможения трещин в бетоне

Таким образом, неоднородная структура материала, с одной стороны, является причиной возникновения внутренних трещин, а с другой – фактором, препятствующим их развитию. Важно только, чтобы второй фактор в значительной степени преобладал над первым.

Существенное тормозящее влияние на трещины оказывает и неоднородное напряженное состояние. При этом может срабатывать некоторый эффект зажатия кончиков трещин (рис. 2.11, е). Характер развития трещин может зависеть от программы нагружения и других факторов.

2.1.7. Механизмы разрушения структуры бетона

Разрушение бетона начинается с разрушения отдельных элементов его структуры, а затем уже выливается в разрушение более крупных объемов. Можно выделить два исходных механизма разрушения:

- отрывной механизм разрушения (рис. 2.12, а, б – по 1 – трещинам отрыва одной части элемента от другой; 3 – зерна заполнителя);
- сдвиговый механизм разрушения (рис 2.12, в, г - по 2 – трещинам сдвига одной части элемента относительно другой).

Отрыв и сдвиг могут происходить с разрывом зерен заполнителя. Внутризерновые и межзерновые механизмы являются основными в современной статистической теории прочности бетона. Однако под зернами в этом механизме понимают не зерна крупного заполнителя, а некоторые ячейки в структуре бетона, окруженные дефектами, которые могут и не содержать зерен крупного заполнителя. В чистом виде отрывной механизм разрушения реализуется при растяжении, при этом отдельные трещины отрыва, объединяясь в одну, образуют магистральную трещину разрушения.

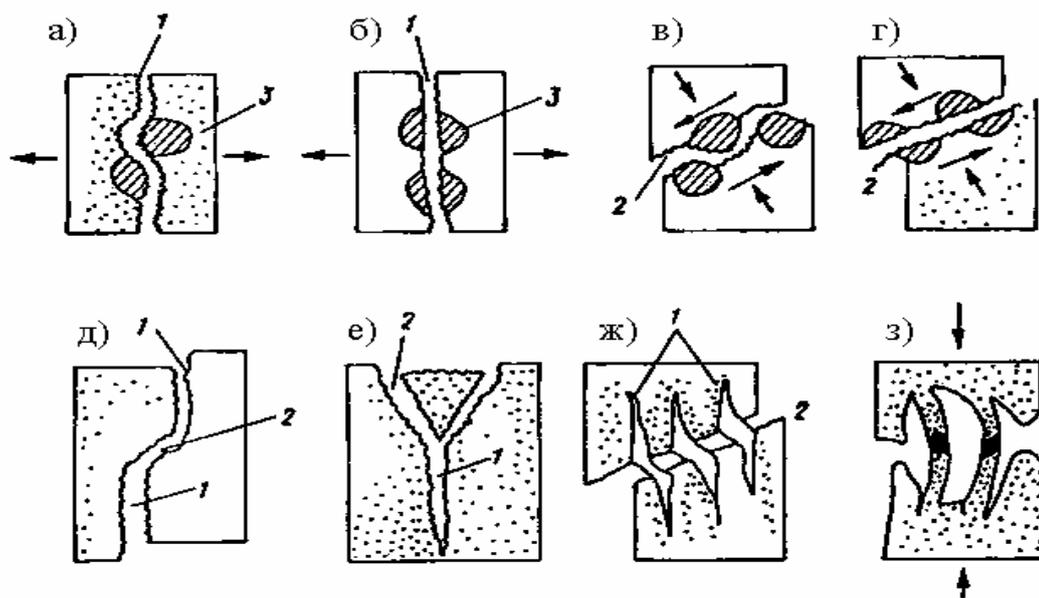


Рис. 2.12. Механизмы разрушения структуры бетона

Чисто сдвиговой механизм разрушения встречается редко, в основном при высоких уровнях трехосного сжатия. В остальных случаях преобладают различные смешанные отрывно-сдвиговые механизмы разрушения в виде:

- зигзаг - трещины (рис. 2.12, д);
- ветвления зигзаг - трещины с включениями клиновидных элементов (рис. 2.12, е);
- часто расположенных трещин отрыва, пересекаемых трещиной сдвига (рис. 2.12, ж).

Тонкие части бетона между трещинами могут разрушаться от потери устойчивости (рис. 2.12, з). Возможны и другие механизмы. Магистральная трещина может включать на своем пути различные локальные механизмы разрушения. Обычно чем сложнее и разнообразнее механизм разрушения, тем большими деформациями это разрушение сопровождается. Такие механизмы свойственны сжатию. Процесс разрушения бетона, таким образом, представляется как процесс прогрессирующего разрушения сплошности.

2.2. Влияние кратковременных перегрузок на долговечность конструкций

Сокращение ресурса при перегрузочном испытании. Иногда правила эксплуатации или разработанная программа исследований предусматривают обязательное проведение перегрузочных испытаний на прочность некоторых конструкций пробной нагрузкой. Однако очевидно, что если нагруженный материал со временем «стареет» и теряет свой ресурс, то увеличение нагрузки должно ускорить деградацию и разрушение элементов конструкций и их соединений. С позиций кинетической теории количественной мерой деградации материала под нагрузкой является скорость накопления трещин. Процесс трещинообразования идет при любых действующих напряжениях со скоростью, растущей экспоненциально. Отсюда следует, что перегрузочные испытания ускоряют трещинообразование по сравнению с его естественным темпом при рабочем напряжении и тем самым сокращают ресурс материала конструкции. Сокращение ресурса прямо пропорционально времени действия перегрузки. Теоретически возможно, что перегрузочные испытания могут быть не только разрушающим фактором. После изготовления конструкции перегрузочные испытания способны ускорить релаксацию остаточных напряжений и тем самым привести к увеличению прочности и долговечности. Для этого скорость пластического деформирования должна быть больше скорости трещинообразования. Однако такая ситуация не является универсальной, и ее реализация требует конкретного анализа с учетом кинетических аспектов пластического деформирования и разрушения.

Преждевременное разрушение корродирующего материала при перегрузочном испытании. Выше рассмотрен случай, когда деградация материала под действием нагрузки осуществляется при постоянном запасе прочности. Важнейшим фактором деградации материала является коррозионное воздействие окружающей агрессивной среды, в результате которого запас прочности корродирующего нагруженного материала с течением времени уменьшается. Наиболее опасны формы неравномерной коррозии (язвы, питтинги и коррозионное растрескивание), приводящие к возникновению концентраторов напряжения и локальному снижению запаса прочности.

Таким образом, перегрузочные испытания могут привести к преждевременному разрушению конструкции.

Информативность перегрузочного испытания. Отсутствие разрушения конструкции при перегрузочном испытании может рассматриваться как свидетельство достаточно высоких значений прочности и долговечности конструкции. Но перегрузочные испытания не гарантируют запаса прочности и сколько-нибудь длительной долговечности в дальнейшем. Поэтому в настоящее время разработчики большинства действующих рекомендаций по испытанию отказываются от проведения перегрузочных испытаний.

2.3. Методика визуального и инструментального поиска зон активного разрушения в конструкциях. Методы акустической эмиссии

Для получения объективной и исчерпывающей информации о физико-механических свойствах материалов и самих конструкций эксплуатируемых зданий необходимо располагать комплексом методов, позволяющих получить результаты испытаний конструкций в любом месте и, что особенно важно, в условиях заселенности зданий.

В настоящее время при обследовании зданий используют как визуальные методы с применением специальных инструментов и приспособлений, так и неразрушающие методы, позволяющие с достаточной степенью точности определить физико-механические свойства материалов конструкций без их разрушения.

Установлено, что с помощью неразрушающих методов можно получать объективные сведения:

- об основных характеристиках оснований фундаментов;
- о прочностных характеристиках материалов строения;
- об однородности конструкций;
- об упругих характеристиках материалов;
- о дефектности конструкций (наличии и зонах распространения видимых и скрытых дефектов);
- о плотности и влажности материала;
- о наличии и размерах сечения металлических деталей (в том числе арматуры) в каменных и бетонных конструкциях.

Визуальные методы. Визуальный метод оценки состояния конструкции до настоящего времени преобладает в практике обследования. При визуальном осмотре здания технический эксперт выявляет видимые дефекты основных конструктивных элементов: отклонения от геометрических размеров, изменения очертаний, изменения фактуры и цвета рассматриваемых конструкций, наличие и расположение трещин.

Для наблюдения за раскрытием трещины в стенах устанавливают маяки. На маяке указывают дату его установки, номер и сведения об организации, которая установила маяк. Схема расположения маяков наносится на развертку стен, а время осмотра и обнаруженные деформации записываются в специальном журнале.

Обследование перекрытий при визуальном методе требует вскрытия отдельных мест, особенно там, где замечены зыбкость пола и наличие трещин на поверхности потолков.

Неразрушающие методы. В последние годы при обследовании эксплуатируемых зданий нашли широкое применение так называемые неразрушающие методы. Особая их ценность заключается в том, что необходимые измерения производятся с помощью различных приборов и приспособлений без всякого снижения прочности конструкций и без нарушения отделки помещений.

При обследовании зданий наряду с визуальным методом находят все большее применение инструментальные неразрушающие методы. Методы контроля материалов и изделий, которые рекомендуются современной наукой, разделяются на активные и пассивные:

- контроль с помощью проникающих излучений (рентгеновских, изотопных, бетатронных);
- радиотехнические методы (радиоволновые, радиоспектроскопические, телевизионные);
- капиллярные методы (диффузионно-сорбционные, люминесцентные).

Техническую диагностику дефектов и повреждений конструкций проводят, исследуя их геометрические параметры, причины образования и динамику развития, анализируя химический состав продуктов деградации.

Скрытые дефекты и повреждения внутри объема материала исследуемой конструкции определяют с использованием неразрушающих методов (рентгеновских, ультразвуковых, акустической эмиссии и т.п.).

Размеры дефектов и повреждений, выходящих на поверхность конструкции (трещины, погниби) или образовавшихся в результате коррозионных, биологических или огневых воздействий (мацерация), определяют инструментальными методами.

Акустическая эмиссия. С явлением акустической эмиссии (АЭ) человек знаком с древнейших времен. Это явление проявляется как хорошо слышимый треск при ломке дерева, кости и других материалов. При обжиге глиняной по-

суды гончары на слух определяли растрескивание изделий при слишком быстром их охлаждении.

С древнейших времен известна АЭ и в металлах. Это так называемый «крик олова» — слышимая эмиссия в виде хруста и щелчков, вызываемая механическим двойникованием чистого олова при его пластическом деформировании. Акустическая эмиссия является пассивным методом неразрушающего контроля, при котором развитие дефектов в материале сопровождается генерацией акустического сигнала. Роль приемника сигнала играет электроакустический преобразователь, изготовленный, как правило, из пьезокерамики. Он преобразует механические колебания поверхности, вызванные явлением АЭ, в электрические сигналы. Далее электрический сигнал АЭ усиливается, фильтруется и обрабатывается специальными устройствами с целью выделения параметров, позволяющих судить о состоянии и дальнейшем поведении материала или конструкций в процессе нагружения.

Акустической эмиссией сопровождаются практически все физические процессы, протекающие в нагруженных материалах: мартенситные превращения, движение дислокаций, двойникование кристаллической решетки, разрушение зерен путем сдвига, трение по границам зерен, образование микротрещин, движение трещин, коррозионное растрескивание.

