



Ананенко Алексей Анатольевич — заведующий кафедрой «Строительные материалы», доктор технических наук, профессор, автор более 100 печатных работ. Выпускник 1958 г. факультета «Мосты и тоннели». В НИИЖТе работает с 1959 г. — инженером, руководителем группы ЛМК, преподавателем, доцентом, профессором на кафедрах «Высшая математика», «Строительная механика», «Строительные конструкции» и «Строительные материалы», проректором НИИЖТа по учебной работе.

Награжден орденами Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, четырьмя медалями и знаком «Почетный железнодорожник».

УДК 620.22

А.А. АНАНЕНКО

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: НАУЧНЫЕ И УЧЕБНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В статье отмечено существование в науке о строительных материалах проблем, остающихся длительное время актуальными (в частности проблема создания бетонов с высокими прочностными характеристиками). Освещены проблемы изучения дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

В самостоятельную отрасль наука о строительных материалах выделилась в XIX в. До этого момента сведения о строительных материалах добывались учеными, занимающимися химией, архитектурой, фортификацией, физикой...

Дисциплина преподается в НИИЖТе (СГУПС) с момента образования вуза, т.е. добрую половину периода существования науки о материалах. Название учебной дисциплины было незатейливым и точным «Строительные материалы», «Строительные материалы для искусственных сооружений», «Дорожно-строительные материалы». Появившийся в 2000 г. стандарт изменил название учебной дисциплины и обозначил ее как «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

Наука о строительных материалах изучает не только конструкционные материалы, но и свойства гидро-тепло-звукоизолирующих, лакокрасочных, отделочных и радиационостойких материалов. Технология изготовления материалов — очень важная составляющая в создании свойств строительных материалов и изделий. Важная, но только составляющая. Инженер должен знать ассортимент строительных материалов, свойства и область их применения, сырье и способы получения, хранение и транспортировку материалов.

В неравенствах, представляющих условия прочности, жесткости и устойчивости конструкций или их элементов, правая часть определяется материаловедом, учитывающими не только технологию изготовления материала, но и его физические, химические, минералогические характеристики, режим нагружения, возраст конструкций и условия эксплуатации. На изучение этих характеристик и зависимостей доброго десятка весьма отличающихся друг от друга материалов (металлы, бетоны, пластмассы, древесина, клинкерные изделия) отводится два семестра по 2–3 ч в неделю. Если учесть что учебные планы регулярно уплотняются из-за появления новых материалов, новых технологий и сверхновых задач защиты среды обитания человека, то одной из проблем учебной дисциплины «Строительные материалы» следует считать дефицит

учебного времени. Второй проблемой является неудачно выбранное место в графике учебного процесса — 3-й и 4-й семестры. Физику и сопротивление материалов изучают параллельно, поэтому нужную информацию о плотности, пористости, прочности, модуле упругости, релаксации напряжений и других характеристик получают материаловеды в начале 4-го семестра, еще позже — информацию о минералогии из курса геологии. Другими учебными проблемами могут являться внутренние проблемы науки о конкретном строительном материале, остающиеся длительное время актуальными. Например, проблема создания бетонов с высокими прочностными характеристиками занимает технологов-бетонщиков уже более века.

Анализ состояния теории прочности деформирования бетона позволяет утверждать, что пока нет законченной теории, всеобъемлюще объясняющей поведение бетона при нагружении и позволяющей прогнозировать изменение свойств во времени, при изменении режимов загрузки, эксплуатационных условий. В производственной практике возможности вяжущих с учетом их расхода по-прежнему используются не более чем на 30 %. Феномен явления не в сложности проблемы, а в бесконечности ряда задач, составляющих проблему, решение которых следует искать в определенной последовательности и до заранее обозначенной глубины с тем, чтобы полученные результаты были сопоставимы и пригодны для формирования базы данных системы «составы — технология — структура — свойства».

Прочность бетона, как хрупкого материала, определяется сопротивлением отрыву. Разрушение бетона при сжатии и растяжении происходит, когда деформации достигают предельного значения. При этом прочность на растяжение определяется предельной растяжимостью бетона в направлении действия силы, а прочность на сжатие зависит от предельной растяжимости в направлении, перпендикулярном к действию силы.

