

# **КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»**

## **КЛАССИФИКАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ, ИХ ОСНОВА**

За последние годы значительно возросли объемы строительства многоэтажных зданий из монолитного железобетона. Здания высотой в 20 - 30 этажей становятся рядовым явлением. Причем благодаря совершенствованию технологий возрастают темпы строительства. Это приводит к тому, что значительная часть нагрузок действует уже в процессе возведения здания, что требует обеспечения необходимого уровня качества всех качественных показателей конструкций.

При проектировании несущих строительных конструкций зданий и сооружений проектировщик предполагает, что фактическая прочность бетона, фактическое армирование и геометрические размеры будут соответствовать значениям, заданным в проекте.

Поэтому при строительстве зданий и сооружений очень важно выполнить проектные требования по перечисленным параметрам, так как именно от этого в основном зависят надежность и долговечность сооружения. Кроме того, важна диагностика - установление отдельных дефектов у полученных конструкций при изготовлении.

Установление фактического армирования осуществляется в процессе пооперационного контроля и фиксируется в актах на скрытые работы. Сложнее обстоит вопрос с определением фактической прочности бетона и дефектоскопией конструкций.

Нормативной величиной прочности бетона является его класс. Значение класса бетона определяется средней прочностью бетона конструкций и коэффициентом вариации прочности бетона. Средняя прочность бетона монолитных конструкций всегда будет отличаться от прочности бетона, определенной по резуль-

татам испытаний контрольных образцов, изготовленных на строительной площадке из той же бетонной смеси (различие в технологии укладки бетона, различие в твердении бетона, особенно в зимних условиях при электропрогреве конструкций и пр.). Ясно, что и изменчивость прочности бетона будет разная по образцам и непосредственно в монолитной конструкции.

Выходом из этого положения является контроль прочности бетона непосредственно в конструкциях неразрушающим методом.

Все большее значение приобретает организация сплошного контроля качества железобетонных конструкций, изготавливаемых в условиях предприятий железобетонного комплекса.

Для обеспечения высокого качества строительства необходим эффективный контроль, позволяющий обнаружить дефекты.

Все виды технического контроля производственных объектов разделяются на 3 группы:

- разрушающий контроль,
- повреждающий контроль и
- неразрушающий контроль.

Разрушающий контроль – это совокупность таких видов контроля, которые требуют отбора проб или вырезки образцов непосредственно из материала объекта, при этом объект остается неработоспособным до восстановления мест отбора проб (образцов). Вместе с тем разрушающий контроль дает непосредственную оценку прочности, жесткости и трещиностойкости конструкции, а также механических характеристик материалов.

К разрушающим видам контроля относятся:

- лабораторный химический анализ материала объекта (требует насверловки определенного объема стружки);
- металлография (исследование структуры металла объекта; требует вырезки шлифов);
- лабораторные механические испытания материала объекта на растяжение, сжатие, изгиб, ударную вязкость (требует вырезки специальных образцов –

темплетов). Повреждающий контроль – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом объект сохраняет работоспособность, но в местах контроля остаются не препятствующие эксплуатации неустраняемые следы.

К повреждающим видам контроля, в частности, относятся:

- измерение твердости (твердометрия) вдавливанием специальных инденторов (баббитовые шарики, алмазные наконечники; на поверхности объекта остается вмятина);

- стилоскопирование (оценка марки стали по составу оптического спектра вольтовой дуги, создаваемой между электродом специального прибора – стилоскопа и поверхностью объекта, на которой остается прижег).

Неразрушающий контроль (НК) – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом исправный объект сохраняет работоспособность без какого-либо повреждения материала.

Различают понятия «неразрушающий контроль» и «неразрушающий физический контроль».

Неразрушающий физический контроль – это совокупность таких видов неразрушающего контроля, которые требуют применения специальных веществ, сложных приборов и достаточно наукоемких технологий. Из всех видов неразрушающего контроля, используемых на опасных производственных объектах, лишь один не относится к категории физических – это визуальный и измерительный контроль (ВИК). Таким образом, сочетание этих понятий можно выразить формулой: Неразрушающий контроль = Неразрушающий физический контроль + ВИК.

По степени проникновения в материал все виды неразрушающего физического контроля условно подразделяют на две категории: поверхностные и объемные. Поверхностные виды (методы) неразрушающего контроля – это такие, которые позволяют обнаруживать только дефекты, имеющие выход на доступную для контроля поверхность материала объекта. Объемные виды (методы) неразрушающего контроля – это такие, которые дают возможность обнаруживать преимущественно внутренние дефекты материала, а поверхностные дефекты выявляют-

ся, только если они достаточно крупные. В России классификация неразрушающих физических видов (методов) контроля приведена в стандарте ГОСТ 18353-79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов»

Неразрушающий контроль позволяет без разрушения контролировать качество всех изделий как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации, что невозможно при разрушающем контроле. Неразрушающий контроль может быть применен для выявления дефектов, определения прочности и плотности бетона, наличия, положения и диаметра арматуры, толщинометрии и т. д.

Неразрушающий контроль незаменим при проведении массового контроля качества строительных конструкций на заводах стройиндустрии; при выявлении фактического состояния конструкций, узлов, элементов в процессе эксплуатации и при реконструкции. Положительным примером может служить контроль всей сети железных дорог у нас в стране, осуществляемый 30 раз в год с помощью дефектоскопов, установленных на вагонах и тележках. Средства, вкладываемые при применении автоматизированного неразрушающего контроля, окупаются очень быстро, а надежность контролируемых изделий резко повышается.

Вместе с тем в ряде случаев неразрушающий контроль не может дать нужной информации: например, выявить фактическую прочность, жесткость, трещиностойкость конструкций, особенно в процессе научно-исследовательских работ, когда изучают новые материалы, конструктивные формы.

Наиболее полные данные о качестве конструкций и параметрах предельных состояний I и II групп можно получить путем комплексного применения неразрушающего и разрушающего контролей.

В настоящее время для неразрушающего контроля используют новейшие достижения физики, электро- и радиотехники, электроники, автоматики и вычислительной техники. В соответствии с ГОСТ 18353-79, различают такие методы неразрушающего контроля: склерометрические, акустические, капиллярные, магнитные, оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые, течеисканием, электрические, электромагнитные.

Указанные виды неразрушающего контроля позволяют определить комплекс показателей качества строительных конструкций: дефекты, их размеры и места расположения; плотность, прочность и неоднородность структуры; толщину изделий и немагнитных покрытий на ферромагнитных изделиях; механические напряжения; влажность; наличие, диаметр и положение арматуры в бетоне и др. Иногда одни и те же показатели могут быть получены разными методами с различной точностью.

Для получения наиболее полной информации о состоянии конструкций и сооружений используют в комплексе два и более метода неразрушающего контроля, каждый из которых взаимодополняет друг друга и позволяет частично контролировать полученные данные. Менее точные методы неразрушающего контроля используют для экспресс - оценки качества конструкций. Подробные данные о применении методов неразрушающего контроля изложены в соответствующих ГОСТах.

В строительстве применяют также механические и комплексные методы.

Действующие нормативные документы, регламентирующие неразрушающие методы контроля качества, ориентированы в основном на неразрушающий контроль при производстве сборных железобетонных конструкций.

При неразрушающем контроле прочности возводимых зданий из монолитного железобетона и при обследовании эксплуатирующих конструкций они не дают ответа на многие вопросы, а зачастую содержащиеся в этих нормативных документах положения препятствуют применению неразрушающих методов.

Неразрушающие методы контроля используются при измерении различных строительных элементов, строительных конструкций зданий и сооружений на отдельных этапах выполнения и после всех работ, контроле оборудования, приспособлений и оснастки для изготовления и монтажа элементов, разбивочных сетей и их элементов.

Неразрушающий контроль используется при производстве линейных измерений, геодезическом контроле качества выполнения строительно-монтажных работ, при определении прочности бетона методом ударного импульса или методом

отрыва со скалыванием или скалыванием ребра, при определении защитного слоя бетона, при тепловизионном контроле качества устройства ограждающих конструкций и в других случаях.

Измерения в строительстве проводятся различными методами, с использованием различных приборов и инструментов.

Применению неразрушающих методов контроля предшествует разработка модели, отражающей изменение свойств материалов и изделий по характерным признакам. Неразрушающий контроль заключается в проверке физическим методом соответствия показателей качества контролируемой продукции установленным требованиям без нарушения её свойств, функционирования и пригодности к применению. Неразрушающий контроль основан на получении информации о качестве проверяемых материалов и изделий при взаимодействии их с веществами или физическими полями в виде электрических, световых, звуковых или иных сигналов.

Методы каждого вида неразрушающего контроля классифицируют по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом, первичным информационным признакам и способам получения первичной информации.

Основные методы неразрушающего контроля:

Ультразвуковой (ультразвуковая дефектоскопия, ультразвуковая толщинометрия);

Акустико-эмиссионный;

Магнитный (магнитопорошковый);

Проникающими веществами (капиллярный, течеискание);

Вихретоковый (вихретоковая дефектоскопия);

Вибродиагностический;

Электрический;

Тепловой;

Радиационный;

Радиоволновой;

Оптический.

### **Ультразвуковой метод неразрушающего контроля**

Ультразвуковой метод заключается в регистрации скорости прохождения ультразвуковых волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте.

По технике проведения испытаний можно выделить сквозное ультразвуковых прозвучивание, когда датчики располагают с разных сторон тестируемого образца, и поверхностное прозвучивание, когда датчики расположены с одной стороны.

Метод сквозного ультразвукового прозвучивания позволяет, в отличие от всех остальных методов неразрушающего контроля прочности, контролировать прочность не только в приповерхностных слоях бетона, но и прочность тела бетона конструкции.

Ультразвуковые приборы могут использоваться не только для контроля прочности бетона, но и для дефектоскопии, контроля качества бетонирования, определения глубины. Скорость распространения ультразвука в бетоне велика, до 4500 м/с.

Градуировочную зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона на сжатие определяют предварительно для конкретного состава бетона. Это связано с тем, что применение 2-х градуировочных зависимостей для бетонов других или неизвестных составов может привести к ошибкам в определении прочности. На зависимость «прочность бетона - скорость ультразвука» влияют следующие факторы, колебания которых нужно учитывать при применении ультразвукового метода контроля:

- количество и зерновой состав заполнителя;
- изменение расхода цемента более, чем на 30%;
- способ приготовления бетонной смеси;
- степень уплотнения бетона;
- напряженное состояние бетона.

Ультразвуковой метод позволяет осуществлять массовые испытания изделий любой формы многократно, вести непрерывный контроль нарастания или снижения прочности. Недостатком метода является погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным. Нельзя ультразвуковые приборы использовать для контроля качества высокопрочных бетонов, ультразвуковые приборы нельзя использовать для контроля качества высокопрочных бетонов, т.е. диапазон контролируемых прочностей ограничивается классами В7,5...В35 (10...40 МПа) согласно ГОСТ 17624-87. Метод сквозного ультразвукового прозвучивания позволяет контролировать прочность не только в приповерхностных слоях бетона, но и прочность тела бетона конструкции.

### **Акустические методы неразрушающего контроля**

Основаны на регистрации и анализе параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте контроля. Объектом контроля могут быть материалы, полуфабрикаты и готовые изделия. Когда используются волны ультразвукового диапазона, методы можно назвать ультразвуковыми. Методы акустического контроля основаны на свойстве упругих волн создавать тесные связи с некоторыми свойствами материалов (анизотропией, плотностью, упругостью и др.) Поскольку акустические свойства твердых веществ и воздуха значительно разнятся, становится возможным выявление с помощью акустических методов неразрушающего контроля малейших дефектов, определение качества шлифовки и толщины поверхностей.

Сфера применения акустических методов довольно широка. Идею, связанную с регистрацией и анализом параметров упругих волн используют ультразвуковые дефектоскопы. Их применение имеет широкую область: все, проводящие акустические волны материалы. Методы контроля делятся на активные и пассивные, в зависимости от характера взаимодействия с контролируемым объектом. В первом случае исследуются волны, которые возникают в самом объекте, в этом случае по шумам работающего устройства можно сказать о его исправности, неисправности и даже определить характер неисправности. К активным методам от-



носятся способы, базирующиеся на измерении интенсивности пропускаемого или отражаемого объектом акустического сигнала.

Акустические методы неразрушающего контроля используются для обнаружения как внутренних, так и поверхностных дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры, межкристаллитной коррозии, дефектов склейки, пайки, сварки и т.п.). Этот метод дает возможность измерять геометрические параметры, когда доступ к изделию затруднен, а также физико-механические свойства металлов и изделий из них без их разрушения. Методы звукового диапазона (импедансный, свободных колебаний и др.) методы ультразвукового диапазона (эхоимпульсный, резонансный, теневой, эмиссионный, велосиметрический).

### **Магнитные методы неразрушающего контроля**

Магнитные методы неразрушающего контроля предполагают анализ взаимодействия контролируемого объекта с магнитным полем. Физические основы магнитного контроля заключаются в использовании магнитных свойств материалов, в частности, размагничивающего фактора, магнитного сопротивления и преломления магнитных силовых линий. Их используют чаще всего для обнаружения внутренних и поверхностных дефектов объектов, выполненных из ферромагнитных материалов.

Основные магнитные методы неразрушающего контроля – магнитопорошковый, феррозондовый, индукционный и магнитографический метод. Самый распространенный из способов неразрушающего контроля – магнитопорошковый. Он основывается на явлении неоднородности магнитного поля над местом дефекта. Чтобы произвести контроль магнитопорошковым методом, готовят сначала поверхность контролируемого объекта, намагничивают ее и обрабатывают магнитной суспензией. Металлические частицы в неоднородном магнитном поле над повреждением притягиваются друг к другу, образуя цепочные структуры, которые сразу выявляются при осмотре деталей.

Магнитно-порошковый метод широко применяется на заводах промышленности, ремонтных предприятиях. Он дает возможность выявить поверхностные трещины, микротрещины, волосовины, флокены и другие дефекты.

Остальные методы имеют схожий принцип, только вместо магнитного порошка в разных случаях для создания и регистрации магнитного поля используется катушка индуктивности (индукционный метод), магнитная лента и датчик с магнитной головкой (магнитографический метод), феррозондовый датчик, который регистрирует поля рассеивания ( феррозондовый метод).

Магнитографический метод чаще всего используют для контроля сварных соединений. Он дает возможность выявлять трещины, непровары, шлаковые и газовые включения и другие дефекты в сварных швах. Феррозондовый метод используется для обнаружения тех же дефектов, что и магнитопорошковый метод. Он позволяет также определять дефекты на глубине до 20 мм, с его помощью измеряют толщину листов и стенки сосудов, при наличии двухстороннего доступа.

### **Метод контроля проникающими веществами**

Метод неразрушающего контроля проникающими веществами (молекулярный) связан с проникновением в полость дефекта объекта, подлежащего контролю, специальных веществ. Этот метод называют капиллярным, когда речь идет о выявлении малозаметных трещин на поверхности, а при поиске сквозных способ называют «метод течеискания». При применении этого метода дефекты, окрашенные индикаторной жидкостью (пенетрантом), выявляются либо визуально, либо с помощью преобразователей.

Первоначально поверхность контролируемого объекта очищают механическим и/или химическим методом, затем наносят на нее индикаторную жидкость, заполняющую полости дефектов. Излишки пенетранта удаляют. На поверхность наносят проявитель, который выявляет признаки дефектов. Этот метод высокочувствительный, он обеспечивает простоту контроля и наглядность результатов, поэтому его применяют не только для обнаружения, но и для подтверждения дефектов, обнаруженных другими методами –ультразвуковым, магнитным и вихревых токов и другими. Из капиллярных методов наиболее распространены цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующих частиц, радиоактивных жидкостей.

Методы течеискания базируются на регистрации индикаторных жидкостей и газов, которые проникают в сквозные дефекты контролируемого объекта. Широкое применение они нашли для контроля герметичности работающих под давлением сварных сосудов, баллонов, трубопроводов, гидро-, топливо-, масляных систем силовых установок и т.п.

Наиболее известные методы течеискания: гидравлическая опрессовка, аммиачно-индикаторный метод, фреонов, масс-спектрометрический, пузырьковый, с помощью гелиевого и галоидного течеискателей. Течеискание с помощью радиоактивных веществ значительно повлияло на эффективность метода в сторону ее увеличения.

### **Вихретоковые методы контроля**

Вихретоковые методы неразрушающего контроля предполагают исследование взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимым в объекте контроля (с частотой до 1 млн. Гц), плотность которых зависит от свойств материала.

Этот метод служит для контроля объектов, изготовленных из проводников тока. Метод позволяет получить информацию о химическом составе и геометрическом размере изделия, о структуре материала, из которого объект изготовлен, и обнаружить дефекты, залегающие на поверхности или в подповерхностном слое (на глубине 2-3 мм). Наиболее часто используемый прибор этого метода – вихретоковый дефектоскоп. Принцип контроля – следующий: катушка индуктивности возбуждает в объекте контроля вихревые токи, их регистрирует приемные измеритель, в роли которого выступает та же самая или другая катушка. Интенсивность распределения токов в контролируемом объекте дает возможность судить о размерах изделия, свойствах материала, наличии несплошностей.