В композиционных материалах, представляющих собой скорее конструкцию, чем материал в традиционном понимании, излучение АЭ вызвано разрушением волокон, нарушением адгезионной связи матрицы с волокнами, растрескиванием матрицы, трением между волокнами и матрицей.

Источники АЭ и основные информативные параметры. Излучение сигналов АЭ материала может быть обусловлено различными процессами, протекающими в нагруженном материале: движением скоплений дислокаций, двойникованием, фазовыми превращениями, образованием трещин.

При деформировании таких гетерогенных материалов, как композиты или бетон, АЭ имеет более сложный характер, чем в случае однофазных материалов. Волокнистые композиционные материалы разрушаются хрупко и нехрупко. Их разрушение может сопровождаться различными микромеханическими процессами - микрорастрескиванием матрицы, ее отслаиванием, разрывом волокон. Каждый из этих процессов вносит свой вклад в спектры сигналов АЭ.

В зоне дефектов, представляющих собой концентраторы напряжений, повышается уровень механических напряжений. Поэтому материал, например, вблизи вершины трещины находится в более напряженном состоянии, чем вдали от нее, и излучение сигналов АЭ из этой области происходит весьма интенсивно.

Важнейшим эффектом, проявляющимся при исследованиях с использованием метода АЭ, является эффект Кайзера, который представляет собой отсутствие АЭ в материале до тех пор, пока не превышен уровень предыдущего воздействия. Эффект Кайзера фактически связан с невозпроизводимостью или

с существенным снижением уровня АЭ при повторном нагружении до нагрузок, меньших максимальных нагрузок в предыдущих циклах нагружения. Эффект Кайзера не проявляется при наличии развивающегося дефекта, поскольку локальные напряжения высокого уровня вблизи развивающегося дефекта (превосходящие по своей величине средние напряжения в деформированном объеме) возникают в новых областях, что вызывает излучение сигналов АЭ.

На основе эффекта Кайзера построено множество методических приемов, направленных на выделение сигналов АЭ из определенной области нагружаемого объекта, получение образа какого-либо конкретного источника АЭ и т. п.

На рис. 2.13 показаны форма сигнала АЭ и некоторые его характеристики, используемые при анализе; - число превышений порога, максимальная амплитуда сигнала, длительность импульса и время его нарастания.

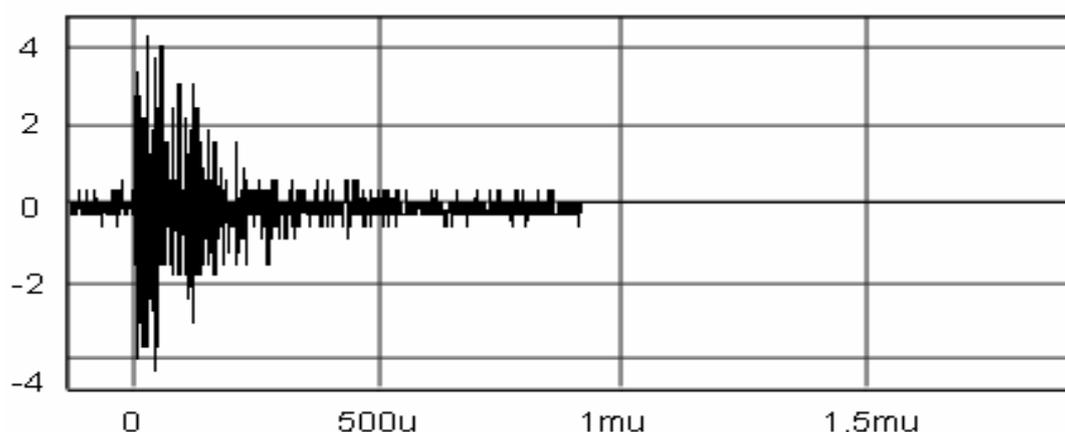


Рис. 2.13. Форма сигнала акустической эмиссии при образовании трещины в сжатом бетоне (опыты Ушакова С.И.)

Как видно из рис.2.13, импульс АЭ представляет собой радиоимпульс сложной формы с высокочастотным заполнением, называемым осцилляциями.

В случае, когда акустическая эмиссия имеет вид различных отдельных импульсов, говорят о дискретной АЭ, а если сигналы представляют непрерывное волновое поле или регистрируются как непрерывный сигнал, то имеет место непрерывная АЭ. Число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за интервал времени наблюдения называется числом импульсов АЭ. Число зарегистрированных импульсов за единицу времени называется активностью АЭ.

В случаях, когда нельзя говорить только об импульсах дискретной АЭ, регистрируют число превышений импульсами установленного уровня дискриминации (ограничения). Число зарегистрированных превышений импульсами установленного уровня дискриминации времени наблюдения называется суммарным счетом АЭ. Отношение суммарного счета к интервалу времени наблюдения называется скоростью счета.

Перечисленные выше параметры сигналов АЭ наряду с амплитудой сигналов являются наиболее распространенными. Как правило, они регистрируются и в тех случаях, когда в качестве основного информативного параметра выбрана какая-либо иная характеристика сигналов. Используются эти параметры и как основа для получения ряда вторичных параметров, например произведения амплитуды и скорости счета или квадрата амплитуды сигналов (энергии).

Получили распространение амплитудные спектры сигналов, представляющие собой гистограммы распределений амплитуд импульсов, зарегистрированных в течение эксперимента. В некоторых случаях время наблюдения разбивают на отрезки и строят гистограммы, соответствующие каждому временному отрезку.

Наиболее информативными, но и наиболее сложными для измерения являются параметры, характеризующие форму сигналов АЭ. Наиболее полную информацию о форме сигналов дает его амплитудно-частотный спектр. Достаточно просто измерять спектр стационарного сигнала, соотношение частотных составляющих которого стабильно и не изменяется с течением времени. В то же время измерения спектральных составляющих широкополосного нестационарного случайного быстро изменяющегося процесса, каковым являются сигналы АЭ, представляют собой сложную и дорогостоящую задачу. При обработке полученных результатов измерений приходится анализировать большой объем информации. Этим объясняется то, что измерение амплитудно-частотных спектров сигналов встречается относительно редко. Чаще всего применяется частичный анализ формы сигналов, например, определяют соотношение уровней сигналов в двух-трех частотных диапазонах или выполняют измерение длительности и времени нарастания импульсов.

Одной из основных трудностей, с которыми связано применение метода АЭ, является низкий уровень измеряемых сигналов. Поэтому аппаратура для измерения и регистрации параметров сигналов выполняется тщательно защищенной от наводок и помех. В то же время характеристики сигналов АЭ сильно зависят от свойств материала, окружающей среды и технологических факторов. Факторы, *увеличивающие* амплитуду сигналов: высокая прочность материала, анизотропия механических свойств, высокая скорость деформирования, неоднородность материала, разрушение с расслоением, повышенная дефектность, распространение трещин, большие размеры зерен. Факторы, *снижающие* амплитуду сигналов: низкая прочность материала, изотропность структуры, низкая скорость деформирования, однородность материала, малая толщина образца, отсутствие склонности к двойникованию. Деформация сдвига, высокая температура, бездефектность, пластическое деформирование, структура, формирующаяся при обработке металлов давлением, малые размеры зерен также влияют на снижение амплитуды сигналов. Отметим, что результаты ряда исследований не подтверждают однозначного влияния на амплитуду сигналов таких факторов, как размеры зерен и температура испытаний. Наиболее часто используемыми параметрами АЭ являются энергия акустического сигнала, сред-

нее значение постоянной составляющей амплитуды, скорость счета, суммарный счет, амплитудные и амплитудно-частотные спектры. Пользуясь методом АЭ, можно обнаруживать скрытые очаги разрушения, определяя их координаты по времени прихода сигналов от образующихся микротрещин на разные датчики во время испытания конструкции. Для определения координат источника сигналов АЭ (триангуляции) используется многоканальная аппаратура. Эти импульсы поступают на специальное устройство, измеряющее разности времен прихода сигналов АЭ к каждому датчику. Информация о временах прихода импульсов вводится в вычислительное устройство, которое рассчитывает координаты источника сигналов АЭ.

2.4. Развитие деформаций конструкций с течением времени

Ползучесть материалов. При расчетах сооружений часто принимается допущение об идеальной упругости материала, которое при одноосном напряженно-деформируемом состоянии выражается законом Гука:

$$\varepsilon = \delta / E. \quad (2.6)$$

Представление об идеальной упругости материала, положенное в основу классической теории упругости и строительной механики, для многих материалов достаточно хорошо отвечает опытам при кратковременных нагружениях и не очень высоком уровне напряжений. Однако при длительном действии нагрузки даже относительно невысокого уровня многие материалы, а также основания сооружений обнаруживают способность деформироваться во времени при постоянных напряжениях (ползучесть) или изменять уровень напряжений при заданной постоянной деформации (релаксация). Отмеченное свойство приводит к тому, что в конструкциях даже при постоянных нагрузках происходит изменение во времени деформаций и (или) напряжений, которое может оказаться весьма существенным. Эти эффекты не могут быть учтены законом Гука.

Явление ползучести присуще таким материалам, как бетон, кирпич, древесина, полимеры, естественный камень, грунты и т. п.

Металлы также обнаруживают свойство деформирования во времени, которое становится особенно заметным при повышенной температуре, а в цветных металлах (свинце, меди и т. п.) даже при комнатной температуре.

Фактор ползучести имеет существенное значение для работы конструкций. Достаточно отметить, что напряжение в арматуре железобетонных конструкций за счет явления ползучести бетона может увеличиться в 2...2,5 раза, а перемещения - в 3...4 раза.

Механизм ползучести. Опыты по изучению ползучести показали, что она наблюдается при любых напряжениях, даже таких, которые и при кратковременном действии нагрузки вызывают только упругие деформации. Резуль-

таты испытаний представляют в виде кривых ползучести, т.е. кривых зависимости деформаций от времени (рис. 2.14).

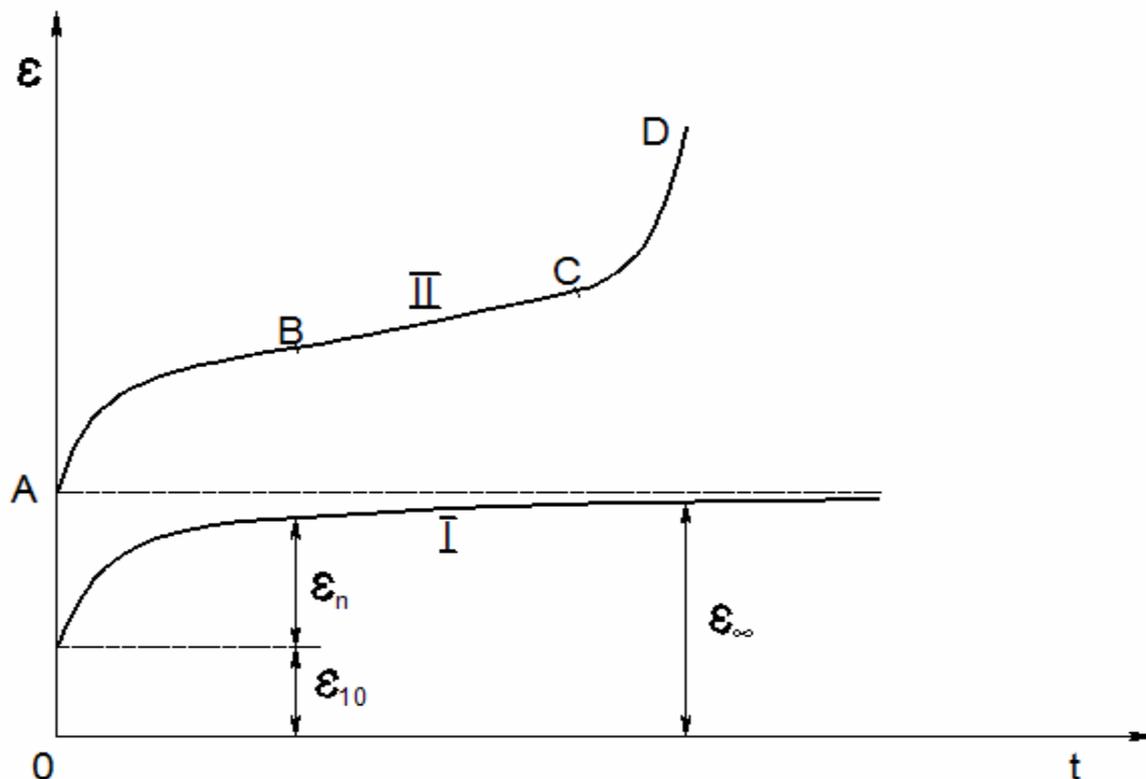


Рис. 2.14. Характерные кривые ползучести материала

В начальный момент времени деформации имеют значение $\epsilon(0)$, равное упругой деформации или сумме упругой и пластической деформаций. Обычно считается, что время нагружения (или разгрузки) образца пренебрежимо мало по сравнению с временем проведения эксперимента, в связи с чем можно предположить, что напряжение и деформация $\epsilon(0)$ проявляются мгновенно.