Эта простая истина, реализуемая в расчетах несущей способности бетона, обычно дополняется ссылкой на все объясняющий и решающий закон водоцементного отношения, утверждающий, что прочность бетона R_0 , приготовленного на одних и тех же материалах, не зависит от его состава (в том числе и от расхода цемента) и определяется как

$$R_0 = f(B/C).$$

Степень упрощения явления и приближенность получаемой истины косвенно можно оценить по качеству и количеству неучтенных факторов, существенно влияющих на прочность и деформативность бетона.

Положение максимума прочности в графике этой функциональной зависимости может смещаться при изменении способов укладки бетонной смеси и существенно будет меняться прочность бетона, соответствующая максимуму. Закон водоцементного отношения весьма чувствителен к виду крупного заполнителя (щебень, гравий), его чистоте и качеству. Прочность бетона зависит также от степени гидратации цемента, относительной прочности цементного камня, тонкости помола клинкера, формы и размеров зерен заполнителя, характера его поверхности, времени перемешивания смеси в бетономешалке, режима уплотнения смеси при укладке ее в опалубку и других факторов.

Роль этих факторов непостоянна, она существенно зависит от их сочетания. Например, образцы одного и того же бетона, твердеющего в разное время (или

в одно и то же время, но в различных влажностных условиях), представляют собой образцы различных материалов, с различной структурой и физико-механическими характеристиками.

Попытки использовать уже существующие или вновь создаваемые феноменологические, статистические и физические теории прочности, а также методы исследования прочности бетона с позиции механики разрушения пока не стали основой для создания законченной теории деформирования и разрушения бетона.

Феноменологические теории прочности (и первые три, так называемые классические, появившиеся еще до получения бетона, и все последующие: теория Мора со всеми усовершенствованиями, гипотезы Бреснера и Пастера, Блейки, Гвоздева, объединенная теория прочности Давиденкова и Фридмана) не дают объективной оценки несущей способности бетона потому, что основаны на допущении, что среда деформируемого тела является сплошной, однородной и, следовательно, напряжение, деформации и перемещения считаются непрерывными и дифференцируемыми функциями координат точек тела.

Статистические теории более детально анализируют сущность разрушения. Они предполагают в непрерывной изотропной среде отдельные дефекты (трещины, микротрещины, пустоты), которые, подчиняясь статистическим законам, определяют прочность бетона. При этом прочность материала полностью зависит от прочности наиболее слабого звена [1, 2].

Создатели первой статистической теории прочности — Вейбул, Конторова и Френкель — считают, что образец из материала можно рассматривать состоящим из большого количества нитей различной прочности, соединенных параллельно, либо из отдельных звеньев, установленных последовательно.

Вейбул предложил в качестве кривой распределения прочностей отдельных звеньев показательную функцию. Его теория хорошо подтвердилась в опытах Е.М. Шевандина, который на образцах из фосфористого железа показал, что хрупкая прочность увеличивается с уменьшением размеров образцов, а дисперсия частных значений увеличивается как при растяжении, так и при изгибе.

В статистической теории прочности Т.А. Конторовой и Я.И. Френкеля закономерность распределения дефектов по степени их опасности представлена функцией Гаусса. Результаты испытания на разрыв образцов поваренной соли показали удовлетворительное совпадение с результатами, вычисленными по формуле для малых образцов, и хорошее — для больших образцов из каменного угля.

Другие исследователи статистической теории прочности бетона предлагали иные функции распределения дефектов, вводили усовершенствования в уравнения прочности, но все эти попытки пока не позволили получить центрального уравнения статистической теории разрушения хрупких тел в общем виде и даже не дают единой оценки многих факторов, влияющих на прочность бетона (размеры образцов, их объем, толщина плиты пресса, отношение величины грани образца к крупности заполнителя и многие технологические воздействия).

Статистические теории прочности позволяют объяснить различия между теоретической прочностью вещества и ее технической прочностью, определяемой дефектами структуры вещества, без рассмотрения самой структуры. Гриффитс установил, что с уменьшением диаметра стеклянных нитей от 1,02 до

0,0033 мм прочность возрастает от 170 до 3460 МПа. Он объяснил это тем, что в нитях имелись микротрещины, которые в тончайших из них были сведены к минимуму.

Эти теории пригодны для решения задач на масштабный фактор, они не могут объяснить влияния на прочность многих технологических факторов, которые не приводят к образованию трещин, но существенно изменяют прочность и деформативность бетона.