Основными методами вихретокового контроля также являются метод рассеянного излучения, который построен на регистрации рассеянных волн или частиц, отраженных от дефекта, и эхо-метод, или метод отраженного излучения, базирующийся на регистрации отраженных от дефекта поля и волны.

На основе метода вихревых токов разработаны и широко применяются приборы для измерения толщины листов и покрытий, диаметра проволоки и прутков. Этот метод применяется для профилактического контроля лопаток турбин газотурбинных двигателей, сварных и литых узлов элементов конструкций и др.

### **Вибродиагностический метод контроля**

Это один из самых современных методов неразрушающего контроля. Он дает возможность следить за состоянием оборудования, не останавливая работу и не прерывая производственный процесс. Вибродиагностический метод контроля базируется на анализе вибрации, которая возникает при работе оборудования. Поскольку любая вибрация - это колебания, она представляет собой совокупность различных частот, которые можно изучить, узнать их амплитуды и по этим показателям определить, в каком состоянии находится оборудование. Конечно, всю эту информацию собирают с помощью высокочувствительной аппаратуры.

Вибродиагностический метод используют при контроле работы оборудования, имеющего в конструкции подшипники качения, гидрооборудование, колесно-редукторные блоки. С помощью этого метода регулярно производят диагностику цилиндров низкого давления, паровых турбин, «кручения» ригелей фундаментов турбин, статорных систем и т.д. Вибродиагностика применяется в энергодобывающих компаниях, на железнодорожном и морском транспорте и в области жилищно-коммунального хозяйства. Этот метод диагностики позволяет проводить вибрационный контроль и мониторинг вращающегося оборудования, осуществлять тестовую диагностику и центровку машин, балансировку машин на месте эксплуатации, диагностику механических передач, электрических машин, выявлять дефекты подшипников скольжения и качения, ременных и зубчатых передач, дефекты компрессоров, насосов и вентиляторов, этому способу диагностики под силу даже обнаружить дефекты смазки.

### **Электрический метод неразрушающего контроля**

Электрические способы неразрушающего контроля построены на регистрации и анализе параметров электрического поля, взаимодействующего с проверяе-

мым объектом или возникающего в результате воздействия извне. Информативные параметры для контроля в первую очередь, - это потенциал и емкость. Для контроля проводниковых материалов используют эквипотенциальный метод, контроль проводников и диэлектриков производят с помощью емкостного метода, химический состав материала можно определить с помощью термоэлектрического метода. Помимо перечисленных способов электрического неразрушающего контроля существуют методы электронной эмиссии, электроискровой, электростатического порошка, трибоэлектрический, термоэлектрический. Электрические методы неразрушающего контроля дают возможность выявить раковины и другие дефекты в отливках, расслоения в металлических листах, различные дефекты сварных и паяных швов, трещины в металлических изделиях, растрескивания в эмалевых покрытиях и органическом стекле. Помимо этого электрические способы контроля используются для сортировки деталей, измерения толщин пленочных покрытий, проверки химического состава и определения степени термообработки металлических изделий.

### **Тепловой метод неразрушающего контроля**

Тепловые методы неразрушающего контроля используют регистрацию тепловых полей, температуры или теплового контраста для анализа состояния изучаемого объекта. Ведь температурное поле есть следствие происходящих в объекте процессах теплопередачи. Особенности этих процессов зависят от наличия дефектов (как внутренних, так и наружных). Параметр, который дает основную информацию о неблагополучии - разность температур между областями с дефектом и бездефектными областями исследуемого объекта. Температуру измеряют контактным и бесконтактным методом. Помимо измерения температур тепловые методы дают информацию о нарушениях сплошности, дефектах пайки многослойных соединений. Приборы, которые используются при осуществлении контроля – термоиндикаторы, пирометры, инфракрасные микроскопы и радиометры.

Тепловые методы контроля используются в основном в приборостроении для контроля радиоэлектронной аппаратуры.

### **Радиоволновые методы неразрушающего контроля**

Радиоволновые методы неразрушающего контроля базируются на анализе изменения параметров электромагнитных колебаний, которые взаимодействуют с контролируемым объектом. Эти методы применяются для контроля диэлектриков, полупроводников, магнитодиэлектриков или тонкостенных объектов из металла – то есть тех объектов, которые изготовлены из материалов, не заглушающих радиоволны. Эти методы применяются для контроля качества и геометрических размеров изделий из стеклопластики и пластмассы, резины, термозащитных и теплоизоляционных материалов, фибры).

Радиоволновые методы неразрушающего контроля разделяют на несколько групп по характеру взаимодействия объекта с волной: прохождения, отражения и рассеивания; по параметру, который взят за основу при исследованиях: фазовые, геометрические, амплитудно-фазовые и поляризационные. Это весьма перспективные методы, пока не нашедшие должного применения в промышленности. Они дают возможность обнаружить непрочности, расслоения, воздушные включения, трещины, неоднородности по плотности, напряжения, с их помощью можно измерять геометрические размеры и т.п.

### **Радиационные методы неразрушающего контроля**

Эти методы включают в себя регистрацию и анализ взаимодействующего с объектом проникающего ионизирующего излучения. Название «радиационные» может меняться на «рентгеновские», «нейтронные» и другие в зависимости от вида ионизирующего излучения. Чаще всего для контроля используется гамма- и рентгеновское излучение. Работа большинства методов основывается на том, что в местах дефектов возрастает плотность потока излучения. Радиационные методы неразрушающего контроля используют при контроле качества сварных и паяных швов, литых, определения качества сборочных работ, выяснения состояния закрытых полостей агрегатов и т.п. Наиболее распространенные радиационные методы – это рентгенография, рентгеноскопия и гамма-контроль.

### **Оптические методы**

Оптические методы неразрушающего контроля регистрируют и анализируют параметры, присущие взаимодействующему с объектом оптическому излуче-

нию. Эти методы дают возможность обнаруживать пустоты, поры, расслоения, трещины, инородные включения, геометрические отклонения и внутренние напряжения в объектах контроля.

Наружный оптический контроль применяют для обнаружения дефектов практически любого из материалов. Внутренние дефекты с помощью этого метода можно обнаружить только в прозрачных материалах. Также производится контроль диаметров и толщины с помощью оптического способа, базирующегося на явлении дифракции. Шероховатость и сферичность выявляют методы, основанные на явлении интерференции.

Преимущества оптических методов неразрушающего контроля в их простоте, применении несложного оборудования и относительно небольшой трудоемкости. Поэтому они нашли применение на различных стадиях изготовления деталей и элементов конструкций.

Оптические приборы обладают невысокой чувствительностью и достоверностью, поэтому используются только для определения достаточно крупных трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, открытых раковин, забоин. Они применяются также для обнаружения течей, загрязнений, наличия посторонних предметов и т.д.

## **РАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ КАК ОСНОВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ**

Все неразрушающие методы основаны на измерении косвенной характеристики. Необходимым условием является достаточная точность её измерения и точность связи с определяемой прочностью в конструкциях. Прочность бетона определяют по предварительно установленным градуировочным зависимостям между прочностью бетонных образцов по ГОСТ 10180 и косвенными характеристиками прочности. Градуировочные зависимости могут быть представлены в виде графика, в табличной форме или формулой.

В практике обследования и испытания зданий и сооружений используются следующие методы контроля:

- механические (разрушающие) методы испытания
- физические (неразрушающие) методы испытания материалов и конструкций

В процессе обследования отбирают образцы бетона для проведения в лабораторных условиях физико-механических и физико-химических исследований.

Количество образцов бетона, отбираемых для дальнейших физико-химических исследований, должно составлять *не менее трех* из каждой генеральной совокупности. Кроме того, дополнительно отбирают образцы (не менее трех) на участках, где состояние конструкций отличается от состояния основной массы однотипных элементов. Если по результатам определения показателей (глубины нейтрализации, величины pH и т. д.) значения, установленные на основе испытаний трех образцов одной партии, отличаются между собой более чем на 30%, из этой конструкции дополнительно отбирают не менее шести образцов.

**Метод извлечения образцов** выбирают в зависимости от вида испытания, массивности сооружения и наличия инструментов, способных обеспечить извлечение образцов и целостность исследуемой конструкции.

Отбор образцов бетона из существующих конструкций производится отколом, выпиливанием или высверливанием. Для выпиливания используют участки конструкций без арматуры.

**Глубина отбора** проб бетона назначается с учетом результатов колориметрических испытаний. Размер проб должен выбираться с учетом максимальной крупности заполнителя.

Взятые пробы бетона для химических исследований должны сразу помещаться в полиэтиленовые пакеты или бюксы и герметизироваться. Масса каждого образца назначается в зависимости от видов намеченных исследований.

При лабораторных исследованиях образцов, отобранных из **железобетонных конструкций**, определяют: прочность, влажность, водопоглощение и пористость бетона; щелочность бетона, водорастворимость компонентов, содержание ионов SO<sub>4</sub>, Cl и других веществ; расчетные параметры стальной арматуры.



Определение **прочности бетона** производят испытанием на сжатие образцов, извлеченных из конструкций (кубов, цилиндров).

Результаты испытания приводят к кубиковой прочности бетона умножением на коэффициент, определяемый по соотношению прочности бетона кернов (соответствующих по форме и размерам кернам, отобранным из конструкций), высверленных из кубов, и прочности самих кубов.

При определении **прочности бетона ультразвуковым методом, методом пластической деформации или упругого отскока** требуется обязательная привязка градуировочных зависимостей параллельным испытанием отобранных образцов или методом местных разрушений для конкретных групп или участков конструкций.

Определение прочности бетона ультразвуковым методом проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

Стандарт распространяется на конструкционные тяжелый, легкий и плотный силикатный бетоны сборных и монолитных бетонных и железобетонных изделий, конструкций и сооружений и устанавливает ультразвуковой импульсный метод определения прочности бетона классов В7,5 - В35 (марок М100 - М400) на сжатие, в том числе в процессе твердения бетонов в тепловых установках (кроме бетонов, изготавливаемых автоклавной обработкой) или в естественных условиях.

Определение прочности бетона монолитных конструкций проводят только способом сквозного прозвучивания.

Контроль прочности бетона конструкций проводят по ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Ультразвуковой метод применяют для определения отпускной, передаточной прочности, прочности бетона в установленном нормативно-технической и проектной документацией промежуточном и проектном возрастах, прочности бетона в процессе его твердения, а также при экспертном контроле.

Ультразвуковой метод основан на связи между скоростью распространения ультразвуковых колебаний и его прочностью.

Ультразвуковые измерения в бетоне проводят способами сквозного или поверхностного прозвучивания.

При измерении времени распространения ультразвука способом сквозного прозвучивания ультразвуковые преобразователи устанавливают с противоположных сторон образца или конструкции в соответствии с рис. 1 а.

Скорость ультразвука ( $v$ ) в метрах в секунду вычисляют по формуле

$$v = \frac{l}{t} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где  $t$  - время распространения ультразвука, мкс;

$l$  - расстояние между центрами установки преобразователей (база прозвучивания), мм.

При измерении времени распространения ультразвука способом поверхностного прозвучивания ультразвуковые преобразователи устанавливают на одной стороне образца или конструкции в соответствии с рис. 1 б.

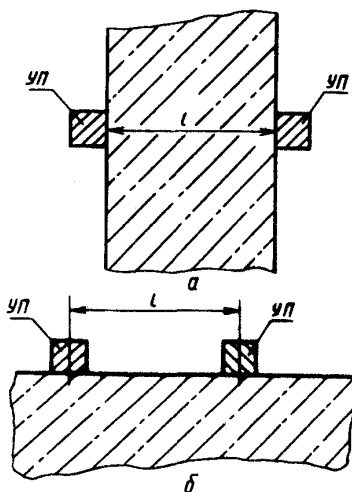


Рис. 1. Способы прозвучивания образцов

а - схема испытания бетона способом сквозного прозвучивания; б - схема испытания бетона способом поверхностного прозвучивания; УП - ультразвуковые преобразователи;  $l$  - база прозвучивания

Прочность бетона в конструкциях определяют по экспериментально установленным градуировочным зависимостям «скорость распространения ультразвука - прочность бетона» («скорость - прочность») или «время распространения ультразвука - прочность бетона» («время - прочность») в зависимости от способа прозвучивания.

Прочность бетона определяют на участках конструкций, не имеющих видимых повреждений (отслоения защитного слоя, трещин, каверн и др.).

Ультразвуковые испытания проводят при положительной температуре бетона.

Допускается проведение ультразвуковых испытаний конструкций при отрицательных температурах бетона не ниже минус 10 °С при условии, что в процессе их хранения относительная влажность воздуха не превышала 70 %.

Ультразвуковые измерения проводят при помощи приборов, предназначенных для измерения времени распространения ультразвука в бетоне и аттестованных в установленном порядке по ГОСТ 8.383\*, предел допускаемой абсолютной погрешности измерения времени распространения ультразвука на стандартных образцах, входящих в комплект прибора, не должен превышать значения

$$\Delta = \pm (0,01t + 0,1), \quad (2)$$

где  $t$  - время распространения ультразвука, мкс.

Градуировочная зависимость «скорость - прочность» устанавливается при испытании конструкций способом сквозного прозвучивания. Градуировочная зависимость «время - прочность» устанавливается при испытании конструкций способом поверхностного прозвучивания.

Допускается при испытании конструкций способом поверхностного прозвучивания использовать градуировочную зависимость «скорость - прочность» с учетом коэффициента перехода. Коэффициенты перехода ( $K$ ) от скорости ультразвука при поверхностном прозвучивании к скорости при сквозном прозвучивании устанавливают в период подготовки к проведению испытаний конструкций и не реже одного раза в год (Приложение 3, ГОСТ 17624).

Градуировочную зависимость устанавливают по результатам ультразвуковых измерений в бетонных образцах-кубах и механических испытаний тех же образцов.

Механические испытания образца проводят по ГОСТ 10180 непосредственно после ультразвуковых измерений.

При необходимости проведения ультразвуковых испытаний бетона конструкций непосредственно после термообработки (горячего) для определения отпускной прочности бетона этих конструкций после их остывания, допускается устанавливать градуировочную зависимость в этом случае по результатам ультразвуковых измерений горячих образцов и механических испытаний тех же образцов после их остывания.

Градуировочные зависимости устанавливают отдельно по каждому виду нормируемой прочности, для чего используют не менее 15 серий образцов-кубов.

При установлении градуировочной зависимости для приемочного контроля образцы изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 в разные смены в течение не менее 3 сут из бетона того же номинального состава, по той же технологии, при том же режиме твердения, что и конструкции, подлежащие контролю.

В случае применения на производстве способов и режимов уплотнения бетона конструкций, приводящих к изменению его состава за счет отжатия воды затворения, способ приготовления образцов должен указываться в нормативно-технической или проектной документациях на эти конструкции.

Допускается изготовление до 40 % общего числа образцов из бетонной смеси, состав которой отличается от номинального по цементно-водному отношению не более 0,4.

При определении прочности бетона в процессе его ускоренного твердения для установления градуировочной зависимости в тепловую установку помещают образцы, число которых равно числу промежутков времени, на которое разбивают период изотермического прогрева. На каждом из этих этапов испытывают по одной серии образцов. Например, если период изотермического прогрева разбит на равные четыре промежутка времени, то в тепловую установку закладывают четыре серии образцов.

При установлении градуировочной зависимости для определения прочности бетона в процессе естественного твердения сроки испытаний образцов должны выбираться из следующего параметрического ряда: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365

сут. Образцы испытывают не менее чем в трех возрастах, один из которых является проектным. В каждом возрасте испытывают не менее 4 серий образцов.

Время распространения ультразвука в образцах при установлении градуировочной зависимости «скорость - прочность» измеряют способом сквозного прозвучивания в соответствии с рис. 2.