С увеличением времени t наблюдается возрастание деформаций, характер которых определяется скоростью ползучести. Процесс деформирования сопровождается уменьшением скорости $\dot{\epsilon}$ и асимптотическим стремлением её к нулю.

Полная деформация образца, определяемая суммой начальной деформации $\epsilon(0)$ и деформации ползучести ϵ_n (т.е. $\epsilon = \epsilon(0) + \epsilon_n$), стремится к предельному значению ϵ_∞ .

На кривой ползучести (рис. 2.14) можно выделить три участка: AB , BC , CD . Участок AB характеризуется уменьшением скорости деформирования и соответствует фазе неустановившейся ползучести. По окончании её скорость $\dot{\epsilon}$ принимает минимальное значение: наступает фаза установившейся ползучести, когда скорость $\dot{\epsilon}$ постоянна (участок BC). С увеличением напряжения δ продолжительность периода установившейся ползучести сокращается.

Испытание заканчивается либо хрупким разрушением образца в момент времени, соответствующий точке С, либо вязким разрушением, которое происходит с образованием шейки. В последнем случае появляется участок CD. Аналогичными приведенным зависимостям оказываются кривые ползучести при сдвиге или кручении.

Если увеличение деформаций ползучести пропорционально увеличению напряжений, то говорят о линейной ползучести, в противном случае - о нелинейной ползучести.

Температура нагрева оказывает значительное влияние на поведение образца во времени. С её повышением наблюдается увеличение скорости ползучести, и та же самая деформация при одном и том же напряжении достигается за меньший промежуток времени.

На ползучесть различных материалов оказывают влияние и другие факторы, кроме перечисленных. Например, на ползучесть бетона влияют водоцементное отношение, вид цемента, масштабный фактор, влажность бетона, характер заполнителя и т.д.

В некоторых случаях наблюдается изменение механических свойств материала во времени при неизменных внешних условиях и при отсутствии внешних нагрузок. В бетоне изменение свойств обусловлено длительными химическими процессами, происходящими в цементном камне. Это приводит к тому, что через более или менее продолжительный промежуток времени материалы не могут быть использованы как конструктивные. Явление изменения механических свойств с течением времени называется старением.

Оказывается, что деформация ползучести при старении зависит не только от продолжительности действия нагрузки, но и от момента её приложения, другими словами, от возраста материала, в котором было произведено нагружение.

В частном случае линейной ползучести деформация ϵ_{∞} может быть равна нулю, т.е. при неограниченном увеличении времени образец полностью восстанавливает свои первоначальные размеры. Это свойство материала называется упругим последствием. Если же после некоторого перерыва вновь загрузить образец первоначальной нагрузкой, то вначале скорость деформации будет несколько большей, чем до перерыва, а затем скорость деформации и сама деформация станут равными тем, которые были при отсутствии перерыва (рис. 2.15). Однако бывают случаи, когда деформация оказывается большей, чем при отсутствии перерыва.

При рассмотрении ползучести материалов постоянной считалась внешняя нагрузка, исследовалось изменение деформаций во времени. Напряжения в начальный момент времени принимают значение δ_0 , которое определяется упругими или упругопластическими свойствами материала. Эксперименты показывают, что с увеличением времени происходит снижение этих напряжений.

Явление медленного уменьшения напряжений в образце при постоянной деформации называется релаксацией. В металлических образцах при высоких температурах напряжение часто убывает до нуля.

Различают затухающую, незатухающую и нарастающую ползучести. Рассмотрим эти виды ползучести на примере ползучести полимера. Механизм ползучести полимера, находящегося в высокоэластическом состоянии, представляется следующим образом. В результате соударений сегментов соседних молекул все время происходят случайные их перескоки в новые положения во всех направлениях, если нет внешнего нагружения.

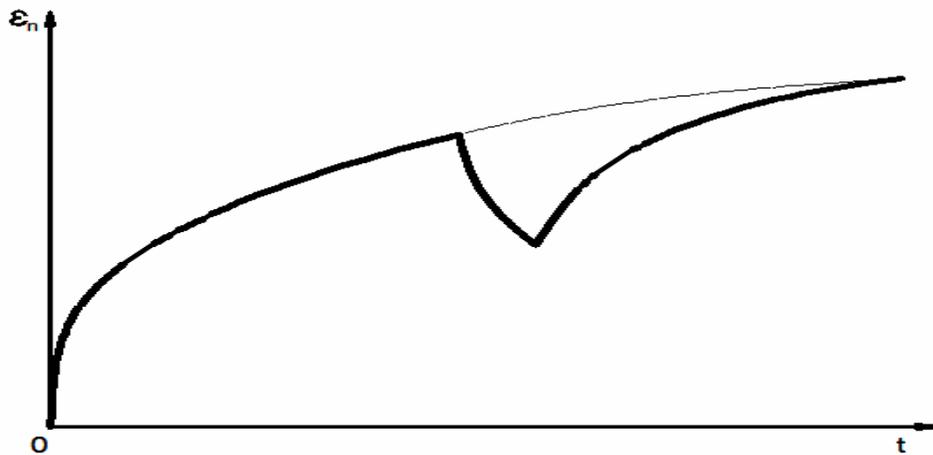


Рис. 2.15. Зависимость деформации ползучести от времени при перерыве в нагружении

С приложением нагрузки перескоки, оставаясь случайными, получают направленность. Выделим из цепной молекулы полимера три соседних сегмента а, b, с и приложим к ним силу N (рис. 2.16).

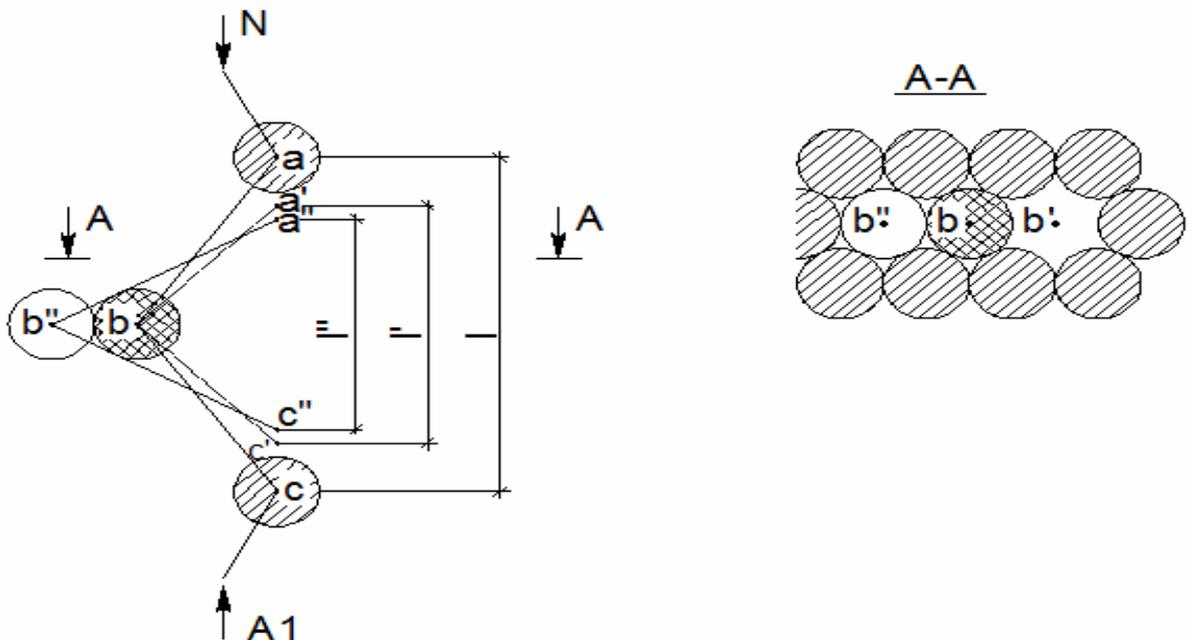


Рис. 2.16. Механизм затухающей ползучести высокоэластического полимера

При этом укоротятся связи между сегментами и уменьшится угол между связями, а крайние сегменты перейдут в положение a' , c' , причем возникнет упругая деформация ϵ_0 , равная $\epsilon_0 = l - l'$.

Если бы не было нагрузки, то вероятность перескока сегмента в положение b' или b'' была бы одинаковой, сейчас же она возможна только в направлении b'' , что с течением времени и совершается. В результате сегмент примет новую форму $a'' b'' c''$ и образуется деформация ϵ_3 , равная $\epsilon_3 = l' - l''$. Эта деформация и называется высокоэластической. Процесс высокоэластического деформирования будет происходить по всему объему до тех пор, пока все сегменты не займут нового равновесного положения. Из этой схемы видно, что процесс деформирования имеет затухающий характер, поскольку возможно перемещение только отдельных сегментов, а деформация образуется за счет изменения формы молекулы, но не за счет ее перемещения в целом.

Описанный вид ползучести называют затухающим или прекращающимся, получающаяся высокоэластическая деформация называется деформацией формы (конфигурационной) или деформацией запаздывающей упругости. Графически она изображается кривой a . При снятии нагрузки наблюдается обратная ползучесть, деформация возвращается, но, как правило, не полностью (рис. 2.17).