Многие задачи прочности бетона, не доступные феноменологическим и статистическим теориям, находят вполне убедительные решения с позиции *физических теорий прочности*, в которых глубоко изучается структура материала, анализируется физическая сущность поведения материала под нагрузкой, исследуется характер и величина связи между структурными элементами бетона и возможные механизмы нарушения сплошности материала.

Физико-механические свойства цементного камня и заполнителя неодинаковы, разнообразна и форма связи между ними. Кроме того, образование структуры цементного камня сопровождается физико-химическими превращениями, которые существенно отражаются на объемных изменениях в бетоне. Следовательно, структура бетона представляет собой систему, свойства которой подвержены значительному разбросу по прочности и деформативности, механизму трещинообразования и характеру разрушения. Эти характеристики зависят от прочностных и деформативных свойств заполнителя и матрицы, от качества сцепления заполнителя с матрицей, характера распределения заполнителя в объеме бетона, его геометрических и петрографических свойств, деформации усадки матрицы. Сюда же необходимо добавить не упрощающий задачу фактор: уже в начальной стадии загрузки бетона матрица испытывает предельные деформации, приводящие к образованию микротрещин.

Свойства матрицы формируются в процессе физико-химических превращений при взаимодействии цемента с водой; наиболее активной зоной этих изменений является адсорбционный и диффузный слой сольватной оболочки, окаймляющие зерна цемента. Здесь в пересыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ продукты гидролиза компонентов цемента выделяются в виде субмикrokристаллов и по мере роста концентрации их вокруг негидратированных цементных частиц образуют гелевые оболочки. По окончании коллоидации наступает стадия твердения, которая характеризуется контракцией объема геля вокруг цементных зерен. Прочность окаймляющих цементные ядра новообразований (прогидратированной части цемента), по данным С.С. Гордона, достигает 120 МПа.

Сцепление между цементным камнем и заполнителем может достигать 0,5–0,65 прочности на растяжение цементного камня или раствора и зависит от вида и текстуры поверхности заполнителя и B/C .

Важнейшим звеном в обосновании предпосылок физической теории прочности бетона является оценка неоднородности внутреннего поля напряжений, вызываемой различием механических характеристик составляющих бетон материалов и существенно усложняемой деформациями усадки цементного камня. Сочетание столь неоднородных факторов приводит к возникновению внутреннего поля напряжений, распределение которых не подчиняется законам механики сплошных сред.

С начала 60-х гг. объектом особого внимания материаловедов становится новое направление в механике и физике прочности — *механика разрушения*. В работах Г.И. Баренблатта, Д.Д. Ивлева, В.В. Панасюка, В.З. Партона, Л.И. Слепяна, А. Макклитона, А. Аргога, Л.М. Качанова и др. приводятся различные направления исследований: совершенствование полуэмпирических теорий; «феноменологические» подходы к описанию процесса разрушения, при которых материал рассматривается как некоторая сплошная среда, но с изменяющимися в процессе накопления повреждений свойствами; исследование зарождения взаимодействия и развития нарушений структуры материала на дислокационном и других уровнях; изучение условия равновесия, развития и взаимодействия макроскопических трещин в телах различной конфигурации, в средах с различными свойствами при фиксированных или изменяющихся нагрузках.

Позднее выходят работы Р.И. Будештского, Ю.В. Зайцева [3, 4], в которых структурная теория прочности бетона обогащается новыми возможностями благодаря интенсивному использованию математических методов исследования.

Если в статистических теориях прочности хрупких тел обычно исходят из гипотезы слабейшего звена, т. е. предполагается последовательное соединение структурных элементов, то в теории прочности зернистых композитов учитывается как последовательное, так и параллельное их соединение.

Модель Будештского позволяет по статистическим характеристикам структурных элементов композита (зерно, матрица и их сцепление) прогнозировать предел прочности образца (на растяжение). Также Р.И. Будештский предложил теорию масштабных эффектов прочности зернистых композитов, рассмотрел геометрию роста магистральной трещины и задачу о прогнозе коэффициента вариации прочности бетона в технологии.

Ю.В. Зайцев, рассматривая материал как твердое тело в виде матрицы с включениями различного размера, с дефектами первого (поры) и второго (трещины) рода на различных уровнях структуры (макро-, мезо-, микро- и субмикроструктура), в процессе исследования образования и развития трещин показал деформирование и разрушение бетона при линейном растяжении (сжатии), а также при многоосном сжатии.