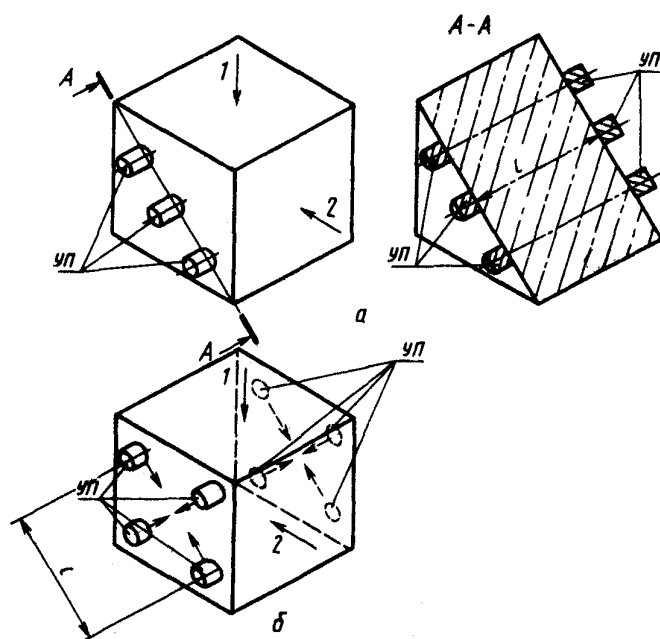


Рис. 2. Схема установки УП при различных способах прозвучивания  
а - схема испытания кубов способом сквозного прозвучивания; б - схема испытания кубов способом поверхностного прозвучивания; УП - ультразвуковые преобразователи; 1 - направление формования; 2 - направление испытания при сжатии; л - база прозвучивания

База прозвучивания должна быть не менее 100 мм. Допускается базу прозвучивания снизить до 70 мм при проведении контроля мелкозернистых бетонов и бетона на ранних стадиях твердения (скорость ультразвука менее 2000 м/с).

Время распространения ультразвука в образцах при установлении градуировочной зависимости «время - прочность» измеряют способом поверхностного прозвучивания в соответствии с рис. 2.

Минимальная база прозвучивания должна быть не менее 120 мм.

Время распространения ультразвука следует измерять на поверхности, занимающей при изготовлении то же положение относительно формы и направления формования, что и контролируемая поверхность изделия.

Число измерений времени распространения ультразвука в каждом образце должно быть при сквозном прозвучивании 3, при поверхностном прозвучивании - 4.

Отклонение отдельного результата измерения времени распространения ультразвука в каждом образце от среднеарифметического значения результатов измерений для данного образца не должно превышать 2 %.

Градуировочную зависимость устанавливают по единичным значениям скорости (времени) ультразвука и прочности бетона.

За единичное значение прочности бетона принимают среднюю прочность бетона в серии образцов, определенную по ГОСТ 10180.

За единичное значение скорости (времени) ультразвука принимают среднеарифметическое значение этих величин в серии образцов, используемых для определения единичного значения прочности.

Данные испытаний и результат определения средней арифметической величины времени прохождения ультразвука заносят в табл. 1.

Проводят механические испытания образцов. Для этого их устанавливают строго в центре плиты пресса и прикладывают нагрузку с такой скоростью, чтобы разрушение образца происходило не ранее 30 с с начала нагружения. Величину усилия нагружения также заносят в табл. 1.

Определяют прочность бетона в каждом испытываемом образце  $R_i$ , принимая ее за результат испытания серии образцов.

Таблица 1

№ образцов	Геометрические размеры, см			Масса образца, кг	Ультразвуковые испытания			Механические испытания		
	длина	ширина	высота		Время прожд. ультразвука, мкс		Средняя скорость прожд. ультразвука, м/с	Разрушающее усилие, кгс	Предел прочности при сжатии, МПа	
					отдельное	среднее			фактический	с учетом масшт. коэф
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Установление, проверку градуировочной зависимости и оценку ее погрешности проводят в соответствии со следующей методикой.

Градуировочную зависимость устанавливают в виде графика, настроенного по уравнениям, которые принимают:

а) линейного вида

$$R_{н'} = a_0 + a_1 V; \quad (3)$$

при  $R_{\max} - R_{\min} \leq 2\bar{R}_\phi (60 - \bar{R}_\phi) / 100;$

б) экспоненциального вида

$$R_{\cdot} = b_0 e^{b_1 V}, \quad (4)$$

где  $V$  – скорость распространения ультразвука;

$R_{\cdot}$  – прочность, определяемая по уравнениям (3) и (4)

### 6.3. Величины коэффициентов

$$a_0 = \bar{R}_\phi - a_1 \bar{V}; \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{R}_\phi - R_{j\phi})(\bar{V} - V_j)}{\sum_{j=1}^N (\bar{V} - V_j)^2}; \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{V} - V_j)(\ln \bar{R}_\phi - \ln R_{j\phi})}{\sum_{j=1}^N (\bar{V} - V_j)^2}; \quad (7)$$

$$b_0 = e^{\ln \bar{R}_\phi - b_1 \bar{V}}; \quad (8)$$

В формулах (5) – (8)

$$\bar{R}_\phi = \frac{\sum_{j=1}^N R_{j\phi}}{N}; \quad (9)$$

$$\bar{V} = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N}; \quad (10)$$

$$\ln \bar{R}_\phi = \frac{\sum_{j=1}^N \ln R_{j\phi}}{N}, \quad (11)$$

где  $\overline{R_\phi}$  – средняя прочность отдельных образцов.

Корректировку установленной градуировочной зависимости проводят путем отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию

$$\frac{|R_{jn} - R_{j\phi}|}{S} \leq 2, \quad (12)$$

где  $S$  – остаточное среднеквадратичное отклонение,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (R_{j\phi} - R_{jn})^2}{N - 2}}, \quad (13)$$

где  $R_{jn}$  – прочность бетона в  $j$  - й серии образцов, определенная по градуировочной зависимости

$$R_{jn} = \begin{cases} a_0 + a_1 V_j & \text{для зависимости (3);} \\ b_0 e^{b_1 V_j} & \text{для зависимости (4).} \end{cases}$$

После отбраковки градуировочную зависимость устанавливают заново по оставшимся результатам испытаний.

Корректировку градуировочной зависимости проводят до тех пор, пока все единичные результаты испытаний станут удовлетворять условию (13)

Для скорректированной зависимости по всем образцам серии строят график градуировочной зависимости (рис. 3)

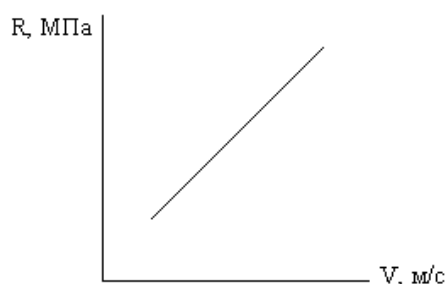


Рис. 3. График градуировочной зависимости

Этим графиком и пользуются при проведении испытаний бетона в конструкциях, производя периодическую его поверку не реже одного раза в два месяца.



При проверке градуировочной зависимости готовят не менее 6 серий образцов. Для каждой серии по описанной методике определяют единичные значения скорости ультразвука  $V_j$  и прочности  $R_{j\phi}$ . В соответствии с единичным значением скорости ультразвука  $V_j$  по градуировочной зависимости определяют прочность  $R_{jn}$ .

Вычисляют среднее значение скорости ультразвука  $\bar{V}$  всех образцов, испытанных для проверки градуировочной зависимости.

Разделяют серии образцов на две группы. К первой – относят серии образцов, единичные значения скорости ультразвука которых не превышают  $\bar{V}$ . Все остальные серии относят ко второй группе.

Градуировочная зависимость допускается к дальнейшему применению при одновременном выполнении следующих трех условий:

а) разность  $R_{j\phi} - R_{jn}$  не имеет одинакового знака в пяти из шести последовательных серий образцов;

$$\text{б) } S_n < 1,5 S_m,$$

$$\text{где } S_n = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (R_{j\phi} - R_{jn})^2}{n-1}}; \quad (14)$$

$n$  – число серий образцов, испытанных для проверки градуировочной зависимости;

в) разность  $R_{j\phi} - R_{jn}$  не имеет одинакового знака для серий образцов первой и второй групп.

При невыполнении хотя бы одного из приведенных условий градуировочную зависимость устанавливают заново.

Градуировочную зависимость устанавливают заново при изменении номинального состава бетона по ГОСТ 27006.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЛИ ПОВЕРХНОСТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

*Неразрушающие методы (второй метод)*, предполагают использование малогабаритных приборов, с большим набором сервисных функций, имеющих канал инфракрасной связи с компьютером. Обработка измеряемых параметров производится с помощью компьютерных программ, что обеспечивает высокую достоверность измерений. Что касается приборов, для определения прочностных характеристик материала конструкций, используемых ведущими зарубежными фирмами, то в них заложен тот же принцип косвенных измерений и методологический подход, что и в наших приборах. Отличие только в наборе сервисных услуг и обработке результатов измерений.

Основным критерием при выборе методов и средств измерений, является допустимая предельная погрешность измерений, простота и удобство работы, регистрация и обработка результатов. Рассмотрим кратко используемые при обследовании методы определения прочности в конструкциях, рекомендуемые нормативными документами (ГОСТ).

Приборами механического действия нельзя установить прочность бетона внутри конструкции или изделия. Поэтому следует сочетать контроль прочности бетона приборами механического действия с ультразвуковым методом определения прочности.

Соотношение между прочностью бетона и показателями неразрушающих испытаний устанавливают опытным путем и представляют в виде градуировочной зависимости (кривой или прямой). Для построения градуировочной зависимости используют результаты параллельных испытаний бетонных образцов неразрушающими и разрушающими методами. Градуировочную зависимость применяют, если значение средней квадратической погрешности  $S_T$  не превышает 0,12;  $S_T$  вычисляют по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{n_c - 1} \sum \left( \frac{R_c}{R_T} - 1 \right)^2}, \quad (1)$$

где  $R_c$  - фактическая средняя прочность бетона на сжатие в серии образцов;

$R_T$  - прочность бетона по градуировочной зависимости, соответствующая фактической прочности  $R_c$  для того же показателя неразрушающего испытания;

$n_o$  - число испытанных серий образцов.

Градуировочную зависимость строят для контроля качества бетона в конструкциях или изделиях одной проектной марки, одного состава, единой технологии приготовления и укладки бетонной смеси, одного режима твердения бетона. Для построения такой зависимости при применении методов упругого отскока или пластических деформаций используют результаты испытания не менее 48 образцов.

Испытание прочности бетона в конструкциях и изделиях приборами механического действия производят методами: упругого отскока, пластической деформации, отрыва со скалыванием.

*Метод упругого отскока* основан на зависимости между твердостью поверхностного слоя бетона и его прочностью на сжатие. Этот метод давно известен и широко применяется для определения твердости металлов. Теоретические основы метода разработаны Д. Б. Гогоберидзе и другими авторами.

При измерениях указанным методом мерой твердости является высота отскока бойка  $h_2$ , падающего с постоянной высоты  $h_1$ . Энергия падения подбирается таким образом, чтобы в месте удара напряжения были больше предела упругости. Чем больше  $h_2$ , тем выше ударная твердость материала, определяемая его упругими свойствами. Кинетическая энергия бойка прибора при испытании расходуется на работу пластической деформации образца  $A_1$ ; работу упругого сжатия материала  $A_2$ ; работу сил трения при ударе и в приборе при падении  $A_3$ ; работу диспергирования  $A_4$ ; работу преодоления сопротивления воздуха  $A_5$ ; работу, затрачиваемую на вибрацию образца и

опор  $A_6$ . Поскольку  $A_3, A_4, A_5$  и  $A_6$  очень малы, высота отскока в основном определяется соотношением между  $A_1$  и  $A_2$ .

Потеря энергии при  $\Delta E_k$  может быть определена из следующей зависимости:

$$\Delta E_k = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\frac{mv_1^2}{2}$  - кинетическая энергия в момент удара и  $\frac{mv_2^2}{2}$  - кинетическая энергия в момент отскока;

Скорости бойка в момент удара  $v_1$  и в момент отскока  $v_2$  могут быть вычислены по формулам

$$v_1 = \frac{mv_1^2}{2} \left( 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) = \frac{mv_1^2}{2} \left( 1 - \frac{h_2}{h_1} \right), \quad (3)$$

или

$$\Delta E_k = \frac{mv_1^2}{2} (1 - K^2), \quad (4)$$

где  $K = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$  - коэффициент восстановления.

Величина  $K$  всегда меньше единицы и с ростом пластической деформации уменьшается. Если при падении бойка пластической деформации не происходит, то  $h_2 \approx h_1$ .

Следовательно, сущность метода упругого отскока заключается в том, что специальный боек определенной массы при помощи пружины с заданными жесткостью и предварительным напряжением ударяет по концу металлического стержня - ударника, прижатого другим концом к поверхности испытываемого бетона. В результате удара боек отскакивает от ударника. Высота отскока отмечается на шкале прибора при помощи специального указателя. Зависимость между высотой отскока и прочностью бетона устанавливают опытным путем.

Склерометры (рис.1), применяемые для испытания методом упругого отскока, по их ударной энергии делят:

- на молотки с ударной энергией 0,736 Дж, применяемые для определения прочности бетона марки 100 и ниже, а также для тонкостенных конструкций;

- на молотки с ударной энергией 2,207 Дж, применяемые для определения прочности бетона железобетонных конструкций и изделий средней массивности;

- на молотки с ударной энергией 29,43 Дж, применяемые для определения прочности бетона в дорожных покрытиях, мостовых и массивных сооружениях.

Испытание проводят следующим образом. Ударник склерометра приставляют перпендикулярно поверхности испытываемого бетона. При постепенном нажатии ударник взводит пружину бойка и затем автоматически ее освобождает, что вызывает удар. Боек после удара отскакивает. Высоту отскока показывает специальный указатель на шкале.

Вычисляют среднее значение пяти отскоков, измеренных на одном участке. Частные значения, отклоняющиеся от среднего более чем на  $\pm 15\%$ , не учитывают и производят новые испытания, пока не получают пять примерно равноценных частных результатов. Среднее значение умножают на соответствующий показатель, выбираемый из инструкции по использованию данного типа склерометра в зависимости от положения ударника. В дальнейшем это приведенное среднее значение отскока называется характерным для испытанного места. Затем по градуировочной зависимости определяют прочность бетона на данном участке испытания.

*Метод пластической деформации* состоит в том, что о прочности бетона судят по пластическим деформациям (отпечаткам), полученным от вдавливания в поверхность бетона стальных шариков, дисков или штампов. Для испытания методом пластических деформаций используют приборы трех типов:

- ударные молотки с эталонным стержнем (рис. 2) - эталонные молотки; при этом отпечаток на бетоне сравнивают с отпечатком на контрольном стержне: по их отношению судят о прочности бетона;

- ударные молотки (рис. 3) с заданной массой и энергией удара - шариковые молотки и маятниковые приборы; при этом о прочности бетона судят непосредственно по диаметру отпечатка на поверхности материала;

- гидравлические штампы; при этом типе прибора о прочности бетона судят по размеру вмятины на его поверхности. Вдавливание штампа осуществляется плавно с помощью гидравлического пресса.

Испытание проводят путем нанесения серии ударов или вдавливания штампа в поверхность бетона на выбранных участках конструкции или изделия в соответствии с инструкцией, прилагаемой к данному прибору.

При использовании ударных молотков и гидравлических штампов за результаты испытания принимают среднее значение 5 оттисков, если частные результаты отклоняются от среднего не более чем на  $\pm 25\%$ .

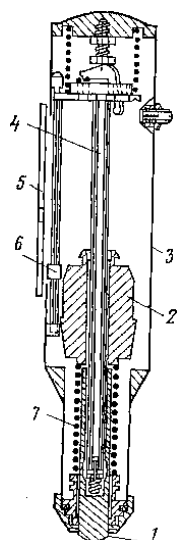


Рис. 1. Склерометр

1-ударник; 2-боек; 3-корпус; 4-направляющий стержень; 5-шкала; 6-указатель; 7-пружина

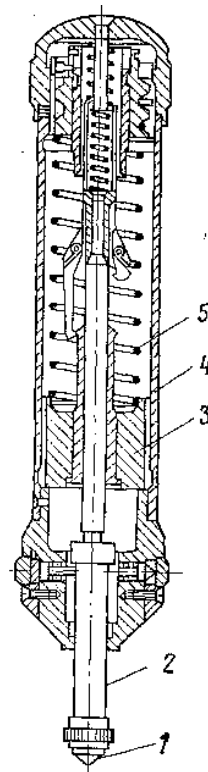


Рис.2. Шариковый молоток

1-шарик; 2-ударник; 3-боек; 4-корпус; 5-пружина

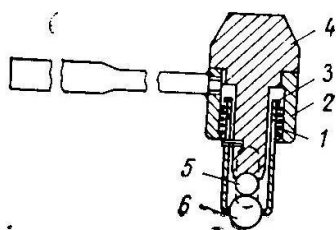


Рис.3. Эталонный молоток

1-пружина; 2-корпус; 3- стакан;  
4- головка; 5-эталонный стержень; 6- шарик

Значения оттисков, отклоняющиеся от среднего более чем на  $\pm 25\%$ , внимание не принимаются, и в таком случае продолжают испытание до получения примерно равноценных результатов пяти испытаний. Среднее значение пяти равноценных результатов принимают за средний результат испытания (на данном участке поверхности).

*Метод отрыва со скалыванием* предназначен для определения прочности бетона в конструкциях массивных и средней массивности. О прочности бетона судят по усилию, необходимому для вырывания из бетона специального стержня или разжимного конуса (рис. 4).