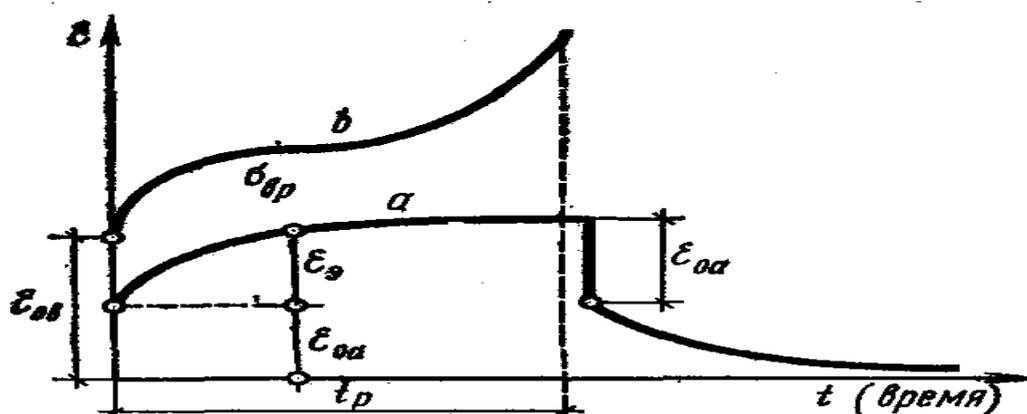


Рис. 2.17. Кривые затухающей и нарастающей ползучести

Если на какой-то момент времени высокоэластическая деформация и переданное на сегмент усилие превзойдут возможности внутримолекулярных связей, то произойдет разрыв сегмента. Далее деформация будет возрастать за счет разрушения самих молекул, и процесс из затухающего перейдет в нарастающий, т.к. усилия с разрушившихся молекул будут передаваться на другие, вовлекая их в процесс разрушения. Ползучесть же из затухающей перейдет в нарастающую и будет изображаться кривой b . Деформацию разрушения называют также пластической. Наибольшее значение напряжения, находясь под которым материал перестает в конечном счете деформироваться, как долго бы нагрузка не действовала, называют длительной прочностью $\sigma_{дл}$.

Ползучесть проявляется и при воздействии переменных нагрузок. Общеизвестно, что при обычном непрерывном нагружении до разрушения прочность оказывается тем большей, чем быстрее прикладывается нагрузка. На рис. 2.18 показана зависимость прочности фуфуролацетонового полимербетона от скорости статического нагружения. При скоростях, близких к 15 МПа/с, прочность имеет тенденцию к стабилизации, такое состояние называют пределом прочности. С довольно высокой степенью точности можно считать, что при таких скоростях нагружения развиваются только упругие деформации.

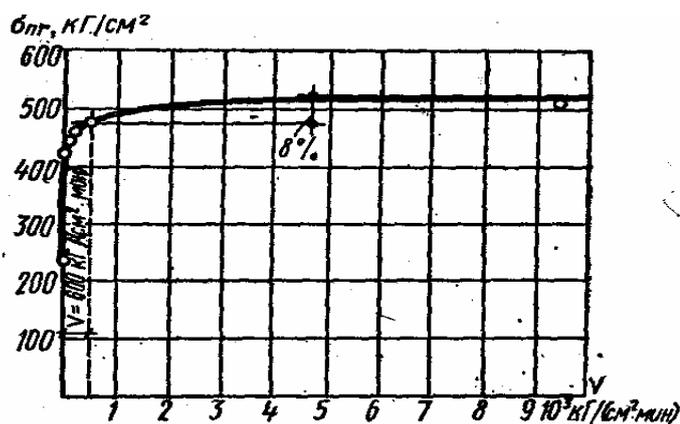


Рис. 2.18. Зависимость прочности от скорости нагружения

Отношение длительной прочности к ее пределу называют коэффициентом длительности. Временную прочность получают, обычно фиксируя напряжение, превышающее длительную прочность. Время, прошедшее с начала нагружения до разрушения (см. рис. 2.17, кривая b), называют при этом периодом разрушения t_p . Кривую, показывающую зависимость временной прочности от периода разрушения, называют кривой длительного сопротивления (рис 2.19), а отношение временной прочности $\sigma_{дс}$ к пределу прочности называют коэффициентом длительного сопротивления $K_{дс}$:

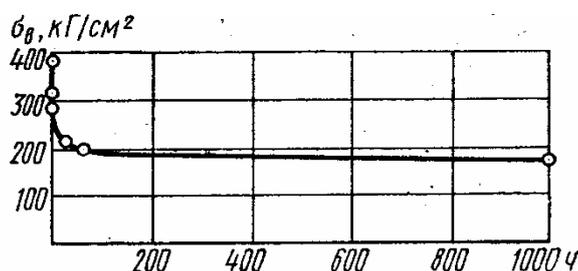


Рис. 2.19. Кривая длительного сопротивления

Кривая коэффициента длительного сопротивления имеет тот же вид, отличаясь только масштабом:

$$K_{дс} = \sigma_{дс} / \sigma_{пч} .$$

Коэффициент длительного сопротивления изменяется от единицы до значения коэффициента длительности.

Наряду с конструктивными полимерами, обладающими затухающей ползучестью, имеются полимеры, ползучесть у которых развивается беспредельно при сколько угодно малых нагрузках. Это вязкие полимеры. Механизм их деформирования следующий. Взаимодействие между двумя молекулами одного полимера настолько мало, что они могут свободно перемещаться относительно друг друга. При быстром приложении нагрузки возникают, как обычно, упругие деформации ϵ_0 . Затем развиваются деформации конфигурационные при одновременном относительном смещении молекул, дающем вязкую необратимую деформацию, иначе называемую деформацией истинного течения. Она обычно развивается медленнее и подчиняется линейному закону. В результате получаем кривую установившейся ползучести ab (рис.2.20). Если провести прямую ac , параллельную линейному участку кривой ползучести, и прямую ad , параллельную оси абсцисс (времени), то, взяв произвольно некоторую точку A и опустив из нее перпендикуляр на ось абсцисс, получим разделение полной деформации, имеющейся на этот момент времени, на три части – упругую ϵ_0 , вязкую ϵ_B и высокоэластическую $\epsilon_Э$:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_B + \epsilon_Э.$$

Первая остается постоянной, вторая развивается во времени линейно, третья затухает, т. е. стремится к некоторому пределу, но затухание высокоэластической деформации возможно при ограниченном значении нагрузки. Если она будет чрезмерна, то с течением времени, как и при затухающей ползучести, в результате перераспределения усилий может получиться разрыв самой молекулы, который, распространяясь постепенно на остальные, приведет к разрушению (кривая ef , рис. 2.20).

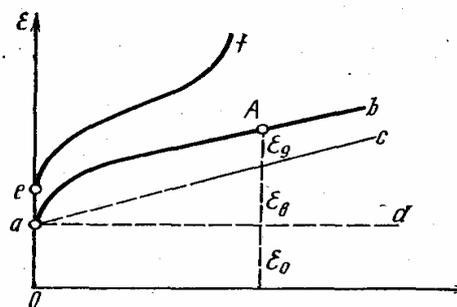


Рис. 2.20. Кривая установившейся ползучести

Существует такое максимальное значение деформации, превышение которой ведет к разрушению и при установившейся ползучести. Эту дефор-

мацию называют предельной длительной. Она складывается из упругой начальной деформации и высокоэластической, развивающейся во времени. Развитие во времени вязкой деформации ведет только к теоретически бесконечному нарастанию полной деформации, если напряжение, соответствующее предельной длительной деформации, не превзойдено.

Максимальное значение напряжения, при котором разрушение материала не наступает, как долго бы нагрузка ни действовала, а увеличивается неограниченно только деформация, называют предельно длительным.

Ползучесть цементного бетона. Деформации ползучести могут в 3...4 раза превышать упругие деформации. При длительном действии постоянной нагрузки, если деформации ползучести нарастают свободно, напряжения в бетоне остаются постоянными. Когда же связи в бетоне (например, стальная арматура) ограничивают свободное развитие ползучести (стесненная ползучесть), напряжения в бетоне уменьшаются. Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при твердении цементного камня. Под нагрузкой происходит перераспределение напряжений с испытывающей вязкое течение гелевой структурной составляющей на кристаллический сросток и зерна заполнителей. Одновременно развитию деформаций ползучести способствуют капиллярные явления, связанные с перемещением в микропорах и капиллярах избыточной воды под нагрузкой. С течением времени процесс перераспределения напряжений затухает, и деформирование прекращается.

Опыты с бетонными призмами показывают, что независимо от того, с какой скоростью нагружения было получено напряжение, конечные деформации ползучести, соответствующие этому напряжению, будут одинаковыми. С ростом напряжений ползучесть бетона увеличивается. Загруженный в раннем возрасте бетон обладает большей ползучестью, чем старый бетон. Ползучесть бетона в сухой среде значительно больше, чем во влажной. Технологические факторы также влияют на ползучесть бетона: с увеличением водоцементного отношения и количества цемента на единицу объема бетонной смеси ползучесть возрастает; а с повышением прочности зерен заполнителей, повышением прочности бетона и его класса ползучесть уменьшается. Бетоны на пористых заполнителях обладают несколько большей ползучестью, чем тяжелые бетоны.

На рис.2.21 приведены кривые ползучести для бетона, полученные при нагружении образцов напряжением, равным 0,1 МПа соответственно через 7, 14, 28 и 90 суток после их изготовления. Из этих графиков видно, что начальные (упругие) деформации также зависят от возраста материала t_0 , при котором производилось приложение нагрузки.

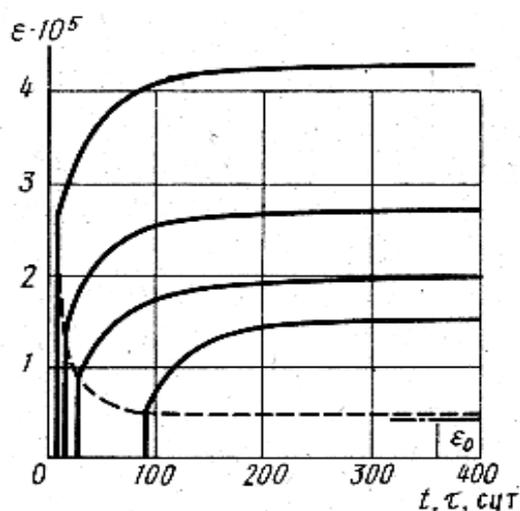


Рис. 2.21. Кривые ползучести бетона разных сроков твердения

Пунктирной линией показано изменение указанных деформаций в зависимости от времени t_0 . Как видно, при увеличении t_0 значения начальной деформации стремятся к константе ϵ_0 .

Ползучесть древесины. На прочность древесины благодаря ее реологическим свойствам значительно влияет скорость приложения нагрузки или продолжительность ее действия. Примером на практике может служить провисание балок, находящихся долгое время под действием эксплуатационной нагрузки. При напряжениях $\sigma < \sigma_{дл}$ деформации с течением времени затухают, а при $\sigma > \sigma_{дл}$ после некоторого уменьшения скорости деформаций наступает развитие деформаций с постоянной скоростью. Далее начинается ускоренный рост деформаций, приводящий к разрушению материала.

Древесина обладает свойством последействия (ползучести). Длительное сопротивление является показателем действительной прочности древесины в отличие от предела прочности. Переход от предела прочности к длительному сопротивлению осуществляется умножением предела прочности на коэффициент длительного сопротивления, который принят в нормах равным 0,66.

2.5. Старение материалов

Последний этап долговечности – старение – самый типичный процесс эксплуатационного периода. Он может начаться с первого же этапа эксплуатации конструкции, но может следовать также за упрочнением и стабилизацией структуры. Этот этап характеризуется нарушением структуры с возможной потерей ее сплошности, постепенным накоплением разрывов межатомных связей. Разрывы возникают под влиянием ускорения теплового движения атомов и молекул, в результате развития механических, усадочных, осмотических и иных напряжений. Установлено, что процесс постепенного повреждения структуры сопутствует каждой, даже самой малой упругой деформации.

Кроме физических, в период старения протекают химические и физико-химические процессы, которые именуют как коррозионные.