Приведенные выше исследования говорят о возможностях методов механики разрушения при аналитических решениях многих ранее не решаемых задач прочности и деформативности бетонов. Однако считать, что найден «универсальный инструмент» нет оснований. Расчет бетона по-прежнему остается проблемой. «Инструмент» не пригоден также для создания метода проектирования бетонов с заданными физико-механическими свойствами, во-первых, потому, что с его помощью можно оценить качество и предугадать характер поведения материала с уже сформированной структурой. Структура же сложно зависит от состава смеси, технологии ее укладки, условий хранения и других факторов. Она существенно меняется с увеличением возраста, уменьшением или увеличением водосодержания. Во-вторых, до сих пор нет единого мнения о соотношении пластических и хрупких составляющих в процессе трещинообразования бетона, без чего практически не возможен объективный анализ процесса разрушения бетона. И, в-третьих, без учета состава бетона, технологии его изготовления исходная модель материала становится объектом исследования, где можно получать лишь качественные характеристики.

Если упростить систему «бетон» до двухкомпонентного тела — матрицы из цементного камня и заполнителей, — то несущую способность бетона можно записать уравнением

$$N_6 = f(R_3, R_k, R_{\text{сц}}, E_3, E_k, V_3, \lambda_3, \mu_3, \mu_k, k_3, k_k),$$

где N_6 — предельное состояние бетона (пределы прочности и деформативности); R_3, R_k — прочностные характеристики заполнителя и цементного камня (матрицы); E_3, E_k — модули деформации заполнителя и матрицы; $R_{\text{сц}}$ — прочность сцепления заполнителя с матрицей; V_3 — объем заполнителя в единице объема бетонного образца; λ_3 — геометрическая характеристика заполнителя; μ_3, μ_k — коэффициенты Пуассона заполнителя и матрицы; k_3, k_k — коэффициенты условий работы заполнителей и матрицы при стесненных деформациях [5, 6].

Совершенно очевидно, что даже в упрощенном представлении *физическая теория прочности* бетона имеет лишь частные решения, и, следовательно, для бетона до сих пор не существует законченной теории деформирования и разрушения. Физическая теория прочности бетона переживает этап накопления экспериментальных данных, а аналитическое их обобщение носит характер поиска. Удачным приобретением такого поиска можно считать внедрение в исследовательскую и производственную практику вероятностно-статистических концепций анализа и оптимизации инженерных решений в области материаловедения и технологии [7–10]. Но для практической реализации такой концепции требуется огромная подготовительная работа по определению, анализу и оценке прочностных, деформативных, структурных, физико-механических и других характеристик, необходимых для получения уравнения состояния технологической системы, где не известны ни вид функции, ни полный набор факторов, ни законы распределения случайных величин, ни оценка предыстории исследования.

Отсюда очередная (не последняя) учебная проблема строительного материаловедения. При существующем отношении к «устаревшим» экспериментальным исследованиям, реально оцениваемым и реализуемым в условиях лаборатории (практически исчезнувшей), нынешние ученики-материаловеды никогда не станут специалистами-материаловедами, а материалы и изделия будут по непонятным причинам разрушаться вместе с аквапарками, гражданскими зданиями, самолетами и мостами. При этом расчеты на прочность, жесткость и устойчивость будут свидетельствовать о полном соответствии истине перечисленных неравенств, потому что они получены программистами.

Литература

1. Волков С.Д. Статистическая теория прочности. М.; Свердловск, 1960. 176 с.
2. Седракян Л.Г. Элементы статистической теории деформирования и разрушения хрупких материалов. Ереван, 1968. 247 с.
3. Будештский Р.И. Элементы теории прочности зернистых композиционных материалов. Тбилиси, 1972. 81 с.
4. Зайцев Ю.В. Материаловедение и определение прочности бетона методами механики разрушений. М., 1982. 81 с.
5. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Скочеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. Минск, 1973. 232 с.
6. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М., 1981. 464 с.
7. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. Киев: Будівельник. 1989. 240 с.

8. *Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А.* Методы компьютерного материаловедения при анализе взаимосвязи реологических показателей композиций // Вісник Донбас. НАБА. 2001. Вып. 1 (26). С. 67–74.

9. *Баженов Ю.М., Воробьев В.А., Илюхин А.В.* Основные подходы к компьютерному материаловедению строительных композитных материалов // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 2–4.

10. *Кондрашенко В.И.* Применение методов компьютерного материаловедения в биотехнических исследованиях // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 19–23.