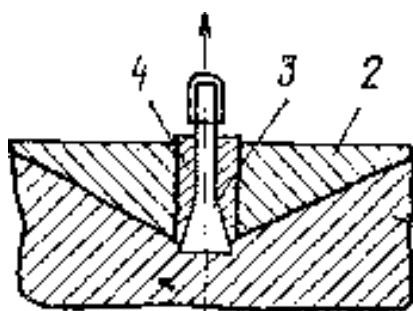


Рис. 4. Испытания бетона на отрыв со скалыванием (вариант с разжимным конусом)

1-бетон конструкции; 2- вырываемый бетон; 3- конус; 4- рифленые щеки

Для испытания на отрыв со скалыванием применяют портативные гидравлические прессы, снабженные образцовыми манометрами и позволяющие вырывать из бетона стержни или разжимные конусы. Применяют три способа испытания: вырывные стержни заделывают в бетон при изготовлении конструкций или изделий; и готовой конструкции высверливают или пробивают вручную отверстия диаметром 25 и глубиной до 55 мм, в отверстие вставляют разжимной конус и производят испытание; в готовой конструкции высверливают отверстие, вставляют вырывной стержень и зачеканивают его цементным тестом, после затвердевания которого производят испытание.

Приборы механического действия, применяемые для контроля прочности бетона, чистят, контролируют и градуируют в сроки, указанные в соответствующих инструкциях. Наряду с описанными выше стандартными приборами для текущего контроля прочности бетона на практике используют и другие приборы

механического действия, допущенные ведомственными нормативными документами.

Прочность бетона определяют по тарировочным кривым. Кривые учитывают положение молотка при испытании, так как величина отскока будет в известной мере зависеть от его направления, поскольку на нее в определенной мере влияет сила тяжести. Среднюю величину отскока вычисляют по данным пяти измерений, выполненных на определенном участке поверхности бетона. При этом частные значения не должны отличаться от среднего более чем на  $\pm 15$  %.

При испытании методами, основанными на механическом воздействии на поверхность бетона, необходимо учитывать тот факт, что при попадании на зерно щебня из плотной прочной породы диаметр отпечатка и высота отскока изменяются, поэтому проводят для каждого участка 5-10 испытаний и результаты, отличающиеся от среднего более чем на 15 %, отбрасывают.

При вдавливании штампа глубина отпечатка обычно невелика и в известной мере отражает свойства поверхностного слоя бетона, которые могут значительно отличаться от свойств его внутренних слоев. Влияет на результаты испытания и шероховатость поверхности бетона. С увеличением прочности бетона глубина вмятин и ее изменение в связи с ростом прочности уменьшаются и соответственно понижается точность испытаний. С увеличением диаметра шарика и усилия вдавливания влияние этих факторов несколько уменьшается.

Более полная оценка получается при измерении высоты упругого отскока, так как на его величину влияют не только поверхность, но в определенной мере и внутренние слои бетона. При применении метода выдергивания результаты испытания определяются в основном свойствами внутренних слоев бетона.

На практике наибольшее распространение получили методы вдавливания шарика и упругого отскока, позволяющие измерять прочность бетона с точностью до 15 - 20 %. Точность может быть повышена при использовании тариро-



вочных кривых, построенных для бетона данного состава и при строго определенных условиях изготовления и испытания изделий и конструкций.

Таким образом, механические методы неразрушающего контроля прочности основаны на том, что прочность бетона при сжатии связана с другими механическими свойствами: твердостью, сопротивлением отрыву, усилием при скалывании небольшого куска бетона.

В зависимости от вида оцениваемого механического свойства используют следующие методы неразрушающих испытаний: пластической деформации; упругого отскока; отрыва (или отрыва со скалыванием); скалывания ребра. Кроме того, в отдельных случаях применяют методы взрыва, забивки и выдергивания стальных деталей, измельчения.

Выбор того или иного метода испытаний бетона зависит от цели испытания (контроль качества изделий на заводе, выборочный или сплошной контроль прочности, испытание конструкций из бетона с неизвестными свойствами), формы и размеров изделий (балки, плиты, колонны, массивные элементы с наклонными поверхностями), вида бетона (тяжелый, ячеистый, на легком заполнителе), а также от требований к точности получаемых результатов и удобству проведения испытаний.

**Метод пластической деформации** – наиболее распространенный – основан на вдавливании в поверхность бетона стального шарика или другого штампа путем удара или приложения статического давления. По показателю твердости бетона, определенного путем измерения размеров отпечатка (лунки), который остался в бетоне после удара, оценивают прочность, пользуясь тарировочной кривой, полученной по данным параллельных испытаний образцов на прочность и твердость.

**Метод упругого отскока** заключается в том, что специальным ударником легко ударяют по плоскому штампу, прижатому к бетону. Величина обратного отскока ударника от штампа характеризует твердость бетона, по которой с помощью тарировочной кривой вычисляют его прочность. Метод упругого отскока, как и метод пластической деформации, основан на измерении поверхностной

твёрдости бетона. Отличие состоит в способе ее измерения, а также в том, что в бетоне не возникают пластические деформации (т. е. не образуется лунка). Для испытания методом упругого отскока применяют пружинные или маятниковые приборы (молотки).

**Метод отрыва** основан на измерении усилия, которое требуется для отрыва небольшого куса бетона вместе с ранее заделанной или приклеенной к его поверхности стальной деталью. В зависимости от прикрепляемых деталей различают два варианта этого метода: отрыв (со скалыванием) при выдергивании анкера, заделанного в бетон, и отрыв плоского диска, приклеенного к бетону.

**Метод скалывания** применяют при наличии в конструкции ребер, на которые можно снаружи установить стальную скобу с выступами высотой 1...3 см. При боковом давлении на скобу скалывается часть ребра глубиной, равной высоте выступов скобы. Усилие, необходимое для скалывания, служит показателем прочности бетона, которую определяют по тарировочной кривой.

Для испытаний методами отрыва и скалывания используют специальные переносные устройства – гидравлические пресс-насосы, которые передают контролируемые усилия от бетона конструкции на анкер, диск (метод отрыва) или скобу (метод скалывания). Применение механических методов неразрушающих испытаний регламентировано ГОСТ 22690.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ**

Из физических методов испытаний широкое распространение получили импульсный акустический, радиометрический и магнитометрический и др. методы. При испытаниях строительных материалов и конструкций физическими методами измерения проводят специальными электронными приборами.

### **УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИСПЫТАНИЯ**

Ультразвуковой импульсный метод испытания применяют для определения упругих характеристик и прочности строительных материалов; изучения

структурных изменений в материале; контроля процесса твердения бетона; обнаружения - и оценки дефектов в материале, в сварных швах и т. д.

Физической основой ультразвукового импульсного метода является связь между скоростью распространения упругих волн и характеристиками материала: его плотностью  $\rho$ , модулем упругости  $E$ , модулем сдвига  $G$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Скорость распространения продольных упругих волн  $v_{np}$  связана с  $\rho$  и  $E$  зависимостью

$$v_{np} = K \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона и размера испытываемого образца или элемента конструкции.

Следовательно, измерив с помощью прибора скорость распространения ультразвука, можно определить модуль упругости:

$$E = K^2 v_{np}^2 \rho, \quad (2)$$

Модуль сдвига может быть вычислен из известного соотношения

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1 + \mu}, \quad (3)$$

либо определен экспериментально по измеренной скорости поперечных волн  $v_n$ :

$$G = v_n^2 \rho. \quad (4)$$

Модуль упругости материала отражает изменения, происходящие в его структуре под влиянием среды или вследствие других причин. Поэтому можно изучать, например, морозостойкость материала, прослеживая с помощью ультразвука изменение модуля упругости в зависимости от числа циклов попеременного замораживания и оттаивания, не прибегая при этом к разрушению образцов.

Ультразвуковой импульсный метод контроля прочности бетона основан также на связи физико-механических характеристик бетона со скоростью распространения в нем ультразвука. Ультразвуковые волны - это упругие колеба-

ния среды с частотами, превышающими предел слышимости (свыше 20 кГц) и малой длиной волны. Высокочастотные импульсы получают, используя пьезоэлектрический и магнитострикционный эффект, а также механическим и термическим способами. Ультразвуковые волны не вызывают в бетоне и подобных ему строительных материалах никаких изменений.

Прочность тяжелых и легких бетонов ультразвуковым методом определяют в соответствии с ГОСТ 17624-72 с помощью ультразвуковых приборов, которые позволяют измерять в образцах, бетонных и железобетонных изделиях и конструкциях время распространения ультразвука.

Прибор для измерения времени прохождения колебаний ультразвуковой частоты через бетон (рис. 1) состоит из пяти основных частей:

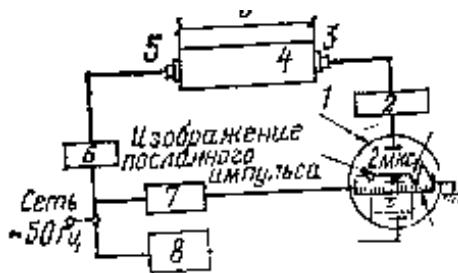


Рисунок 1- Прибор для измерения времени прохождения колебаний ультразвуковой частоты.

- а) системы возбуждения - генератора импульсов 6, излучателя ультразвуковых механических колебаний 5, передающих эти колебания в бетонный образец 4;
- б) системы приема - приемника механических колебаний 3 превращающего эти колебания в электрические, и усилителя 2;
- в) системы измерения - индикатора 1, в качестве которого применяют электроннолучевую трубку или другое устройство;
- г) электронного устройства 7, называемого «ждущей задержанной разверткой», в котором моделируется процесс распространения ультразвука в бетоне;
- д) генератора меток времени (микросекундомера) 8.

Прочность бетона вычисляют по результатам измерения времени распространения ультразвука на выбранном участке контролируемого изделия или конструкции.

Скорость распространения ультразвука  $v$ , м/с, определяют по формуле

$$v = \frac{l}{\tau} 1000, \quad (5)$$

где  $\tau$  - время распространения ультразвука, мкс;

$l$  - база прозвучивания, мм.

База прозвучивания должна измеряться с погрешностью не более  $\pm 0,3\%$  на образцах и  $\pm 0,5\%$  на изделиях и конструкциях.

При определении *способом сквозного прозвучивания* ультразвуковые преобразователи устанавливают с противоположных сторон изделия или конструкции.

При измерении *способом продольного профилирования* приемный преобразователь устанавливают последовательно на позиции, расположенные на линии, соединяющей центры установки приемного и излучающего преобразователей.

Скорость распространения ультразвука  $v_{\text{пов}}$ , м/с, определяют по формуле:

$$v_{\text{пов}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N-1} \frac{\Delta l_i}{\Delta \tau_i} 1000, \quad (6)$$

где  $\Delta l_i = l_{i+1} - l_i$  - изменение расстояния между центрами установки преобразователей при перемещении приемного преобразователя на соседнюю позицию, мм;  $\Delta \tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$  - изменение времени распространения ультразвука при перемещении приемного преобразователя на соседнюю позицию, мкс;

$N$  - число позиций установки приемного преобразователя.

В случае *поверхностного прозвучивания* приемный преобразователь устанавливают на определенном расстоянии  $l$  от излучающего (от 150 до 200 мм). Скорость распространения ультразвука при этом вычисляется по формуле:

$$\nu_{нов} = \frac{l}{\tau} 1000, \quad (7)$$

где  $l$  – расстояние между центрами установки преобразователей, расположенных на одной поверхности, мм.

Средние арифметические значения и вычисляют для каждого образца, предел прочности образца при сжатии  $R$  определяют механическими испытаниями.

Среднюю квадратическую погрешность  $s$  определения прочности по зависимости скорость – прочность находят по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{R_i}{R_{vi}} - 1 \right)^2}, \quad (8)$$

где  $R_i$ ,  $R_{vi}$  – соответственно прочность по данным механических испытаний и зависимости скорость – прочность для одного и того же значения скорости распространения ультразвука;

$n$  – число испытанных образцов.

Если значение средней квадратической погрешности превышает 12%, зависимость скорость – прочность не может быть использована для определения прочности бетона.

Связь между скоростью, полученной способом поверхностного прозвучивания или продольного профилирования, и скоростью при сквозном прозвучивании определяют по формуле

$$\nu = \nu_{нов} K, \quad (9)$$

где  $\nu$  – скорость распространения ультразвука при сквозном прозвучивании, м/с;

$\nu_{нов}$  – скорость распространения ультразвука при поверхностном прозвучивании или продольном профилировании, м/с;

$K$  – переходной коэффициент.

Переходной коэффициент  $K$  вычисляют по средним значениям результатов измерений скоростей распространения ультразвука способами сквозного и по-

верхностного прозвучивания либо сквозного и продольного прозвучивания. Скорость измеряют на пяти образцах-балочках размером 100x100x400 мм.

В отдельных участках изделий и конструкций прочность бетона определяют по предварительно полученной зависимости скорость - прочность в соответствии с результатами измерения скорости распространения ультразвука. В случае отсутствия контрольных образцов или при ограниченном их числе прочность бетона в конструкции  $R$  ориентировочно может быть определена по эмпирической формуле

$$R = qv^4, \quad (10)$$

где  $q$  – коэффициент, определяемый в результате подстановки в формулу средних значений прочности и скорости распространения ультразвука в образцах;  $v$  – скорость распространения ультразвука в контролируемых участках конструкций.

Этой формулой можно пользоваться, если скорость распространения ультразвука отклоняется от среднего значения в испытанных образцах не более чем на 10%.

В случае если скорость распространения ультразвука в участке конструкции  $v$  не превышает скорости в образцах с наибольшей прочностью  $v_0$ , рекомендуется определять  $R$  по формуле:

$$R = R_0 \frac{v}{8,87v_0 - 7,87v}, \quad (11)$$

где  $R_0$  – наибольшее значение прочности контрольных образцов.

Прозвучивание балок, колонн и других подобных конструкций производят в поперечном направлении. Ультразвуковые преобразователи устанавливают в участках, где отсутствует арматура.

*Ультразвуковая дефектоскопия* может осуществляться путем прямого прозвучивания (теневой метод) и методом отражения колебаний (эхо-метод), описанными в специальной литературе.

С помощью импульсного акустического метода может быть выявлена дефектность каменных конструкций. Для определения глубины распространения трещины, выходящей на поверхность конструкции, используется способ построения годографа (рис. 2). По локальному увеличению времени (разрыв годографа) прохождения акустического импульса в зависимости от базы измерения при фиксированном положении датчика вычисляют глубину трещины. Невидимые дефекты конструкций (пустоты, инородные включения и т.д.) и зону их распространения выявляют методом последовательного приближения при сквозном прозвучивании конструкций.

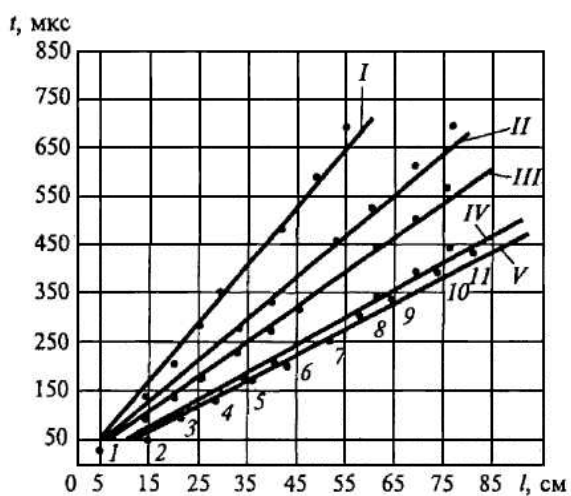


Рисунок 2 - Годографы продольной волны

I - V - образцы; 1 – положение излучателя; 2 - 11 - положения приемника

С помощью указанного метода может быть также установлена прочность материала по корреляции между прочностью и его физическими характеристиками - скоростью распространения упругих волн, акустическим сопротивлением или акустической жесткостью среды. Для бетона и его аналогов (газобетона, керамзитобетона и шлакобетона) указанные зависимости уже установлены. Возможность применения импульсного метода для определения прочности кирпичной кладки до настоящего времени исследована недостаточно полно.



## РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА

Резонансным методом определяют частоту собственных колебаний образца или элемента конструкций по ней находят показатели физико-механических свойств бетона.

Колебания изгиба описываются известным в теории колебаний дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + \frac{E_d I_g}{S m_v} \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = 0, \quad (12)$$

где  $y$  - прогиб бруса при колебаниях в направлении оси  $y$ ;

$x$  - координата по длине бруса;

$\tau$  - время;

$I$  - момент инерции сечения бруса;

$g$  - ускорение силы тяжести;  $S$  - площадь поперечного сечения;

$m$  - объемная масса.