На заключительной стадии старение переходит в интенсивный, и даже лавинный процесс образования опасных микро- и макротрещин, что завершается частичным или полным разрушением конгломерата.

Старение и деструкция органических полимеров. Особенности химического строения полимеров являются большие значения их относительных молекулярных масс и насыщенность химических связей по всей поверхности и объему изделий, пленок, замазок. Это обычно обеспечивает высокую химическую инертность ко многим весьма активным в химическом отношении веществам: воде, кислотам, щелочам, растворителям, нефтепродуктам, растворам солей и т.д.

Накопившийся опыт показывает, что полимеры в процессе эксплуатации подвергаются старению и деструкции. На них воздействуют солнечная радиация, температурные перепады, кислород воздуха, влажность, осадки, атмосферные загрязнения. В производственных условиях на них влияют химические, механические и биологические факторы. Воздействие солнечного света на полимеры связано с активностью его ультрафиолетовой составляющей, которая обладает значительной энергией и заметно ускоряет реакции образования радикалов и последующую деструкцию. Солнечная радиация сопровождается и подводом к полимеру дополнительной теплоты, также существенно ускоряющей реакции распада. Установлено, что старение полимеров в условиях тропиков и субтропиков протекает в три-четыре раза быстрее, чем в районах умеренного и холодного климата.

Необходимо учесть и влияние различных окислительных агентов. Окислительная деструкция имеет место при воздействии на полимеры прежде всего кислорода, особенно озона. Присоединение к полимеру кислорода O_2 (на поверхности или в объеме) приводит к образованию различных функциональных групп (пероксидных, гидропероксидных, гидроксильных, $C=O$, $C-OH$). Появление в составе полимера таких групп увеличивает его полярность. Поэтому окисление сопровождается ухудшением диэлектрических свойств и уменьшением упругости. Скорость образования пероксидных и гидропероксидных групп увеличивается по мере повышения концентрации кислорода в полимере и температуры. Ультрафиолетовое облучение сильно ускоряет этот процесс. Указанные группы легко распадаются до свободных радикалов, которые иницируют процесс окисления, также ускоряющийся под действием света и теплоты. Последующие реакции радикалов с полимерами могут вызывать как снижение относительной молекулярной массы, так и сшивание молекул, что резко изменяет физические свойства и в конечном итоге усиливает деструкцию. Термическая деструкция протекает под действием тепловых полей, однако она всегда сопровождается окислительной деструкцией. Тепловое воздействие приводит к выделению из полимера газообразных веществ и постепенному разрушению.

Влияние механических воздействий на полимеры проявляется в виде ускорения процессов деструкции за счет других воздействий. Механическая деструкция сопровождается вязким течением с последующим распадом на осколки. Биологическая деструкция заключается в разрушительном действии на полимеры микроорганизмов, насекомых, грызунов.

Действие климатических и атмосферных факторов в виде влажности воздуха, осадков, ветра и загрязнений также оказывает только отрицательное влияние на долговечность полимеров.

Для полимеров, применяемых в строительстве, важным показателем служит химическая стойкость в агрессивных средах.

Влияние возраста и условий твердения на прочность бетона. При благоприятных условиях естественного твердения прочность бетона постепенно увеличивается (10 лет и более, рис. 2.22).

Наращение с течением времени прочности тяжелых бетонов на портландцементе в нормальных условиях твердения можно определить по эмпирической формуле

$$R_n = R_{28} \lg n / \lg 28 = 0,7 R_{28} \lg n, \quad (2.7)$$

где R_n – кубиковая прочность бетона в возрасте n , сут; R_{28} – то же в возрасте 28 суток.

При этом чем меньше тонкость помола цемента, тем выше скорость и меньше продолжительность роста прочности бетона. Наиболее интенсивно бетон набирает прочность в первые 28 суток, поэтому испытания бетона на прочность производят в 28-суточном возрасте. Если испытания осуществляют в более раннем возрасте, то их результаты приводят к 28-суточной прочности бетона.

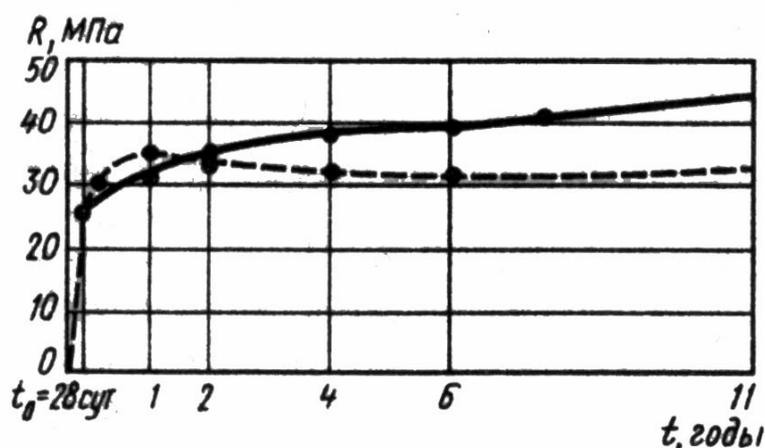


Рис. 2.22. Нарастание прочности бетона во времени:
 ----- при хранении в сухой среде; — при хранении во влажной среде

Прочность бетона нарастает в результате физико-химических процессов взаимодействия цемента с водой, которые нормально проходят в теплых и влажных условиях. Взаимодействие цемента с водой прекращается, если бетон высыхает или замерзает. Раннее высыхание или замерзание бетона непоправимо ухудшает его строение и свойства.

Приближенно можно считать, что прочность бетона увеличивается прямо пропорционально логарифму времени твердения:

$$R_t = R_{28} \frac{\lg t}{\lg 28},$$

где t – время твердения (не менее трех суток), сут; R_{28} – марка бетона.

Более точно прочность бетона в промежуточные сроки твердения определяется по опытной кривой нарастания прочности бетона, которая может быть построена по результатам испытания образцов 3-, 7-, 28- и 90-суточного возраста. Как видно из рис. 2.23, бетон при нормальных условиях твердения имеет низкую начальную прочность и только через 7-14 суток приобретает 60-80 % марочной прочности. Бетоны высоких классов не дают заметного прироста прочности во времени. Твердение бетона значительно ускоряется с повышением температуры и влажности среды. Поэтому на предприятиях изделия сборного железобетона подвергают тепловлажностной обработке (температура до 90°C и влажность до 100 %) или специальной автоклавной обработке при высоком давлении пара и температуре порядка 170 °C.

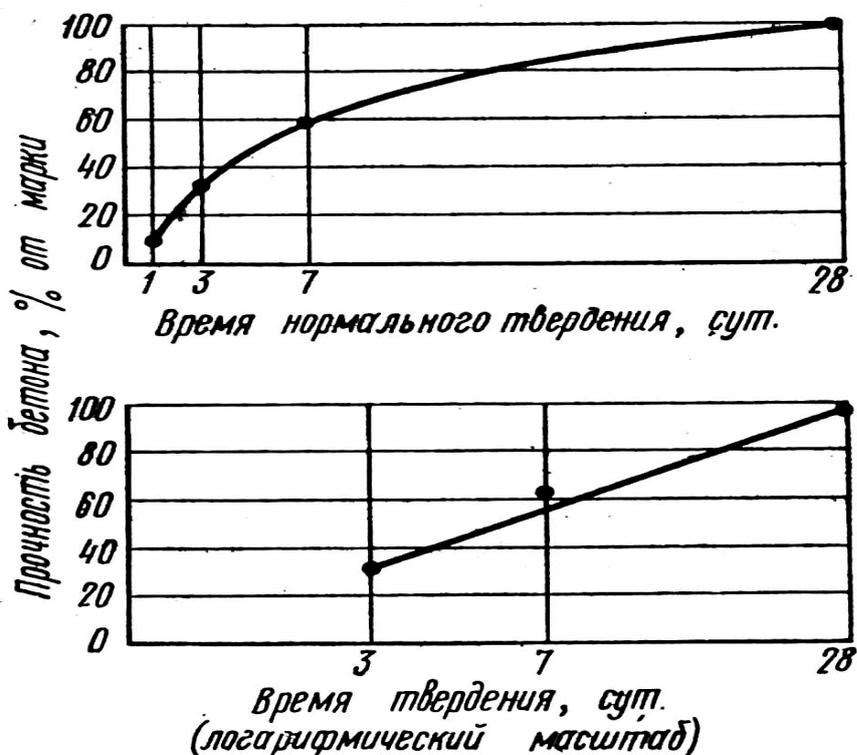


Рис. 2.23. Нарастание прочности бетонов в нормальных условиях твердения

Старение стали. С течением времени свойства стали несколько изменяются, увеличиваются пределы упругости, текучести и прочности, снижается относительное удлинение, уменьшается относительная вязкость, сталь становится более хрупкой. Это явление называется старением стали. Причиной старения является постепенный переход металла в более устойчивую структуру. В кристаллитах феррита остаются растворенными углерод, азот и карбиды других элементов. Эти примеси с течением времени выделяются из твердого раствора и укрепляют прослойки между зернами феррита. Сталь в целом становится более прочной, но менее пластичной. Время протекания этого процесса весьма неопределенно - от нескольких дней до нескольких десятилетий, оно зависит от структуры стали (величины зерна), ее загрязненности, температуры и механических воздействий. Старению наиболее подвержены кипящие стали.

При расчетах металлоконструкций естественное старение стали не учитывается, т.к. повышению пределов текучести и прочности сопутствуют снижение пластичности и увеличение хрупкости. Для стали явление старения имеет два аспекта. С одной стороны, это отрицательное явление, приводящее к снижению пластичности и вязкости стали, а также определенной степени нестабильности ее свойств во времени. Это имеет особенно большое значение для низкоуглеродистой стали обычного качества, объем производства которой составляет до 2/3 от общего производства стали. В этом случае проблема старения решается путем изыскания способов уменьшения интенсивности процесса старения, способов получения «нестареющей» стали. С другой стороны, старение можно использовать как упрочняющую обработку, позволяющую в определенных условиях заметно повысить несущую способность изделия или конструкции без опасного увеличения склонности к хрупкому разрушению. В этом случае стремятся получить такие композиции и режимы старения, которые позволяют достичь указанного эффекта в максимальной степени.

Следует отметить, что изменение механических свойств при старении стали не всегда является нежелательным. В определенных условиях возможно положительное использование эффекта упрочнения при этом процессе для повышения общего уровня прочности, усталостной прочности, сопротивления ползучести, жесткости, продольной устойчивости некоторых изделий. Как видно из данных рис. 2.24, в процессе старения твердость увеличивается, достигая своего максимального значения примерно за два месяца естественного старения.

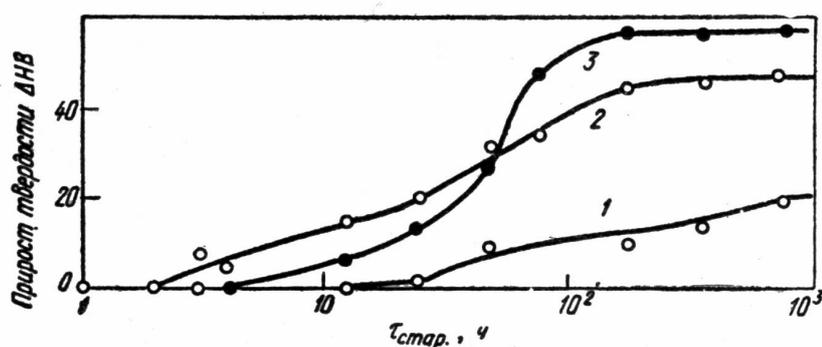


Рис. 2.24. График прироста твердости стали при естественном старении: 1 – нормализация +5 % деформации; 2 – закалка с 700 °С в 10 % водном растворе NaCl, деформация 5 %; 3 – закалка с 700 °С в 10 % водном растворе NaCl

Максимальный прирост твердости при естественном старении составляет 10–20 НВ. Увеличение концентрации С+N в твердом растворе приводит к резкому сокращению инкубационного периода, в течение которого не фиксируется изменение твердости, а абсолютный максимальный прирост ее при старении увеличивается вдвое, но он, однако, меньше, чем для чисто закалочного старения (рис. 2.25).

Искусственное старение обычно приводит к такому же изменению твердости, как и естественное соответствующей продолжительности. Явление перестаривания для твердости выражено весьма слабо. Искусственное старение, следующее за весьма продолжительным (до восьми месяцев) естественным старением, как правило, дополнительно повышает твердость. Но если естественное старение происходит в условиях высокой исходной концентрации С+N, то последующее искусственное старение снижает твердость уже в интервале до 200-250 °С.

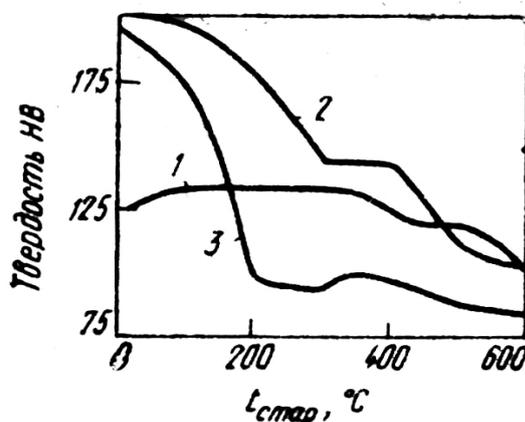


Рис. 2.25. График изменения твердости при искусственном старении стали после предварительного естественного старения:
 1 – отжиг + 10 % деформации; 2 – закалка с 700 °С в воде, деформация 10 %;
 3 – закалка с 700 °С в воде

Наиболее вероятно, что указанное снижение связано в основном с уменьшением эффекта закалочного старения, протекание которого в максимальной степени возможно при естественном старении.

2.6. Усталость материалов при циклических воздействиях

Величина механической прочности конструкционных материалов обусловлена особенностями их структуры, длительностью нагружения, наличием различных дефектов и другими факторами.

В инженерной практике используют понятия кратковременного и длительного (статического или усталостного) сопротивления. Кратковременное сопротивление обычно определяется при однократном нагружении образца при заданных стандартами режимах скорости нагружения и скорости деформации.

Изменение режима нагружения отражается на диаграмме деформирования материала: при большой скорости нагружения малый рост деформаций происходит прямо пропорционально возникающим в нем напряжениям и, если $v \rightarrow \infty$, наблюдается динамический эффект упрочнения материала; при малой (меньше стандартной) скорости наблюдается большой рост неупругих деформаций и снижение прочности до величины длительного сопротивления. Таким образом, в зависимость напряжений от деформаций входит фактор времени.

При повторных нагружениях длительное сопротивление определяется по испытаниям напряжениями, величина которых меньше временного сопротивления $R_{вр}$.

Однако, оставаясь меньше статической разрушающей силы, повторная нагрузка ведет к увеличению неупругих (высокоэластических, вязких) остаточных деформаций в результате необратимых нарушений структуры материала предыдущим нагружениям, и после некоторого числа повторных нагружений происходит разрушение.

Усталостное разрушение конструкционных материалов. Если разрушение является непосредственным результатом действия циклического напряжения, то оно называется усталостным, а явление, обуславливающее это разрушение, - усталостью. Под усталостью понимают процесс постепенного накопления локальных повреждений в материале под воздействием изменяющейся нагрузки, в результате которого происходит его разрушение.

Испытания на усталость состоят из многократных повторений циклов нагружений при заданной частоте от максимальных σ_{max} к минимальным σ_{min} напряжениям цикла и обратно вплоть до разрушения образца. Основной характеристикой условий циклического нагружения является коэффициент асимметрии $\rho = (\sigma_{min} / \sigma_{max})$. Представление усталостной кривой в виде прямой с перегибом (рис. 2.26) является приближенным, но удобным в применении с практической точки зрения.

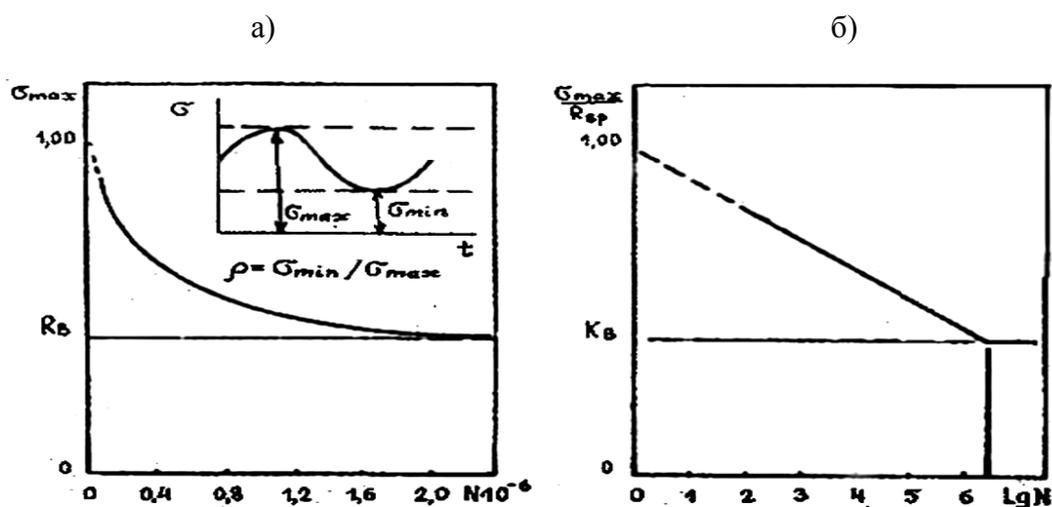


Рис. 2.26. Вид кривой усталости в нормальных (а) и полулогарифмических (б) координатах

В действительности же кривые имеют s-образный характер (рис. 2.27).

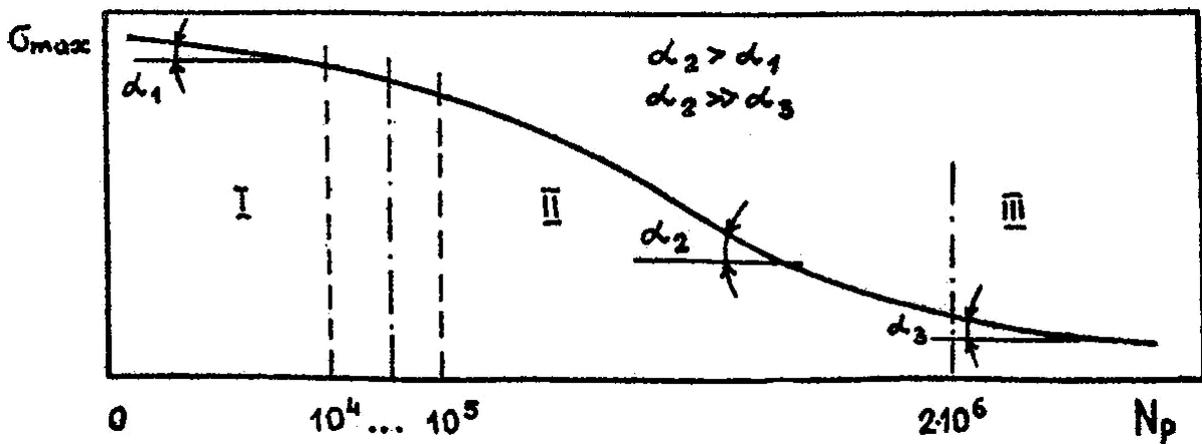


Рис. 2.27. Временные области кривой усталости

Здесь кривую усталости можно разбить на три участка: I участок - малоцикловая усталость; II участок - многоцикловая усталость; III участок - длительное сопротивление усталости.

Основные факты, характеризующие разрушение конструкционных материалов от усталости, таковы:

1. Все твердые тела (за исключением, по-видимому, идеально упругих) в условиях циклического нагружения разрушаются при меньшем напряжении, чем при монотонно возрастающей или длительно действующей нагрузке. Как правило, разрушающее напряжение при усталости ниже не только предела текучести, но иногда и предела упругости.

2. Нагружение циклами, в которых изменяются не только величина, но и знак нагрузки ($\rho < 0$), значительно опаснее нагружения односторонними асимметричными циклами.

3. Количество циклов N , приводящее к разрушению, увеличивается с уменьшением величины σ_{max} и ростом величины ρ .

Выносливость конструкционных материалов. Один из наиболее важных выводов, сделанных А. Велером, заключается в том, что разрушение в результате усталости не наблюдается в тех случаях, когда напряжение не превышает некоторого значения. Величина, характеризующая наибольшее напряжение цикла, которое материал, не разрушаясь, выдерживает, названа пределом выносливости. В соответствии с этим под выносливостью понимают способность материала противостоять усталости. Из асимптотического характера кривой следует, что при напряжениях, близких к пределу выносливости R_b , число циклов до разрушения значительно увеличивается. При числе нагружений $N \geq 2 \cdot 10^6$ кривая становится практически параллельной оси абсцисс. Постоянная ордината кривой является пределом выносливости.

Для большинства конструкционных материалов перегиб кривой при $N=(2...5) \cdot 10^6$ является характерным, что позволяет принять $N_0=2 \cdot 10^6$ циклов за базу испытаний. При определении выносливости в области $0 < N < 2 \cdot 10^6$ циклов нагружений величину напряжения, которое выдерживает материал без разрушения заданное число циклов, называют пределом ограниченной выносливости.

Для расчетов на выносливость существенное значение имеет аналитическое описание кривой усталости. Наибольшее распространение для описания левой ветви кривой получило уравнение вида

$$\sigma_{\max}/R_B = a - b \operatorname{Lg} N_p, \quad (2.8)$$

где σ_{\max} - максимальное нагружение в цикле; R_B - временное сопротивление материала, получаемое из кратковременных испытаний статической нагрузкой; a, b - коэффициенты, зависящие от коэффициента асимметрии цикла ρ и других факторов; N_p - число циклов нагружения.

Отношение $\sigma_{\max}/R_B = K_B$ называется коэффициентом выносливости, он характеризует величину относительной прочности и служит для сравнения сопротивления усталости различных материалов.

Выносливость конструкций из различных материалов. Выносливость железобетонных элементов. Предельное состояние по выносливости для железобетонных конструкций от многократно повторяющихся нагружений наступает вследствие усталостного разрушения арматуры или бетона. В основу построения расчетных формул положены следующие предпосылки:

1. Максимальные и минимальные напряжения в бетоне и арматуре железобетонных элементов определяют исходя из гипотезы плоских сечений и линейного закона изменения напряжений в бетоне, а работу бетона на растяжение, как правило, не учитывают.

2. Максимальные напряжения в арматуре и бетоне не должны превосходить соответствующих расчетных сопротивлений, определяемых по ограниченному пределу выносливости этих материалов.