Для расчета прочности бруса со свободно опертыми концами (рис. 3) дифференциальное уравнение приводят к формуле

$$f = \frac{\xi^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E_d I}{S m_v}}, \quad (13)$$

где  $f$  – частота собственных колебаний изгиба,

или

$$E_d = \frac{4\pi^2 l^4 S m_v}{\xi^4 I} f^2, \quad (14)$$

где  $l$  - длина бруса;

$\xi$  - величина, учитывающая тип колебаний, для колебаний первого тона  $\xi=4,73$ , при этом расстояние от опоры бруса до его конца должно быть 0,224 $l$ , что соответствует расположению узловых сечений первого тона.

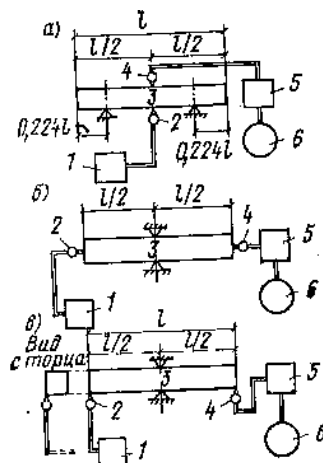


Рис.3. Определение частоты собственных колебаний

а- изгибающих; б- продольных; в- крутильных; 1- генератор колебаний; 2- возбудитель; 3- испытуемый образец; 4- приемник колебаний; 5- усилитель; 6- отсчетное устройство.

Динамический модуль упругости  $E_d$  можно определить по частоте собственных продольных колебаний  $f_{np}$  на основе формулы:

$$E_d = 4l^2 f_{np}^2 \rho, \quad (15)$$

где  $\rho$  – плотность материала.

Бетон представляет собой упруговязкопластичный материал, поэтому его оценка по величине  $E_d$ , характеризующей лишь упругие свойства, не может быть полной. В связи с этим предложено о качестве бетона судить по двум параметрам:  $E_d$  и логарифмическому декременту затухания  $\delta$ , отражающему неупругие свойства и дефекты материала. Логарифмический декремент затухания определяют по ширине резонансного пика (рис. 4) и рассчитывают по формуле:

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{3} f_0}. \quad (16)$$

где  $f_0$  - частота собственных колебаний образца (частота резонанса);

$f_1$  и  $f_2$  - частоты колебаний, соответствующие амплитуде, равной  $0,5 a_{\max}$  до и после резонанса ( $a_{\max}$  - амплитуда колебаний при частоте  $f_0$ ).

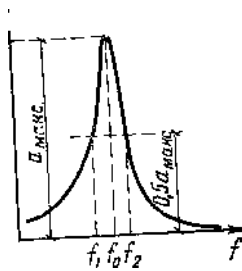


Рис. 4. Резонансная кривая

Величину  $f_0$  определяют в момент резонанса при  $a_{\max}$ , затем уменьшают частоту колебаний с тем, чтобы амплитуда колебаний сократилась до  $0,5 a_{\max}$ , которой соответствует величина  $f_1$ . После этого частоту колебаний снова увеличивают, и при значениях, больших  $f_0$ , амплитуда начинает уменьшаться; как только она достигнет  $0,5 a_{\max}$ , регистрируют соответствующую ей частоту.

Затухание колебаний в твердом теле объясняется наличием сил внутреннего трения. Под внутренним трением принято понимать способность тела превращать необратимым образом энергию упругих колебаний в тепло. Это относительное рассеяние энергии является специфическим свойством материала, как, например, модуль Юнга. Связь между затуханием колебаний и дефектами в структуре выявляется с помощью коэффициента внутреннего трения  $B$ , определяемого по формуле

$$B = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{3} f_0}. \quad (17)$$

Величину, обратную  $B$ , называют добротностью материала  $Q$ .

Таким образом, меры внутреннего трения связаны между собой простыми зависимостями:

$$B = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{Q}. \quad (18)$$

С помощью добротности можно оценить неупругие свойства бетона. Например, для тяжелого бетона постоянного состава при  $B/C=0,66$   $Q=80$ , а при  $B/C=0,5$   $Q=110$ , т. е. добротность материала, как и прочность, возрастает

с уменьшением водоцементного отношения. Иными словами, бетон более высоких марок в меньшей степени рассеивает энергию упругих колебаний.

## РЕНТГЕНОВСКИЕ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Рентгеновские лучи и близкие к ним  $\gamma$ -лучи представляют собой разновидность электромагнитных излучений. Благодаря высокой энергии квантов эти лучи проникают через значительные толщии оптически непрозрачных материалов, что позволяет использовать их для контроля уплотнения бетонной смеси, плотности и прочности бетона путем измерения его объемной массы, а также для обнаружения и оценки дефектов в изделиях, конструкциях, сварных швах и т. п.

Источником гамма-лучей являются естественные или искусственные радиоактивные вещества. В технике наибольшее применение нашли искусственные радиоактивные вещества - радиоактивные изотопы, полученные в результате ядерных реакций. Активность радиоактивных изотопов изменяется во времени неодинаково. Радиоактивные вещества характеризуются периодом полураспада - временем, в течение которого вещество теряет половину своей активности. В табл. 1 приведены наиболее часто применяемые в технике просвечивания радиоактивные изотопы и периоды их полураспада.

Таблица 1 - Радиоактивные изотопы и периоды их полураспада

Радиоактивный изотоп	Условное обозначение	Период полураспада
Кобальт – 60	$Co^{60}$	5,3 года
Тантал – 182	$Ta^{182}$	112 дней
Иридий – 192	$Ir^{192}$	74 дня
Тулий – 170	$Tm^{170}$	127 дней
Цезий – 137	$Cs^{137}$	33 года
Европий	$Eu^{152}$	12,7 года

Ослабление гамма-лучей выражается зависимостью

$$I_d = I_0 e^{-\mu' d \rho}, \quad (19)$$

где  $I_d$  - интенсивность излучения, прошедшего через слой материала;

$I_0$  - начальная интенсивность излучения;

$d$ -толщина просвечиваемого слоя материала;

$\mu'$  -массовый коэффициент поглощения, равный отношению коэффициента линейного поглощения,  $\mu$ , к плотности,  $\rho$ .

Гамма-лучи используют для контроля качества бетона методом, основанным на определении объемной массы путем измерения степени ослабления пучка лучей, и радиографическим методом дефектоскопии бетона. Исходя из вышеприведенного экспоненциального закона затухания гамма - лучей рассчитывают линейный коэффициент поглощения.

$$\mu = \frac{\ln I_0 - \ln I_d}{d}. \quad (20)$$

Объемную массу бетона вычисляют по формуле

$$m_v = \frac{\mu}{\mu'}. \quad (21)$$

Радиографический метод дефектоскопии основан на ослаблении  $\gamma$ -лучей при прохождении через - материал. В тех местах бетона, где имеются дефекты в виде пустот, каверн, мест с пониженной плотностью, ослабление пучка гамма-лучей будет меньше, чем при прохождении через бетон с нормальной плотностью, и следовательно, на рентгеновской пленке проекции этих участков будут более темными в сравнении с остальными. Чувствительность полученных снимков оценивают дефектометром, который представляет собой образец переменной толщины, выполненный из такого же бетона и таким же способом, как и исследуемая конструкция. Совместная съемка (просвечивание) конструкции и дефектометра позволяет оценить влияние изменения толщины и плотности бетона.

Радиометрический (радиационный) метод определения плотности материала основан на взаимодействии гамма-излучения с исследуемой средой. Метод основан на просвечивании контролируемой конструкции ионизирующим излучением и получении при этом информации о ее внутреннем строении с помощью преобразователя излучения (рис. 6).

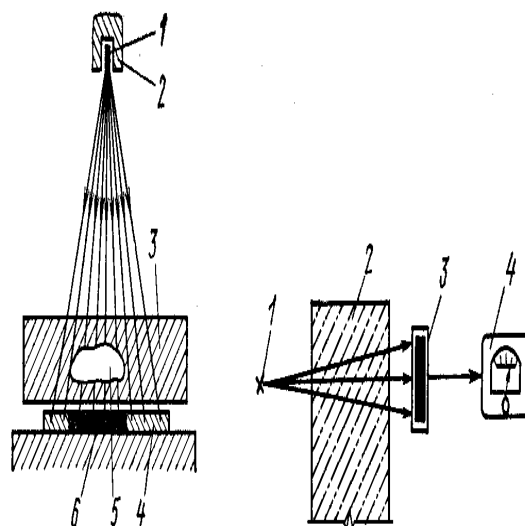


Рис. 5. Схема радиографического метода дефектоскопии бетона.

1 - источник излучения; 2 - защитный контейнер; 3 - бетонное изделие; 4 - рентгеновская пленка; 5 - дефект в изделии; 6- место изображения дефекта на пленке

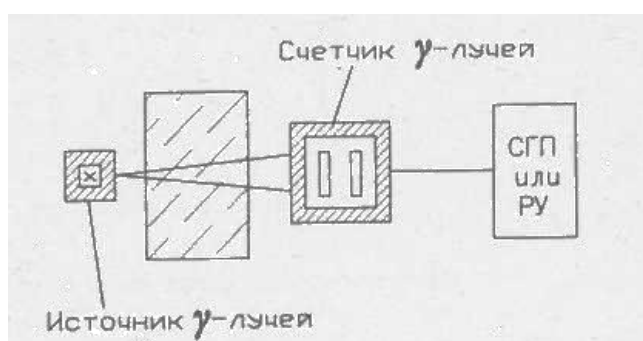


Рис. 6. Схема радиометрического метода контроля

Взаимодействие излучения с веществом определяется основным законом ослабления ионизирующего излучения.

Плотность строительных материалов можно найти методом сквозного просвечивания или методом рассеяния. Если к конструкции возможно подойти только с одной стороны, для определения плотности применяют метод рассеяния, при котором источник излучения и счетчик импульсов находятся у одной и той же поверхности конструкции. Датчиком для определения плотности является выносной элемент ИП-3. Счетно-запоминающим устройством служат радиометры типа Б-3 или Б-4.

## РАДИОИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ МАССЫ

Радиоизотопный метод измерения объемной массы бетонной смеси и бетона в конструкциях основан на ослаблении или рассеянии взаимодействующего с бетоном гамма-излучения. Объемную массу уплотненной бетонной смеси или бетона определяют при помощи радиоизотопного плотномера по градуировочному графику или непосредственно по шкале плотномера, отградуированной в единицах объемной массы (рис. 7).

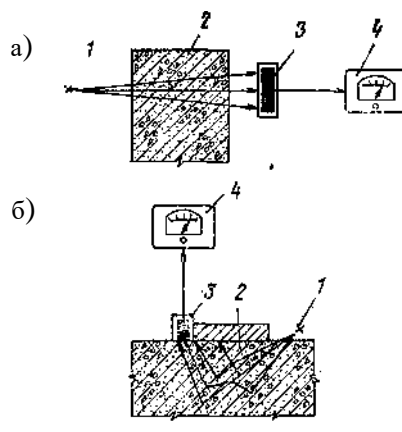


Рисунок 7. Схема определения объемной массы бетона радиоизотопным методом

*а* – при наличии двустороннего и *б* – одностороннего доступа;  
1 - источник излучения; 2 - контролируемая конструкция; 3 - детектор;  
4 - регистрирующий прибор

При определении по интенсивности прошедшего через бетонную смесь или бетон гамма-излучения источник и детектор устанавливают с противоположных сторон конструкции (рис. 8, *а*). При определении по интенсивности рассеянного бетоном гамма-излучения источник и детектор размещают на одной поверхности конструкции (рис. 8, *б*).

Радиоизотопные плотномеры, предназначенные для определения объемной массы бетонной смеси или бетона, состоят из преобразователя и регистрирующего прибора. В качестве гамма-излучателей в радиоизотопных плотномерах применяют закрытые радиоактивные источники  $Cs^{137}$  или  $Co^{60}$ .

Продолжительность единичного замера зависит главным образом от размеров бетонируемой конструкции. Для приборов, контролирующих объемную массу бетонной смеси, она составляет не более 1 мин. Единичный замер для

определения объемной массы бетонной смеси, укладываемой в массивные сооружения, - а также в готовых изделиях и конструкциях не превышает 3 мин.

Приборы должны обеспечивать нормальную работу при температуре окружающей среды от -10 до +40°C, относительной влажности до 90 % и колебаниях сетевого напряжения в пределах от +10 до -15%.

Для определения объемной массы уплотненной бетонной смеси рекомендуются следующие схемы преобразователей:

- преобразователь типа «вилка» (рис. 8, *а*); применяется для послойного определения;

- преобразователь типа Г- и Т-образных зондов (рис. 8, *б* и *в*); служит для определения усредненного значения объемной массы по высоте контролируемого слоя; при установке в специально пробуренные отверстия применяется для контроля массивных конструкций;

- преобразователь типа глубинного зонда (рис. 8, *г*); используется для определения объемной массы в различных по высоте зонах массивных изделий или монолитных конструкций; устанавливать его необходимо таким образом, чтобы ось, соединяющая центры источника и детектора излучения, находилась на расстоянии не менее 100 мм от края конструкции;

- преобразователь поверхностного типа (рис. 8, *д*); применяется для бесконтактного определения при одностороннем доступе к формируемому изделию;

- преобразователь П-образного типа; служит для определения объемной массы бетона в конструкциях толщиной до 500 мм, имеющих параллельные грани. При работе с ним следует выдерживать необходимые условия, исключая влияние граничного эффекта и качества поверхности бетонной смеси на показания прибора.

Объемную массу бетонной смеси определяют в процессе ее вибрирования или в свежееотформованных конструкциях. Объемную массу бетона устанавливают при его естественной влажности. Коэффициент вариации объемной массы бетона в изделиях  $C_{\nu_{mV}}$  вычисляют по формуле:



$$Cv_{mV} = \frac{\sigma_{mV}}{m_{cp}}, \quad (22)$$

где  $\sigma_{mV}$  - среднее квадратическое отклонение результатов определения объемной массы ( $m_{Vi}$ ) в отдельных участках от их среднего значения ( $m_{Vcc}$ ), кг/м<sup>3</sup>;

$m_{Vcc}$  - среднее значение объемной массы бетона в конструкциях, кг/м<sup>3</sup>.

Среднее квадратическое отклонение вычисляют по формуле:

$$\sigma_{mV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (m_{Vi} - m_{Vcc})^2}{n-1}}, \quad (23)$$

где n – число контролируемых участков в конструкции.

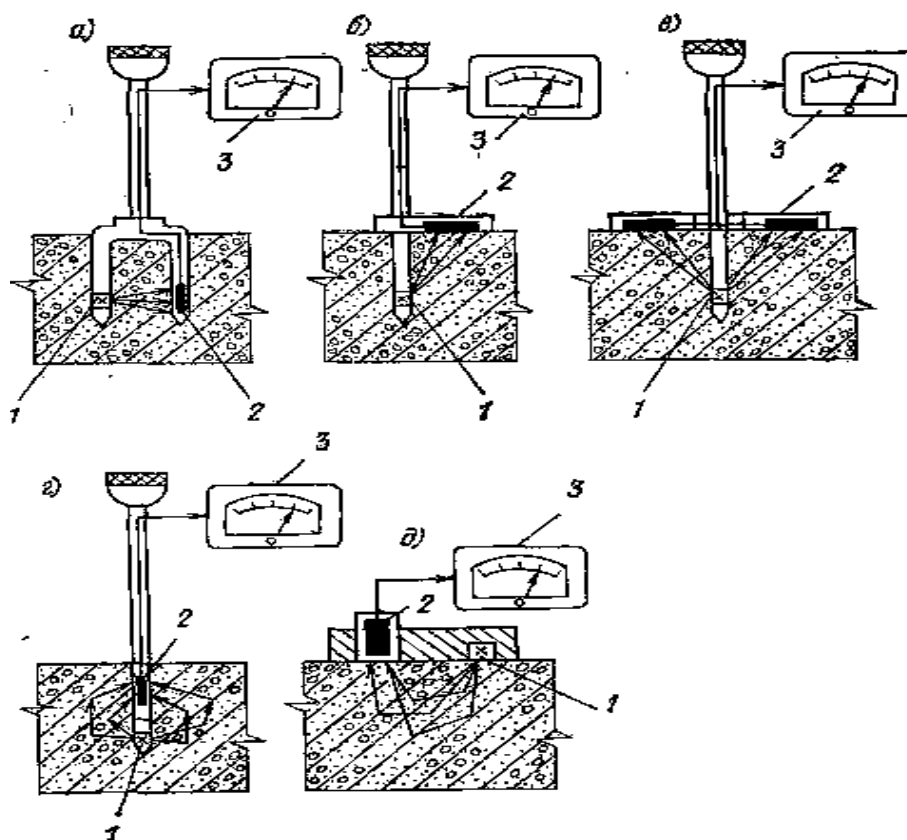


Рис.8. Схема преобразователей для определения объемной массы бетонной смеси  
1- источник излучения; 2- детектор; 3- регистрирующий прибор

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА

При определении толщины защитного слоя бетона радиационным методом сравнивают значения, полученные при просвечивании ионизирующими излучениями, с показателями, предусмотренными соответствующими стандартами, техническими чертежами. Для этой цели применяют переносные или стационарные гамма-аппараты, рентгеновские аппараты и бетатроны. Аппарат выбирают с учетом толщины конструкции и объемной массы бетона (табл. 2).