3. Расчетные сопротивления устанавливаются в зависимости от режима нагрузок, характеризуемого коэффициентом асимметрии цикла и видом материала – бетона и арматуры.

Выносливость железобетонных элементов определяется сравнением σ_B и σ_S в бетоне и арматуре с соответствующими расчетными сопротивлениями, умноженными на коэффициенты условий работы γ_{b1} и γ_{s3} , а при наличии сварных соединений арматуры также на коэффициент γ_{s4} .

Напряжения от действия внешних сил и усилия предварительного обжатия в бетоне и арматуре вычисляются, как для упругого тела (по приведенным сечениям).

Неупругие деформации в сжатой зоне бетона учитывают снижением модуля упругости бетона, принимая коэффициент приведения арматуры к бетону

α , равным 25, 20, 15 и 10 для бетонов классов соответственно В15, В25, В30, В40 и выше. Выносливость сечений, нормальных к продольной оси элемента, должна определяться из условий:

а) для сжатого бетона

$$\sigma_{b,max} \leq R_b \cdot \gamma_{b1},$$

где $\sigma_{b,max}$ - максимальное нормальное напряжение в бетоне; R_b - расчетное сопротивление бетона сжатию; γ_{b1} - коэффициент условий работы при многократно повторяющейся нагрузке, принимаемый в зависимости от коэффициента асимметрии цикла: $\rho_b = \sigma_{b,min} / \sigma_{b,max}$, где $\sigma_{b,min}$ и $\sigma_{b,max}$ соответственно наименьшее и наибольшее напряжение в бетоне в пределах цикла изменения нагрузки;

б) для растянутой арматуры

$$\sigma_{s,max} \leq R_s \cdot \gamma_{s3} \cdot \gamma_{s4},$$

где $\sigma_{s,max}$ - максимальное нормальное напряжение в растянутой арматуре; R_s - расчетное сопротивление арматуры, γ_{s3} - коэффициент условий работы арматуры при многократно повторяющейся нагрузке, принимаемый в зависимости от коэффициента асимметрии цикла $\rho_s = \sigma_{s,min} / \sigma_{s,max}$, где $\sigma_{s,min}$ и $\sigma_{s,max}$ соответственно наименьшее и наибольшее напряжение в арматуре в пределах цикла изменения нагрузки; γ_{s4} - коэффициент условий работы арматуры при наличии в ней сварного соединения.

В процессе многократно повторяющихся нагружений изгибаемых железобетонных элементов напряжения в растянутой арматуре и сжатом бетоне перераспределяются. В связи с этим повышается коэффициент асимметрии цикла напряжений в арматуре. Он становится больше коэффициента асимметрии цикла нагрузки.

Выносливость арматуры, имеющей сварные соединения, зависит от типа сварных соединений, класса и марки стали, диаметра стержней и коэффициента асимметрии цикла. Сжатая арматура на выносливость не рассчитывается. Аналогично проводится диагностика выносливости сечений, наклонных к продольной оси элемента.

Выносливость элементов стальных конструкций. Выносливость стальных конструкций и их элементов следует определять по формуле

$$\sigma_{max} \leq \alpha \cdot R_v \cdot \gamma_v, \quad (2.9)$$

где R_v - расчетное сопротивление стали усталости; α - коэффициент, учитывающий количество циклов нагружения n и вычисляемый по формулам:

а) для групп элементов 1 и 2

$$\alpha = 0,064(n/10^6)^2 - 0,5(n/10^6) + 1,75;$$

б) для групп элементов 3-8

$$\alpha = 0,07(n/10^6) - 0,64(n/10^6) + 2,2,$$

где γ_v -коэффициент, определяемый в зависимости от вида напряженного состояния и асимметрии нагружения.

При определении выносливости стальных конструкций и их элементов по формуле (2.9) произведение ($\alpha \cdot R_v \cdot \gamma_v$) не должно превышать (R_u / γ_v).

Выносливость элементов из пластмасс. Существует много разновидностей конструкционных пластмасс, которые в основном подразделяются:

- на древесные пластики (древесно-стружечные плиты, древесноволокнистые плиты, древесно-слоистый пластик, модифицированная древесина и др.);
- на стеклопластики (высокопрочные, стеклотекстолиты, неориентированные);
- на полимербетоны (полиэфирные, фурановые, эпоксидные, каучуковые и др..)

Стеклопластики являются наиболее прочными материалами, близкими по прочности к стали.

Имеющиеся исследования конструкционных пластмасс при повторном нагружении показывают, что с ростом количества циклов нагружений они снижают свою прочность.

Кривая выносливости конструкционных пластмасс по своей форме сходна с кривой Велера (см. рис. 2.27), но в отличие от кривой выносливости стали она не имеет горизонтальной асимптоты. Поэтому у многих конструкционных пластмасс отсутствует понятие о физическом пределе усталости. В качестве характеристики сопротивления этих материалов повторным нагружениям принимают условный предел усталости - наибольшее напряжение, которое может выдерживать данный материал в течение заданного числа циклов повторных нагружений. Для определения условного предела усталости заранее должна быть указана база испытаний, которую выбирают из фактической длительности эксплуатации конструкции. При исследованиях условный предел усталости определяют на базе ($10^6 \dots 10^8$) циклов повторных нагружений.

Процесс усталости конструкционных пластмасс обладает определенными особенностями благодаря специфическим свойствам этих материалов. Сюда относится состав и структура наполнителя и тип матрицы (смолы), а также количественное соотношение между ними, анизотропия упругих и

прочностных свойств, концентраторы напряжений, размеры, влажность и ряд других факторов.

Концентрация напряжений армированных пластиков снижает усталостную прочность до 10 %.

Расчетные сопротивления пластмасс усталости при циклических нагрузках с учетом характера нагружения во времени могут устанавливаться по экспериментальным данным, причем значения всех расчетных сопротивлений допускается выражать через значения основных расчетных сопротивлений (установленных при кратковременном действии на материал монотонно возрастающих напряжений) с помощью соответствующих коэффициентов условий работы.

Выносливость деревянных элементов. Усталостные характеристики материала определяются тремя основными переменными величинами: средним напряжением σ_{cp} , амплитудой напряжений σ_a и числом циклов N_p до разрушения.

Существующие объяснения усталости цельной древесины базируются на рассмотрении механизма разрушения ее макроструктуры под действием повторной нагрузки: расслоений вдоль волокон по тангенциальным плоскостям на границе летних и весенних слоев, где расположены паренхимные клетки древесины, по которым развитие усталостного разрушения происходит с поверхности вглубь образца.

Основными нагрузками, создающими циклический режим работы несущих конструкций, в зданиях и сооружениях являются:

- нагрузки от подвесных и мостовых кранов;
- воздействия от неуравновешенных механизмов технологического оборудования на перекрытиях;
- нагрузки от подвижного состава на конструкции автомобильных и железнодорожных мостов, крановых эстакад, транспортерных галерей;
- скоростные пульсации ветра на башенные и мачтовые сооружения.

Некоторые ориентировочные данные по параметрам цикличности нагружения строительных конструкций приведены в табл. 2.5.

Расчет конструкций и сооружений на выносливость под действием пульсации ветровой нагрузки должен производиться независимо от расчета на другие сочетания нагрузок. Коэффициент асимметрии цикла напряжений в конструкции при пульсации ветровой нагрузки может быть определен исходя из динамической составляющей ветровой нагрузки по формуле, приведенной в табл. 2.5, где ξ – коэффициент динамичности, зависящий от периода собственных колебаний сооружения и логарифмического декремента колебаний; ζ – коэффициент пульсации скоростного напора, зависящий от высоты над поверхностью земли.

Таблица 2.5

Параметры цикличности нагружения некоторых строительных конструкций

Наименование конструкций и элементов	Асимметрия нагружения	Эксплуатационное число циклов нагружения, тыс.	Частота нагружения
Стальные балки подкрановых путей: -разрезные -неразрезные	+0,10 - 0,30	2000	Не влияет
Железобетонная подкрановая балка двутаврового сечения пролетом 12 м под мостовой кран 20 т пролетом 24 м: - сжатый бетон - напрягаемая растянутая арматура	0,12 0,60	2000	Не влияет
Деревянная клееная подкрановая балка пролетом 6 м под мостовой кран грузоподъемностью 5 т пролетом (10,5...28,5 м), $\rho_{\sigma} / \rho_{\tau}$	0,052...0,044	125...2000	Не более 2 циклов / мин
	0,042...0,039		
Типовые деревянные клееные стропильные балки пролетом 18 м с подвесными кранами грузоподъемностью 1, 2 и 3,2 т	0,95...0,72	24...6500	Не более 6 циклов / мин
	0,82...0,66		
Конструкции железнодорожных стальных мостов: -раскосы -поперечные балки	0,10...0,50	20000	Не влияет
	0	40000	
Балочные пролетные строения мостов из клееной древесины: автодорожных пролетом 10-30 м под нагрузку Н10, ρ_{τ} автодорожных пролетом 16,5 м под нагрузку НГ-60, $\rho_{\sigma} / \rho_{\tau}$ железнодорожных, колеи 750 мм пролетом 12...18 м	0,25...0,44	2000	До 7000 циклов /сут
	0,29/0,27		
	0,14...0,22		
	0,13...0,21		
Башенные сооружения при пульсациях ветра в IV...VII ветровых районах	$1/(1+\zeta\xi)$	Не более $\alpha_{\text{в}} 36 \text{ т}/\tau$	Не более 4 Гц (240 циклов / мин)

В целом любые нагрузки на строительные конструкции носят стохастический, т.е. случайный характер, и, если число повторений экстремальных значений нагрузок превышает 50 тысяч за срок эксплуатации, их следует рассматривать как циклические, а конструкции проверять расчетом на выносливость.

2.7. Прочность и нормативные сопротивления материалов. Статистический способ оценки прочности бетонов

Под *прочностью* элементов конструкций понимается способность сопротивляться разрушению (разделению на части) или необратимому изменению формы (пластическому деформированию) под действием внешних нагрузок. Ввиду неоднородности свойств материалов по объему прочность в каждой точке конструкции будет различная. Поэтому при проведении прочностных расчетов пользуются *нормативными и расчетными* сопротивлениями материалов, которые получают при проведении обследования разрушающими или неразрушающими методами с определенной обеспеченностью.

Участки испытания бетона при определении прочности должны располагаться:

- в местах наименьшей прочности бетона, предварительно определенной экспертным методом;
- в зонах и элементах, определяющих их несущую способность;
- в местах, имеющих дефекты и повреждения, которые могут свидетельствовать о пониженной прочности бетона.

Количество участков при определении прочности бетона рекомендуется принимать не менее девяти для каждой группы однотипных конструкций. Перед испытанием поверхность участков следует зачищать до неповрежденного бетона.

Статистическая оценка прочности бетона при обследовании конструкций применима в следующих случаях:

- если прочность бетона определялась на основании разрушающих испытаний отобранных из конструкции образцов;
- если прочность бетона определялась неразрушающими методами;
- если прочность бетона определялась по предварительно установленным экспериментальным градуировочным зависимостям, полученным по результатам параллельных испытаний одних и тех же участков конструкций разрушающим методом и методами неразрушающего контроля (ультразвуковым, пластической деформации, упругого отскока ударного импульса и т.п.).

При наличии образцов, отобранных из конструкций, можно построить градуировочную зависимость между прочностью бетона образцов, испытанных в прессе, и косвенными характеристиками прочности этих же образцов, полученными при их испытании неразрушающими методами. При этом среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости S_T не должно превышать 15 % среднего значения прочности бетона образцов или участков конст-

рукций, использованных при построении градуировочной зависимости, а коэффициент корреляции r должен быть не менее 0,7.

В случае построения градуировочной зависимости по данным параллельных испытаний одних и тех же участков методом отрыва со скалыванием и другим неразрушающим методом средняя квадратическая ошибка градуировочной зависимости S_T определяется по формуле

$$S_T = \sqrt{(S_{Тн.м}^2 + S_{Тм.о.с}^2)},$$

где $S_{Тн.м}^2$ – средняя квадратическая ошибка построенной градуировочной зависимости;

$S_{Тм.о.с}^2$ - средняя квадратическая ошибка построенной градуировочной зависимости методом отрыва со скалыванием.

Экспериментально установлено, что распределение результатов измерений прочности бетона подчиняется нормальному закону распределения Гаусса. Статистический способ оценки прочности базируется на нормальном законе распределения (Гаусса-Лапласа) механических характеристик материала.

Проверка результатов измерения на соответствие нормальному закону распределения. Для проверки фактических результатов измерения прочности бетона на соответствие этому распределению используются критерии согласия.

Критерием согласия называется критерий проверки гипотезы о том, что генеральная совокупность имеет распределение предполагаемого типа.

Гипотеза о соответствии распределения измеренных случайных величин какому-либо закону распределения может быть проверена с помощью критериев согласия Пирсона χ^2 , Колмогорова, Смирнова и др. При большом количестве измерений (свыше 400) рекомендуется использовать критерий Пирсона χ^2 .

Основное достоинство критерия согласия χ^2 - универсальность. Его можно использовать для проверки предположений относительно произвольного распределения, в том числе и с неизвестными параметрами.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n_i - n \cdot P_i)^2}{n \cdot P_i},$$

где: n_i – число результатов эксперимента, попавших в интервал i ; n – общее число результатов эксперимента (размер выборки); P_i – вероятность попадания результата эксперимента в интервал I ;

$$P_i = f\left(\frac{b - \bar{x}}{S}\right) - f\left(\frac{a - \bar{x}}{S}\right),$$

где $a; b$ – наименьшая и наибольшая граница интервала i соответственно; S – стандартное отклонение для всей выборки; \bar{x} – среднее значение по всей выборке.

Фильтрация результатов измерений прочности бетона. Результаты измерений прочности бетона предварительно должны быть отфильтрованы, то есть из выборки исключаются резко отличающиеся от среднего значения, которые считаются «промахами».

Критерий $K_{3\sigma}$ (правило “трех сигм”). Критерий $K_{3\sigma}$ называется также правилом “трех сигм” и применяется для отсеивания результатов измерений, распределенных по нормальному закону. Этот критерий целесообразно использовать при количестве измерений $N \geq 20$. При сравнительно небольших объемах выборочных данных (до 20) этот критерий может приводить к грубым ошибкам.

Проверки резко выделяющихся результатов измерений ведутся из условия

$$K_{3\sigma} = \frac{|R_m - R_i|}{S_m} > 3.$$

Величины R_m и S_m вычисляются без учета проверяемого значения R_i . Если условие выполняется, то с вероятностью 0,99 результат R_i считается промахом и исключается из выборки.

Критерий Романовского K_p . Критерий Романовского рекомендуется применять в тех случаях, когда количество измерений невелико ($N <= 20$).

$$K_p = \frac{|R_m - R_i|}{S_m} > K_T,$$

где K_T – табличное (теоретическое) значение критерия Романовского (табл.2.6).

Таблица 2.6

Значения K_T для критерия Романовского

Доверительная вероятность Р	Значения K_T при числе измерений N						
	4	6	8	10	12	15	20
0,99	1,73	2,16	2,43	2,62	2,75	2,90	3,08
0,98	1,72	2,13	2,37	2,54	2,66	2,80	2,96
0,95	1,71	2,10	2,27	2,41	2,52	2,64	2,78
0,90	1,69	2,00	2,17	2,29	2,39	2,49	2,62

Величины R_m и S_m вычисляются без учета проверяемого значения R_i . Если условие выполняется, то с вероятностью Р результат R_i считается промахом и исключается из выборки.

Методика определения класса бетона по СП 13-102-2003. Вычисляется марка бетона, как среднее арифметическое по всем результатам испытания на прочность:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n},$$

где R_i – единичное значение прочности бетона; n – количество испытаний.

Вычисляется среднеквадратическое отклонение прочности бетона, которое количественно характеризует степень разброса экспериментальных данных относительно среднего значения в абсолютных величинах:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1}}.$$

Вычисляется коэффициент вариации, характеризующий степень разброса экспериментальных данных относительно среднего значения. В относительных величинах принимает значения от 0 до 1: 0 – разброс отсутствует, 1 – разброс бесконечно большой. Рекомендуется проводить фильтрацию экспериментальных данных таким образом, чтобы коэффициент вариации не превышал 0,12, то есть разброс составлял менее 12 %. Этот показатель зафиксирован и в соответствующих ГОСТах на испытания бетона.

$$v = S_m / R_m.$$

Класс бетона по прочности вычисляется по нижней границе доверительного интервала распределения с обеспеченностью 0,95 по формуле

$$B = R_m(1 - t_\alpha v),$$

где t_α - коэффициент Стьюдента (табл. 2.7), принимаемый в зависимости от количества испытаний.

Таблица 2.7

Значения коэффициента Стьюдента t_α при обеспеченности 0,95

Число испытаний	t_α	Число испытаний	t_α
1	6,31	11	1,80
2	2,92	12	1,78
3	2,35	13	1,77
4	2,13	14	1,76
5	2,01	15	1,75
6	1,94	20	1,73
7	1,89	25	1,71
8	1,86	30	1,70
9	1,83	40	1,68
10	1,81	Более 40	1,64

Методика определения класса бетона по СНиП 2.03.01-84*. По этой методике коэффициент вариации принимается равным 0,12, тогда выражение для определения класса бетона по прочности принимает вид

$$B = 0.8 \cdot R_m .$$

Аналогичным способом возможно определение нормативных сопротивлений и других строительных материалов.

Заключение

Уровень развития строительного производства в настоящее время определяется в числе других условий наличием высококвалифицированных специалистов. Знание основ теории надежности применительно к строительным конструкциям позволит будущему специалисту осознанно планировать и проводить мероприятия по эксплуатации и ремонту зданий и сооружений.

Понимание основных закономерностей физики и механики разрушения позволит квалифицированно подойти к оценке опасности дефектов и повреждений, выявленных при плановых осмотрах зданий.

Знание научных основ диагностики строительных конструкций является фундаментальным, его можно эффективно применять в случаях возникновения сложных ситуаций при возведении, эксплуатации, обследовании и ремонте зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биоповреждения в строительстве / Ф.М. Иванов, С.Н. Горшин, Дж. Уэйт и др.; под ред. Ф.М. Иванова.- М.: Стройиздат, 1984.-320 с.
2. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В.Блази. - М.: Техносфера, 2004.-480 с.
3. Бойко, М.Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов / М.Д.Бойко. - Л.: Стройиздат, Ленинградское отд-ние, 1986.-256 с.
4. ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий / Госгражданстрой [Срок введ. в действие 01.07.87]. - М.: Госгражданстрой, 1988. – 70 с.
5. ВСН 57-88(р). Положение по техническому обследованию жилых зданий / Госстрой [Срок введ. в действие 06.07.88]. - М.: Госстрой, 1991. - 46 с.
6. Гроздов, В.Т. Дефекты строительных конструкций и их последствия / В.Т. Гроздов.- СПб: Издательский Дом KN+, 2001. -152 с.
7. Гучкин, И.С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций: учеб. пособие / И.С.Гучкин.- Пенза: ПГАСА, 2000. - 173 с.
8. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е.В.Горохов, Я. Брудка, М. Любимски и др.; под ред. Е.В. Горохова. - М.: Стройиздат, 1994. – 488 с.
9. Зайцев, Ю.В. Механика разрушения для строителей: учеб. пособие для строит. вузов / Ю.В.Зайцев. - М.: Высш. шк., 1991. – 228 с.
- 10.Иванов, А.М. Строительные конструкции из полимерных материалов: учеб. пособие для вузов / А.М.Иванов, К.Я. Алгазинов, Д.В.Мартинец. - М.: Высш. шк, 1978. - 239 с.
- 11.Инчик, В.В. Высолы и солевая коррозия / В.В. Инчик. – СПб.: СПбГАСУ, 1998. - 324 с.
- 12.Калинин, В.М. Обследование и испытание конструкций зданий и сооружений: учеб. / В.М.Калинин, С.Д.Сокова, А.Н.Топилин. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 336 с.
- 13.Курбатова, И.И. Современные методы химического анализа строительных материалов / И.И. Курбатова. - М.: Стройиздат, 1972. - 161 с.
- 14.Меламедов, И.М. Физические основы надежности / И.М. Меламедов. - Л.: Энергия, 1970. - 152 с.
- 15.Обследование и испытание зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов / В.Г. Козачек, Н.В. Нечаев, С.Н. Нотенко и др; под ред. В.И. Римшина. - М.: Высш. шк., 2004. - 447 с.
- 16.Обследование и испытание сооружений: учеб. для вузов / О.В.Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов, В.А. Волохов; под ред. О.В. Лужина. – М.: Стройиздат, 1987.-263 с.

17. Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. - 216 с.
18. Проектирование металлических конструкций: спец. курс: учеб. пособие для вузов / В.В. Бирюлев, И.И. Кошин, И.И. Крылов, А.В. Сильвестров. - Л.: Стройиздат, 1990. - 432 с.
19. Прокофьев, А.С. Проектирование строительных конструкций с учетом усталости: учеб. пособие / А.С. Прокофьев, В.А. Кабанов, А.А.Сморчков; под общ. ред. В.П.Коцегубова. - Тула: ТулПИ, 1988.-106 с.
20. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е.Томашевский. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
21. Рогонский, В.А. Эксплуатационная надежность зданий / В.А. Рогонский. - Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1983. - 280 с.
22. Сморчков, А.А. Обследование строительных конструкций зданий и сооружений: учеб. пособие / А.А.Сморчков. - Курск: Курск. гос. ун-т, 2003. - 87 с.
23. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. - М.: Госстрой России, 2004.- 26 с.
24. Стеклов, О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением / О.И. Стеклов.- М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
25. Травин, В.И. Капитальный ремонт и реконструкция жилых и общественных зданий: учеб. пособие / В.И.Травин. - Ростов-н/Д: Изд-во «Феникс», 2004. -256 с.
26. Финкель, В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. - М.: Металлургия, 1970 - 376 с.
27. Чернышов, Е.М. Повышение трещиностойкости мелкозернистого цементного бетона при многоуровневом дисперсном армировании его структуры / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы седьмых чтений. - Ч.1. - Белгород, 2001. - с.587-598.

Учебное издание

УШАКОВ ИГОРЬ ИВАНОВИЧ

ДИАГНОСТИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Научные основы диагностики

Учебное пособие

для студентов строительных специальностей

Редактор Литвинова Т.А.

Подписано в печать 02. 10. 2008. Формат 60x84 1/16. Уч. - изд.л. 9,6.
Усл. - печ. л. 9,7. Бумага писчая. Тираж 150 экз. Заказ №

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии Воронежского
государственного архитектурно-строительного университета,
394006 Воронеж, ул.20-летия Октября, 84