Кассеты следует заряжать по одной из следующих схем: в кассете рентгеновская пленка; рентгеновская пленка между двумя усиливающими флуоресцирующими экранами в кассете; в кассете два металлических экрана и рентгеновская пленка между ними; в кассете рентгеновская пленка между двумя усиливающими флуоресцирующими экранами и два металлических экрана; в кассете между тремя усиливающими флуоресцирующими экранами две рентгеновские пленки.

Таблица 2 - Типы аппаратов для просвечивания тяжелого бетона

Толщина просвечиваемого слоя бетона, мм	Рекомендуемые типы аппаратов		
	Гамма - аппарата	Рентгеновские аппараты	бетатроны
До 60	«Бетон», РИД-21М	РУП-120-5-1	-
От 60 до 200	«Бетон», РИД-21М	РУП-200-5-2, РУП-400-5-1	ПМБ-3 ПМБ-3
От 200 до 500	РИД-22	-	ПМБ-6
От 500 до 1000	-	-	ПМБ-6
От 1000 до 1800	-	-	Б-15 Б-30

С помощью эталона чувствительности, закрепленного на поверхности конструкции, обращенной к источнику излучения, оценивают качество снимка.

Толщину защитного слоя бетона, мм, при просвечивании конструкции со смещением источника излучения (рис. 9) вычисляют по формуле:

$$\delta = \frac{\Phi C_1}{C + C_1} - \frac{D}{2}, \quad (24)$$

где  $\Phi$  – фокусное расстояние, мм;

$C$  – расстояние между положениями источника, мм;

$C_1$  – смещение проекций арматурного стержня на пленке, мм;

$D$  – диаметр арматурного стержня, мм;

$$D = D_1 \frac{\Phi - a}{\sqrt{\Phi^2 + C_2^2}}, \quad (25)$$

где  $a$  – расстояние от поверхности конструкции до центра арматурного стержня, мм;

$D_1$  – проекция арматурного стержня на пленке, мм;

$C_2$  – расстояние от оси проекции стержня до прямой, проведенной через источник перпендикулярно к поверхности пленки, мм.

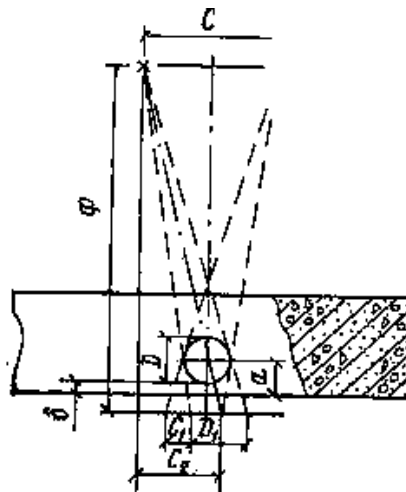


Рис. 9. Определение толщины защитного слоя и диаметра арматуры методом смещения источника излучения

$D$  – диаметр арматурного стержня;  $D_1$  – проекция арматурного стержня;  $\delta$  – толщина защитного слоя;  $\Phi$  – фокусное расстояние;  $C$  – расстояние между первым и вторым положением источника;  $C_1$  – смещение проекций арматурного стержня на пленке;  $C_2$  – расстояние от оси проекции стержня до прямой, проходящей через источник перпендикулярно поверхности пленки;  $a$  – расстояние от поверхности конструкции до центра арматурного стержня

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА.

Метод измерения плотности теплового потока основан на принципе вспомогательной стенки. На преобразователе теплового потока, который прикладывают к поверхности ограждающей конструкции, в установившемся режиме теплообмена создается температурный перепад, пропорциональный плотности теплового потока, проходящего через ограждение.

Схема измерения плотности теплового потока показана на рис. 10.

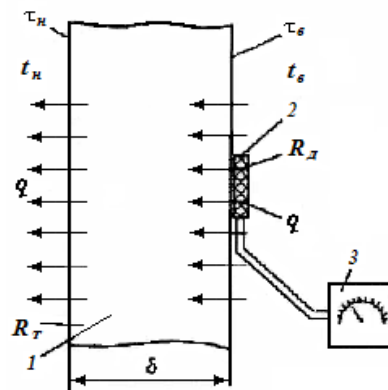


Рис. 10. Схема измерения плотности теплового потока

1 - ограждающая конструкция; 2 - преобразователь теплового потока;  
3 - измерительный прибор

Плотность теплового потока через ограждающие конструкции измеряется прибором ИТП-7, ИПП-2. Он представляет собой совокупность преобразователя теплового потока в электрический сигнал постоянного тока с измерительным устройством, содержащим автокомпенсационный микромилливольтметр постоянного тока, шкала измерительного механизма которого проградуирована в единицах теплового потока.

На ограждающую конструкцию, имеющую полное термическое сопротивление  $R_t$ , накладывается преобразователь теплового потока с термическим сопротивлением  $R_d$ . Тепловой поток пронизывает все элементы конструкции ограждения и преобразователь теплового потока, создавая на них температурные перепады. Поскольку инерционность ограждения значительно превышает инерционность преобразователя теплового потока  $R_t \gg R_d$ , температура под преобразовате-

лем при наложении его не успевает измениться за время измерения. Поэтому понижающий преобразователь поток будет пропорционален коэффициенту теплоотдачи  $\alpha_v$  от внутренней поверхности ограждения к окружающему воздуху и разности температур между ними.

Поправка на искажение величины теплового потока может быть учтена при расчетах теплотехнических свойств ограждений. Во многих случаях это искажение можно отнести к погрешности измерения, так как при типовых значениях термического сопротивления  $R_d = 0,003 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$  и коэффициента теплоотдачи свободной конвекцией  $\alpha_v = 5 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  поправка составит 1,5%.

По результатам измерения теплового потока, зная толщину ограждения и измерив предварительно температуры  $t_v$ ,  $t_n$ ,  $\tau_v$  и  $\tau_n$ , определяют основные теплотехнические свойства ограждающей конструкции: термическое сопротивление, коэффициенты теплоотдачи у наружной и внутренней поверхностей ограждения, сопротивление теплопередаче, коэффициент теплопередачи.

## ДЕФЕКТОСКОПИЯ

К микро- и макроструктуре однородного вещества следует непосредственно отнести и различные инородные включения, могущие присутствовать в веществе (раковины, пустоты и трещины в металле, включения веществ другого химического состава и т. д.).

Раковины, трещины и другие скрытые дефекты металлических изделий могут быть выявлены при помощи магнитной и ультразвуковой дефектоскопии.

Метод магнитной дефектоскопии основан на том, что при намагничивании металлов те места металлических изделий, которыми находятся те или иные дефекты, будут намагничиваться по-другому, чем сплошное тело металла.

Определяя затем степень намагничивания изделия (например, нанесением металлического порошка), судят о дефектах металла.

При ультразвуковой дефектоскопии используют ультразвуковые волны, которые отражаются почти полностью на границе раздела твердое тело-воздух.

Наблюдая отражение ультразвуковых волн, определяют наличие дефектов в металлах.

Применяя ультразвуковой микроскоп, основанный на том же принципе, можно судить о формах и размерах дефектов.

Метод рентгеновского анализа в обнаружении дефектов в металлах основан на различной проницаемости рентгеновских лучей через разные материалы и воздушные пустоты.

В последние годы в лабораторном анализе и контрольно-измерительной технике широкое применение получают радиоактивные изотопы для анализа состава, строения и различных свойств материалов и изделий. Не останавливаясь подробно на описании областей применения  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -лучей, отметим успешное применение  $\beta$ -частиц при анализе сплавов, использование  $\gamma$ -лучей при исследовании процессов коррозии, для определения плотности различных веществ и др.

Внутреннее строение и структура вещества выражается в структурных моделях и рисунках, характеризующих форму, величину и взаимное расположение тех или иных элементов данного вещества, в зависимости от глубины исследования.

Если данный материал является неоднородным по веществам, его составляющим, то исследуется последовательно отдельно каждое однородное вещество и характеристика материала часто дополняется установлением связи и взаимного расположения составляющих однородных веществ.

В заключение необходимо подчеркнуть, что химический состав материала и его структура в большинстве случаев настолько тесно связаны, что состав и структура исследуются одновременно.

## **ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ**

### **6.1 Правила определения прочности бетона в реальных конструкциях**

Число и расположение контролируемых участков на конструкции должно отвечать требованиям ГОСТ 18105 и указываться в картах контроля или в нормативно - технической и проектной документации на конструкцию.

При этом количество и расположение участков должно устанавливаться с учетом:

- задач контроля (установление фактической прочности бетона, разопалубочной прочности);
- особенностей работы конструкций (изгиб, сжатие и т.п.);
- условий проведения испытаний;
- армирования конструкций;
- наличия или отсутствия контрольных кубов.

#### 6.1.1 При использовании ультразвуковых приборов:

На каждом контролируемом участке проводят не менее двух измерений времени (скорости) распространения ультразвука. Отклонение отдельных измерений от среднего арифметического значения не должно превышать 2 %. Прочность бетона определяют по среднему значению полученных результатов измерений скорости (времени) распространения ультразвука. Качество поверхности бетона контролируемого участка должно соответствовать требованиям п. 3.10 ГОСТ 17624.

При контроле прочности бетона конструкций в возрасте до 56 суток включительно возраст конструкций при испытании не должен отличаться от среднего возраста образцов или участков конструкций, использованных для построения градуировочных зависимостей, более чем на 25%.

При контроле прочности бетона большего возраста это различие не должно превышать диапазона возраста участков конструкций или образцов, использованных для построения градуировочных зависимостей.

Для определения прочности бетона эксплуатируемых конструкций должна использоваться градуировочная зависимость, построенная непосредственно перед обследованием.

Прочность бетона контролируемого участка конструкции определяют по градуировочной зависимости, при условии, что измеренное значение скорости (времени) ультразвука находится в пределах между наименьшим и наибольшим значениями скорости (времени) ультразвука в образцах или участках конструкций, испытанных при построении градуировочной зависимости.

Полученные значения прочности бетона принимают за среднюю прочность бетона участка конструкции  $R_i$ .

Для определения класса бетона по данным испытаний следует руководствоваться требованиями ГОСТ 18105-2010, СНиП 2.03.01-84\*, а также «Рекомендаций по статистической оценке прочности бетона при испытании неразрушающими методами» (МДС 62-1.2001 г.) ГУПНИИЖБ.

Сборные линейные конструкции (балки, ригели, колонны и др.) испытывают способом сквозного прозвучивания в поперечном направлении.

Изделия, конструктивные особенности которых затрудняют осуществление сквозного прозвучивания, а также плоские конструкции (плоские, ребристые и многопустотные панели перекрытия, стеновые панели и т. д.) испытывают способом поверхностного прозвучивания. При этом база прозвучивания при измерениях на конструкции должна быть такой же, как на образцах при установлении градуировочной зависимости. Результаты испытаний образцов представляются в форме табл. 1

Измерение времени распространения ультразвука в бетоне конструкции следует проводить в направлении, перпендикулярном уплотнению бетона.

Расстояние от края конструкции до места установки ультразвуковых преобразователей должно быть не менее 30 мм.

Измерения времени распространения ультразвука в бетоне железобетонной конструкции следует проводить в направлении, перпендикулярном направлению рабочей арматуры. Концентрация арматуры вдоль выбранной линии прозвучивания не должна превышать 5%.

Результаты испытаний заносятся в журнал (табл. 2).

Таблица 1 – Журнал результатов испытаний



	Класс (марка) бетона по прочности*		Дата изготовления образца		Дата испытаний		Номер образца		Масса образца, г		Рабочая площадь образца, см <sup>2</sup>	Результаты ультразвуковых измерений					Результаты механических испытаний				Примечание**
												Номер точки прозвучивания	База прозвучивания, мм	Время распространения ультразвука, мкс	Скорость ультразвука, м/с	Средняя скорость (время) ультразвука в образце, м/с	Средняя скорость (время) ультразвука в серии образцов, м/с	Разрушающая нагрузка, кгс	Прочность образца, МПа	Средняя прочность серии образцов, МПа	

\* Указать номинальный состав бетона.

\*\* Указать тип ультразвукового прибора и рабочие частоты преобразователей.

Начальник лаборатории \_\_\_\_\_

Таблица 2 – Журнал определения прочности бетона в конструкциях

Наименование конструкции (для сборных - марка, серия рабочих чертежей)	Вид бетона и его класс (марка) прочности	Дата изготовления	Дата испытания	Номер контролируемого участка	База прозвучивания, мм	Время распространения ультразвука, мкс	Скорость ультразвука, м/с	Прочность бетона в участке конструкции, определенная ультразвуковым методом, МПа	Примечание*

\* Указать тип ультразвукового прибора и рабочие частоты преобразователей.

Начальник лаборатории \_\_\_\_\_

Установление градуировочной зависимости выполняется в соответствии с ГОСТ 17624-87, приложение 4.

Статистическая оценка прочности бетона выполняем в соответствии с СП 13-102-2003, ГОСТ 18105-86 с учетом МДС 62-1.2000 (Уточненная редакция).

Минимальное количество единичных измерений – не менее 15.

6.1.2 При использовании метода отрыва со скалыванием:

Механические методы неразрушающего контроля применяют для определения прочности бетона всех видов нормируемой прочности, контролируемых по ГОСТ 18105\*, а также для определения прочности бетона при обследовании и отбраковке конструкций.

Одним из методов является метод отрыва со скалыванием.

Оценку соответствия значений фактической прочности бетона, полученных с применением приведенных в ГОСТ 22690 методов, установленным требованиям производят по ГОСТ 18105.

Прочность бетона определяют при помощи приборов, предназначенных для определения косвенных характеристик, прошедших метрологическую аттестацию по ГОСТ 8.326\*.

Для метода отрыва со скалыванием следует применять анкерные устройства, изображенные на рис. 1.

Допускается применять также другие анкерные устройства, глубина заделки которых должна быть не менее максимального размера крупного заполнителя бетона испытываемой конструкции.

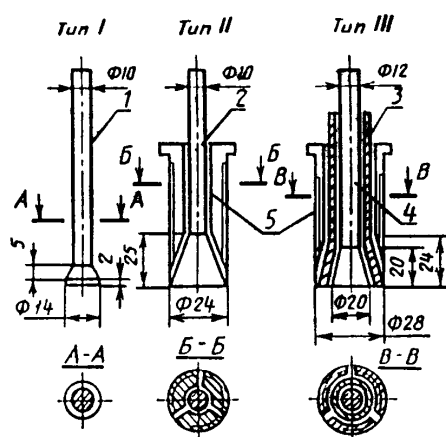


Рис. 1. Типы анкерных устройств

1 - рабочий стержень; 2 - рабочий стержень с разжимным конусом; 3 - рабочий стержень с полным разжимным конусом; 4 - опорный стержень; 5 - сегментные рифленые щеки

Анкерное устройство типа I устанавливают на конструкции при бетонировании; анкерные устройства типов II и III устанавливают в предварительно подготовленные шпury на конструкции на глубину заделки, приведенную в табл. 3.

Таблица 3 – Типы анкерных устройств

Тип анкерного устройства	Глубина заделки анкерных устройств, мм	
	рабочая $h$	полная $h'$
I	35; 48	37; 50
II	30; 48	37; 55
III	35	42

Для определения прочности бетона в конструкциях предварительно устанавливают градуировочную зависимость между прочностью бетона и косвенной характеристикой прочности (в виде графика, таблицы или формулы).

Для метода отрыва со скалыванием, в случае применения анкерных устройств в соответствии с рис. 1, градуировочная зависимость устанавливается следующим образом.

При использовании анкерных устройств, приведенных на рис. 1, прочность бетона  $R$ , МПа можно вычислять по градуировочной зависимости по формуле

$$R = m_1 \cdot m_2 \cdot P, \quad (1)$$

где  $m_1$  коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя в зоне вырыва и принимаемый равным 1 при крупности менее 50 мм и 1,1 при крупности 50 мм и более;

$m_2$  - коэффициент пропорциональности для перехода от усилия вырыва, кН, к прочности бетона, МПа;

$P$  - усилие вырыва анкерного устройства, кН.

При испытании тяжелого бетона прочностью 10 МПа и более и керамзитобетона прочностью от 5 до 40 МПа значения коэффициента пропорциональности  $m_2$  принимают по табл. 4.

Таблица 4 – Значения коэффициента  $m_2$

Условие твердения бетона	Тип анкерного устройства	Предполагаемая прочность бетона, МПа	Глубина заделки анкерного устройства, мм	Значение коэффициента $m_2$ для бетона	
				тяжелого	легкого
Естественное	I	$\leq 50$	48	1,1	1,2
		$> 50$	35	2,4	-
	II	$\leq 50$	48	0,9	1,0
		$> 50$	30	2,5	-
	III	$\leq 50$	35	1,5	-
		$> 50$	30	2,7	-
Тепловая обработка	I	$\leq 50$	48	1,3	1,2
		$> 50$	35	2,6	-
	II	$\leq 50$	48	1,1	1,0
		$> 50$	30	2,7	-
	III	$\leq 50$	35	1,8	-
		$> 50$	30	2,7	-

Для установления градуировочных зависимостей используют не менее 15 серий образцов-кубов по ГОСТ 10180 или не менее 30 отдельных образцов-кубов. При установлении градуировочной зависимости для метода отрыва со скалыванием в каждую серию дополнительно включают не менее трех образцов-кубов.

Образцы изготавливают в соответствии с ГОСТ 10180 в разные смены в течение 5 сут. из бетона одного состава, одной и той же технологии и при том же режиме тепловлажностной обработки или тех же условиях твердения, что и конструкции, подлежащие контролю. При изготовлении образцов пять серий рекомендуется изготавливать из бетонной смеси, отличающейся по составу от проектного по цементно-водному отношению в пределах плюс 0,4 и пять серий в пределах минус 0,4.

Размеры образцов для установления градуировочной зависимости следует выбирать в соответствии с наибольшей крупностью заполнителя в бетонной смеси по ГОСТ 10180, но не менее:

- 100×100×100 мм - для методов отскока, ударного импульса, пластической деформации для испытания неразрушающими методами и по ГОСТ 10180 и отрыва со скалыванием для испытания - по ГОСТ 10180;

Размеры ребра дополнительных образцов-кубов, испытываемых методом отрыва со скалыванием, должны быть не меньше шести глубин установки анкерного устройства.

В случае применения на производстве способов и режимов уплотнения, приводящих к изменению структуры бетона, размер и способ изготовления образцов для установления градуировочных зависимостей должен указываться в стандартах или технических условиях на сборные конструкции, в рабочих чертежах на монолитные конструкции или же в методиках, утвержденных в установленном порядке.

Градуировочную зависимость следует оформлять в соответствии с приложением 8 ГОСТ 22690.

Данные, приводимые в журнале оформления градуировочной зависимости:

1. Наименование предприятия, для которого установлена градуировочная зависимость.
2. Наименование неразрушающего метода, тип прибора и его заводской номер.
3. Состав бетона, вид цемента и заполнителя, максимальная крупность заполнителя, класс бетона, условия твердения.

4. Значение  $S_T$  и отношение  $S_T / \bar{R}_\Phi$ .
5. Минимальное и максимальное значения прочностей бетона, которые можно определять по данной зависимости.
6. Подписи исполнителя и руководителя подразделения, устанавливавшего градуировочную зависимость.

Число испытаний на одном участке, расстояние между местами испытаний на участке и от края конструкции, толщина конструкции на участке испытания должны быть не меньше значений, приведенных в табл. 5

Таблица 5 – Исходные данные для подготовки испытаний

Наименование метода	Число испытаний на участке	Расстояние между местами испытаний, мм	Расстояние от края конструкции до места испытаний, мм	Толщина конструкции, мм
Отрыв со скалыванием	1	5 глубин вырыва	150	Удвоенная глубина установки анкера

При испытании методом отрыва со скалыванием участки должны располагаться в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры.

Испытания проводят в следующей последовательности:

- если анкерное устройство не было установлено до бетонирования, то в бетоне сверлят или пробивают шпур, размер которого выбирают в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора в зависимости от типа анкерного устройства;
- в шпуре закрепляют анкерное устройство на глубину, предусмотренную инструкцией по эксплуатации прибора, в зависимости от типа анкерного устройства;
- прибор соединяют с анкерным устройством;
- нагрузку увеличивают со скоростью 1,5-3,0 кН/с;
- фиксируют показание силоизмерителя прибора и глубину вырыва с точностью не менее 1 мм.

Если наибольший и наименьший размеры вырванной части бетона от анкерного устройства до границ разрушения по поверхности конструкции отлича-

ются более чем в два раза, а также если глубина вырыва отличается от глубины заделки анкерных устройств более чем на 5 %, то результаты испытаний допускается учитывать только для ориентировочной оценки прочности бетона.

### **Оформление результатов**

Результаты испытаний прочности бетона заносят в журнал, в котором должно быть указано:

- наименование конструкции, номер партии;
- вид контролируемой прочности и ее требуемое значение;
- вид бетона;
- наименование неразрушающего метода, тип прибора и его заводской номер;
- среднее значение косвенной характеристики прочности и соответствующее значение прочности бетона;
- сведения об использовании поправочных коэффициентов;
- результаты оценки прочности бетона;
- фамилия и подпись лица, проводившего испытание, дата испытания.

Результаты испытаний конструкций методами неразрушающего контроля представляются в следующем виде.

### **Результаты работы**

Определение фактической прочности при сжатии тяжелого бетона в железобетонных конструкциях выполнено неразрушающими методами контроля. Испытания бетона проведены «ультразвуковым методом» по ГОСТ 17624 и МДС 62-2.01 с использованием градуировочной зависимости, построенной по данным параллельных испытаний одних и тех же участков железобетонных конструкций методом отрыва со скалыванием и ультразвуковым методом.

Расчет фактического класса бетона монолитных железобетонных конструкций произведен на основании статистической оценки результатов определения прочности бетона, полученных при испытании неразрушающими методами, в соответствии со схемой «В» ГОСТ Р 53231.

За единичное значение прочности, используемое для расчета класса бетона в конструкции, принята прочность бетона на контролируемом участке.

Для проведения ультразвуковых измерений использован прибор измерения скорости ультразвука «Пульсар-1.2», соответствующий требованиям к оборудованию ГОСТ 17624.

Для проведения испытаний методом отрыва со скалыванием использован измеритель прочности «Оникс-ОС», соответствующий требованиям к оборудованию ГОСТ 22690.

Для определения наличия и положения арматурных стержней и хомутов в конструкциях применен прибор «Поиск-2.5», соответствующий требованиям к средствам контроля ГОСТ 22904.

На момент проведения работ монолитные железобетонные конструкции не оштукатурены, доступ к конструкциям свободный.

Порядок проведения работ:

- а) ознакомление с объектом, проектной и исполнительной документацией;
- б) определение мест испытания;
- в) выполнение контроля бетона монолитных железобетонных конструкций неразрушающими методами контроля:

- проведение испытаний ультразвуковым методом;
- анализ данных, полученных по результатам ультразвуковых измерений и определение участков проведения испытаний методом отрыва со скалыванием, для построения градуировочной зависимости;

- проведение испытания методом отрыва со скалыванием в соответствии с ГОСТ 22690;

- построение и проверка градуировочной зависимости «скорость распространения ультразвука – прочность бетона» в соответствии с требованиями ГОСТ 17624 и МДС 62-2.01;

- расчет прочности тяжелого бетона по результатам измерения скорости распространения ультразвука в монолитных железобетонных конструкциях с использованием градуировочной зависимости;

Число и расположение контролируемых участков в конструкциях принято в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53231, МДС 62-2.01.

На каждой конструкции (участке конструкции) определены шесть контролируемых участков, на каждом из которых после предварительной подготовки произведены измерения скорости распространения ультразвука.

На каждом контролируемом участке выполнено по два измерения скорости распространения ультразвука поверхностным способом, среднеарифметическое значение которых использовано для определения прочности бетона на контролируемом участке.

По результатам анализа данных, полученных при выполнении ультразвуковых измерений, определены участки проведения испытаний методом отрыва со скалыванием, необходимые для построения градуировочной зависимости.

Прочность бетона методом отрыва со скалыванием определена на 15 участках.

Испытания проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 22690, и руководства по эксплуатации прибора «ОНИКС-ОС» следующим образом.

Для проведения испытаний использовано анкерное устройство II типа диаметром 16 мм глубиной заложения 48 мм.

Построение градуировочной зависимости проведено в соответствии с МДС 62-2.01 и ГОСТ 17624.

Данные для построения и проверки градуировочной зависимости «скорость распространения ультразвука – прочность бетона» представлены в табл. 6



Таблица 6- Данные для построения градуировочной зависимости «скорость распространения ультразвука – прочность бетона»

Номер участка контроля	Наименование конструкции	Положение контролируемой конструкции в осях	Отметка	Средняя скорость распространения УЗК в конструкции, V, м/с	Прочность бетона на контролируемом участке определенная методом отрыва со скалыванием, $R_{\phi}$ , МПа	Расчетное значение прочности бетона на контролируемом участке $R_u$ , МПа	$\frac{ R_{\phi} - R_H }{S_n} \leq 2$	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>до отбраковки</b>								
$R_H = 0,01799 \cdot x - 39,7626$ $S = 1,5599$								
<b>после отбраковки</b>								
$R_H = 0,0155 \cdot x - 30,6481$ $S = 0,8427$								

Установленная зависимость описывается уравнением линейного:

$$R_H = 0,0155 \cdot x - 30,6481 \quad (2)$$

где  $x$  - скорость распространения ультразвука.

Средняя квадратическая ошибка  $S_T$  градуировочной зависимости, определена по формуле:

$$S_T = \sqrt{S_{T.H.M}^2 + S_{T.M.O.C}^2}, \quad (3)$$

где  $S_{T.H.M}$  - средняя квадратическая ошибка построенной градуировочной зависимости, определенная по ГОСТ 17624,  $S_{T.H.M} = 0,8427$  МПа;

$S_{T.M.O.C}$  - средняя квадратическая ошибка градуировочной зависимости метода отрыва со скалыванием, принимаемая при анкерном устройстве с глубиной заделки 48 мм равной 0,04 от средней прочности бетона (28,1 МПа) участков использованных при построении градуировочной зависимости,  $S_{T.M.O.C} = 1,1257$  МПа.

Среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости  $S_T = 1,4062 \leq 4,221$  (не превышает 15% от среднего значения прочности бетона участков конструкций  $R_{ф.ср.}=28,1$  МПа), коэффициент корреляции зависимости равен  $r = 0,937 (>0,7)$ , что соответствует требованиям п. 2 МДС 62-1.2000.

Погрешность определения прочности бетона по установленной зависимости равна 4,9966 % (<12%), что соответствует предъявляемым требованиям МДС 62-2.01 и приложение 4 ГОСТ 17624.

С использованием градуировочной зависимости «скорость распространения ультразвука – прочность бетона» (2), и результатов измерений скорости распространения ультразвука, рассчитаны значения предела прочности при сжатии тяжелого бетона на контролируемых участках.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В условиях рыночных отношений существенно возрастает роль служб по контролю качества продукции предприятий строительной отрасли в обеспечении профилактики брака на производстве, усиливается их ответственность за достоверность и объективность результатов оценки параметров качества готовой продукции, недопущение поставки потребителям продукции низкого качества. Операции контроля качества, осуществляемые службой качества предприятия, являются неотъемлемой частью процесса производства продукции начиная с первых шагов технологического процесса и завершая внепроизводственным циклом – хранением готовой продукции на складе, его транспортировкой и отгрузкой потребителям.

Для производства качественной продукции, удовлетворяющей требованиям потребителя, необходима организация контроля, основанного на системном подходе, который должен осуществляться на стадии разработки, приготовления и потребления продукции.

Для эффективной реализации контроля каждое предприятие должно создавать Технологические регламенты (технологические карты) с учетом конкретных особенностей производства. В них регламентируются правила ведения технологических операций, контролируемые параметры процесса и продукции, сроки поверки и замены средств измерений.

Системы контроля классифицируют по методам проведения, объектам контроля, этапам производственного процесса, характеру воздействия на качество продукции и другим признакам.

В зависимости от уровня проведения различают государственный, ведомственный и производственный контроль.

Государственный надзор за качеством строительной продукции осуществляют районные, городские, областные (краевые, республиканские) службы государственного строительного надзора. Объектами контроля является не только качество продукции, но и организация производственного процесса, состояние оборудования и нормативно-технической документации.

Ведомственный контроль осуществляют преимущественно службы стандартизации Госстроя России или соответствующие службы крупных объединений предприятий.

Производственный (технический) контроль организуется в пределах каждого предприятия по выпуску строительных материалов. Объектами контроля на предприятиях могут быть материал, полуфабрикат, заготовка, технологический процесс. Технический контроль, как правило, включает входной контроль качества сырьевых материалов, операционный контроль при выполнении или завершении технологических операций, приемосдаточные и периодические испытания готовой продукции.

В зависимости от контролируемого этапа производственного процесса технический контроль подразделяется на входной, операционный и приемочный.

Входной контроль заключается в определении качества сырья, материалов и комплектующих изделий, поступающих от поставщика. Операционный контроль осуществляется в процессе выполнения или после завершения определенных тех-

нологических операций. Приемочный контроль проводят с целью определения качества готовой продукции установленным требованиям. Он включает приемосдаточные и периодические испытания.

Организация технического контроля является неотъемлемой частью двух документов: технологического регламента (технологической карты) производства конкретного изделия и стандарта предприятия (СТП). Составление карты технического контроля начинают с анализа функциональной технологической схемы производства этого изделия, а затем – нормативно-технической документации (ГОСТ, ТУ, ТТУ) с целью определения требований к качеству сырьевых материалов, полуфабрикатов, комплектующих для разработки карты входного контроля, а готовой продукции – для составления карты приемочного контроля.

В картах входного контроля основное внимание уделяют частоте и месту отбора пробы сырьевого материала, приводят перечень контролируемых свойств и документов, в соответствии с которыми они определяются и должны соответствовать. Кроме того, в состав карты можно включать перечень оборудования и инструментов для определения конкретного свойства.

В карту операционного контроля следует включать перечень основных технологических операций, объект контроля, периодичность, параметры контроля и погрешность их определения, место и средства контроля, ответственное лицо за его выполнение.

Карта приемочного контроля устанавливает перечень контролируемых свойств и периодичность их определения, необходимое оборудование и инструмент, методику определения конкретного свойства, документ по оценке уровня качества продукции по этому свойству и лицо, ответственное за проведение контроля.

На любой технологической линии по выпуску продукции строительного назначения всегда можно выделить участки, ответственные за формирование качества готовой продукции. В свою очередь, на этих участках всегда можно установить параметры обеспечивающие формирование качества готовой продукции как со стороны работы технологического оборудования, так и со стороны сырье-

вых материалов, которые перемещаясь по участкам технологического цикла обеспечивают формирование готовой продукции требуемых параметров качества. Перечень видов испытаний и параметров качества, которые необходимо определять в процессе измерений, служат основой для формирования оснащения испытательных лабораторий службы качества предприятий, выпускающих продукцию строительного назначения.

Современный рынок испытательного оборудования и средств измерений достаточно разнообразен с точки зрения организации процесса измерений. Все испытания укрупнено можно разделить на две категории: в основе одних лежат разрушающие методы контроля, вторые основываются на принципах неразрушающих методов контроля качества продукции.

Анализ технологической схемы изготовления любой продукции строительного назначения позволяет выделить отдельные участки и единицы технологического оборудования отвечающие за формирование параметров качества готового изделия в процессе его изготовления. Участки, основное оборудование, параметры его работы и свойства сырьевого материала подлежащие контролю формируют перечень параметров, подлежащих контролю, что является основой формирования перечня требуемых средств измерения.

Отдельные приборы для наладки и контроля точности работы технологического оборудования предприятий строительной индустрии представлены в табл. 1.

**Таблица 1 - Приборы для наладки и контроля точности работы технологического оборудования предприятий строительной индустрии**

Наименование оборудования	Внешний вид	Технические характеристики
1	2	3
Виброметр строительный ВИСТ - 2		<p>Предназначен для определения параметров колебаний различных виброустановок, для вибродиагностики оснований, фундаментов машин и механизмов.</p> <p>Диапазоны амплитуд 0,3-3мм</p> <p>Диапазон виброскорости 0,1-200мм/с</p> <p>Диапазон частот 5-200Гц</p> <p>Предельная погрешность 5%</p> <p>Габариты датчика d25x32</p>
Измеритель механических напряжений и колебаний ИНК - 2		<p>Предназначен для измерения напряжений в преднапряженной арматуре ж/б конструкций и изделий, а также параметров колебаний виброустановок для уплотнения бетонной смеси.</p> <p>Диапазон напряжений 50-2000Мпа</p> <p>Диапазон амплитуд 0,1-3мм</p> <p>Диапазон частот 5-200Гц</p> <p>Предельная погрешность 3%</p> <p>Диапазон виброскорости 0,1-200мм/с</p>
Мобильный термограф РТВ - 1		<p>Предназначен для контроля температуры жидких и газообразных сред, сыпучих материалов, трубопроводов и т.п.</p> <p>Диапазоны - 0...+1200°C</p> <p>Класс точности 0,5; 1,0</p> <p>Дискретность 0,1;1,0 град</p> <p>Габаритные размеры 120x70x20мм</p> <p>Масса 0,15кг</p>
Многоканальный регистратор тепловых процессов ТЕРЕМ - 3		<p>Предназначен для измерения, регистрации и просмотра информации от термодатчиков при контроле технологических процессов в различных отраслях промышленности, а также при исследовании теплозащитных свойств конструкций и сооружений, температурных полей и т. д.</p> <p>Количество каналов 8</p> <p>Диапазон температур -50...+1200°C</p> <p>Предельная погрешность 0,5%</p> <p>Период измерения 1сек...60мин</p> <p>Количество отчетов до10000</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Многоканальный регулятор-регистратор РТМ – 5.х</p>		<p>Предназначен для программного автоматического управления процессами термообработки ж/б изделий.  Количество каналов регулирования 8  Диапазон регулирования <math>-0..+125^{\circ}\text{C}</math>  Погрешность 0,5%  Дискретность <math>0,1^{\circ}\text{C}</math>  Время цикла <math>0...200\text{час}</math>  Длина линии связи до 500м  Интерфейс RS485</p>
<p>Термогигрометр регистрирующий ТГ - 1</p>		<p>Предназначен для измерения и регистрации относительной влажности и температуры воздушных газовых сред. Применяется для контроля среды в сушильных и пропарочных камерах.  Диапазон измерения влажности. <math>0..98\%</math>  Погрешность по влажности 3%  Диапазон измерения температур <math>-40..+60^{\circ}\text{C}</math>  Погрешность по температур 0,5%  Период регистрации <math>1..100\text{ мин}</math>  Габариты датчика <math>\varnothing 16 \times 70\text{мм}</math></p>

Для более полного контроля за качеством материала непосредственно в изделиях недостаточно обычных стандартных методов испытаний, которые оценивают свойства продукции с определенной степенью достоверности.

В настоящее время широко используют неразрушающие методы оценки прочности, плотности, однородности или дефектности структуры изделия или отдельного его участка и позволяющие определить искомые свойства материала без разрушения готовой продукции.

С помощью неразрушающих методов может быть организован сплошной контроль за качеством материала в изделии путем его испытания непосредственно во время и после изготовления продукции строительного назначения и внесения необходимых корректив в производственный процесс для обеспечения постоянного высокого качества продукции. На их основе создаются автоматизированные системы контроля, которые входят в общий комплекс управления производством.

Наиболее часто при производстве изделий строительного назначения используются следующие методы неразрушающего контроля.

Ультразвуковой импульсный метод испытания применяют для определения упругих характеристик и прочности строительных материалов; изучения структурных изменений в материале; контроля процесса твердения бетона; обнаружения и оценки дефектов в материале, в сварных швах и т. д.

Физическая основа использования ультразвукового импульсного метода состоит в наличии связи между скоростью распространения упругих волн и такими его характеристиками, как плотность, модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона.

Скорость распространения продольных упругих волн  $V_{np}$  связана с плотностью и модулем упругости зависимостью

$$V_{np} = K \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от коэффициента Пуассона и размера испытываемого образца или элемента конструкции.

Определив с помощью прибора скорость распространения ультразвука и рассчитав модуль упругости материала, можно оценивать изменения, происходящие в его структуре при длительных испытаниях материала (определение морозостойкости, коррозионной стойкости и пр.).

Прочность тяжелых и легких бетонов ультразвуковым способом определяется в соответствии с ГОСТ 17624 с помощью приборов, которые позволяют измерять в образцах и конструкциях время распространения ультразвука.

При определении способом *сквозного прозвучивания* ультразвуковые преобразователи устанавливают с противоположных сторон изделия или конструкции (рис. 1 а).

При измерении способом *продольного профилирования* приемный преобразователь устанавливают последовательно на позиции, расположенной на линии, соединяющей центры установки приемного и излучающего преобразователей.



В случае *поверхностного прозвучивания* (рис. 1 б) приемочный преобразователь устанавливают на определенном расстоянии от излучающего прибора, обычно 150 – 200 мм.

Связь между скоростью, полученной способом поверхностного прозвучивания, и скоростью при сквозном прозвучивании определяют по формуле

$$V=V_{нов} \cdot K, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость распространения ультразвука при сквозном прозвучивании, м/с;

$V_{нов}$  – скорость распространения ультразвука при поверхностном прозвучивании, м/с;

$K$  – переходной коэффициент.

Его вычисляют по средним результатам измерений скорости способами сквозного и поверхностного прозвучивания на пяти образцах-балочках размером 100 × 100 × 400 мм.

Для оценки прочности бетона на отдельных участках изделий и конструкций предварительно устанавливают градуировочную зависимость «скорость-прочность» по ГОСТ 17624. Затем рассчитывают прочность бетона по фактическим результатам скорости распространения ультразвука в изделии.

Прозвучивание балок, колонн и других подобных конструкций производят в поперечном направлении, причем ультразвуковые преобразователи стараются устанавливать в местах, где отсутствует арматура.

В случае отсутствия градуировочной зависимости, но при наличии ограниченного числа контрольных образцов прочность бетона в конструкции можно рассчитать ориентировочно по эмпирической формуле:

$$R=q \cdot V^4, \quad (3)$$

где  $q$  – коэффициент, определяемый в результате подстановки в формулу средних значений прочности и скорости распространения ультразвука в образцах;

$V$  – скорость распространения ультразвука в контролируемых участках конструкции.

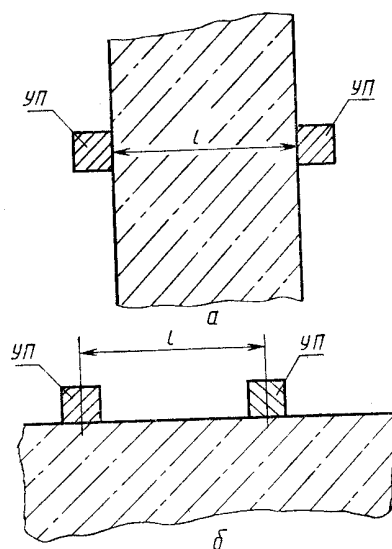


Рис. 1. Схема испытания бетона:  
а – способом сквозного прозвучивания; б – поверхностного прозвучивания;  
УП – ультразвуковые преобразователи;  $\ell$  - база прозвучивания

Этой формулой можно пользоваться, если скорость распространения ультразвука отклоняется от среднего значения в испытываемых образцах не более чем на 10 %.

Аналогичная методика сквозного прозвучивания используется при техническом контроле прочности при сжатии в производстве силикатного кирпича и камней – ГОСТ 24332. Особенность заключается лишь в правилах построения градуировочных зависимостей и их применения.

Разработан ультразвуковой способ контроля твердения в сборных и монолитных изделиях и конструкциях, приготавливаемых из тяжелого бетона. Получаемая информация используется, например, для автоматического управления режимами тепловой обработки и выбора оптимальных режимов твердения бетона.

При ультразвуковой дефектоскопии бетона невозможно выявить мелкие одиночные дефекты, однако крупные дефекты, поперечный размер которых больше диаметра заполнителя, можно определить одним из двух уже описанных способов: сквозного прозвучивания и продольного профилирования.

При способе *сквозного прозвучивания* на двух противоположных сторонах изделия наносятся прямоугольные координатные сетки (со стороной квадрата 10, 20 или 50 мм). Линии, соединяющие узлы на противоположных гранях, должны быть кратчайшими трассами прозвучивания (рис. 2).

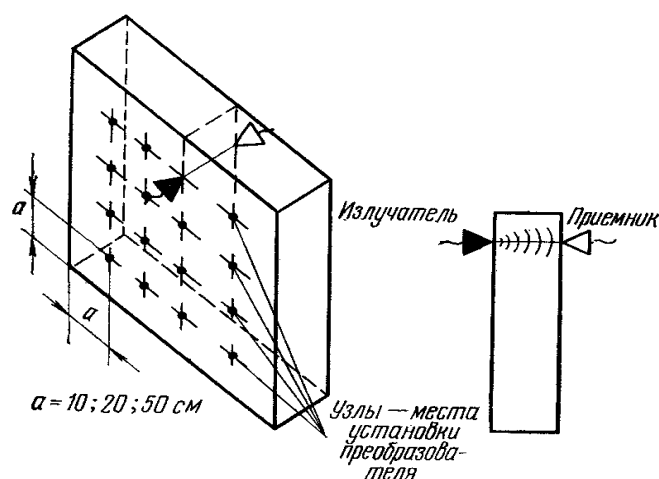


Рис. 2. Ультразвуковая дефектоскопия бетона методом сквозного прозвучивания

Последовательно прозвучивая конструкцию парой «излучатель-приемник», установленной в каждом створе узлов, получают поле скоростей ультразвука, затем, нанося координатную сетку на чертеже и поставив в узлах значения измеренных скоростей, проводят изоспиды – линии равных скоростей.

Рассматривая изоспиды, можно выделить участки пониженных скоростей, т. е. участки конструкции, на которых имеются дефекты.

Второй способ эффективен для прозвучивания дорожных и аэродромных покрытий, монолитных плит покрытий и т.д., но он труднее проводится и обрабатывается. Значительно чаще при размещении преобразователей ультразвуковых колебаний на одной поверхности решается задача по определению вышедшей на поверхность трещины.

Считается, что продольная волна распространяется кратчайшим путем только по ненарушенному бетону (рис. 3).

Расчеты производят по формуле:

$$y = \frac{v}{2} \cdot \sqrt{t_1^2 - t^2}, \quad (4)$$

где  $t$  – время распространения продольных волн ультразвука на базе  $x$  (см) без трещин;

$t_1$  - время распространения продольной волны, огибающей трещину;

$v$  – скорость распространения продольных волн в ненарушенной части бетона.

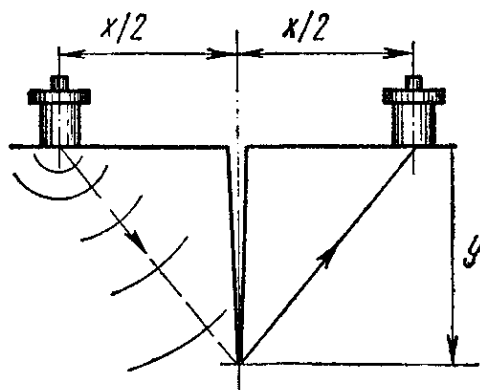


Рис. 3. Определение глубины трещины с помощью ультразвукового импульсного метода

Резонансный метод основан на измерении частоты собственных продольных, изгибных и крутильных колебаний бетонных образцов правильной формы или небольших конструкций, а также затухания этих колебаний. Этот метод позволяет определить:

- динамический модуль упругости бетона;
- динамический модуль сдвига бетона;
- динамический коэффициент Пуассона;
- логарифмический декремент затуханий.

Для определения частоты собственных колебаний бруса используют специальные приборы типа ИЧМК (рис. 4), в состав которых входит генератор звуковых частот и возбудитель механических колебаний, а также система приема (приемник механических колебаний, усилитель) и индикатор.

Погрешность аппаратуры для определения собственных колебаний образцов не должна превышать 2 %. Испытание образца производится по схемам, приведенным на рис. 5.

Определение динамического модуля упругости производят по формуле:

$$E_g = \frac{4\pi^2 l^4 F \rho}{\xi^4 I}, \quad (5)$$

где  $l$  – длина бруса;  $\xi$  – величина, учитывающая тип колебаний;

$F$  – площадь поперечного сечения образца;  $\rho$  – плотность материала;

$I$  – момент сечения бруса;  $f$  – частота собственных колебаний изгиба.

При колебаниях первого тона  $\xi=4,73$ , при этом расстояние от опоры бруса до его конца должно быть  $0,224 l$ .

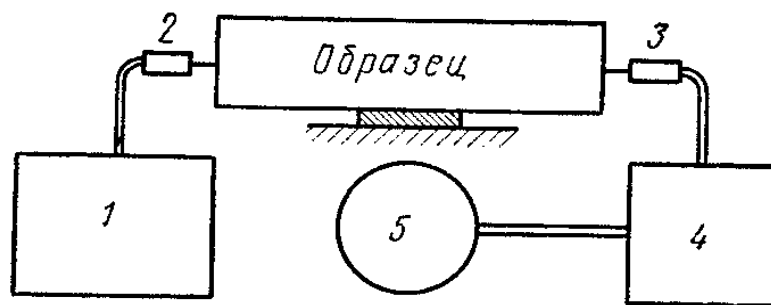


Рис. 4. Схема резонансного прибора:

1 – генератор звуковых частот; 2 – возбудитель механических колебаний;  
3 – приемник механических колебаний; 4 – усилитель; 5 – индикатор

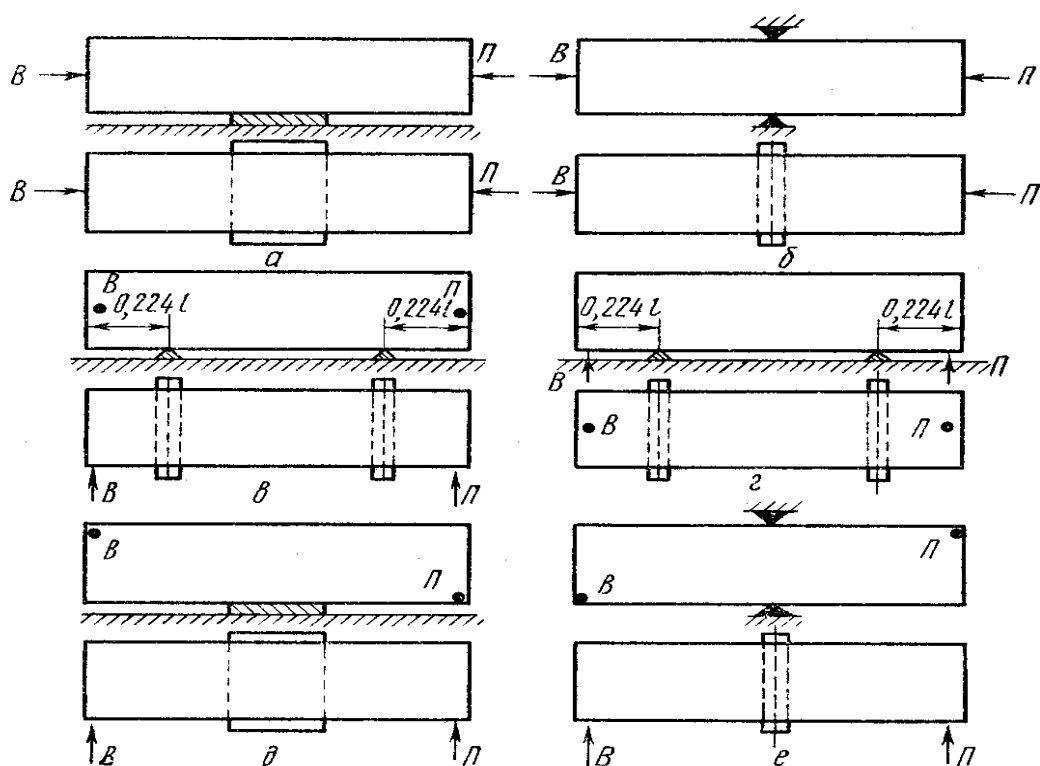


Рис. 5. Схемы установки образцов:

*a* и *б* – при определении частоты собственных продольных колебаний  
*в* и *г* – при определении частоты изгибных колебаний; *д* и *е* – при определении частоты кру-  
тильных колебаний; В – возбудитель и П – приемник колебаний

Динамический модуль упругости  $E_g$  можно определить по частоте соб-  
ственных продольных колебаний на основе формулы:

$$E_g = 4 l^2 f_{2np}^2 \rho, \quad (6)$$

где  $f_{2np}$  – частота собственных продольных колебаний

Бетон – упруговязкопластический материал. Значение  $E_g$  характеризует лишь его упругие свойства и поэтому не дает полной характеристики материала. Поэтому параллельно с  $E_g$  следует определить и логарифмический декремент затухания колебаний  $\delta$ , отражающий неупругие свойства и дефекты структуры материала.

Логарифмический декремент затухания рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_2 - f_1}{f_0}, \quad (7)$$

где  $f_0$  – частота собственных колебаний (частота резонанса);

$f_1$  и  $f_2$  – частоты колебаний, соответствующие амплитуде, равной  $0,5 A_{max}$  до и после резонанса ( $A_{max}$  – амплитуда колебаний при частоте  $f_0$ ).

Затухание колебаний в твердом теле объясняется наличием сил внутреннего трения, которые способны превратить необратимым образом энергию упругих колебаний в тепловую. Это относительное рассеивание энергии является специфическим свойством материала. Связь между затуханием колебаний и дефектами в структуре выявляется с помощью коэффициента внутреннего трения

$$B = \frac{f_2 - f_1}{\sqrt{2} \cdot f_0}. \quad (8)$$

Величину, обратную  $B$ , называют добротностью материала  $Q$ . Эти две меры внутреннего трения связаны простой зависимостью

$$B = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi}. \quad (9)$$

С помощью добротности можно оценивать неупругие свойства бетона.