

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МИКРОМЕХАНИКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сидорова А.И., ассистент, Леонович С.Н., д-р. техн. наук, профессор  
(БНТУ)

**Аннотация.** В современной практике существует необходимость моделирования свойств конструкционных материалов, обусловленная экономией материально-технических ресурсов и повышением качества строительной продукции при использовании методов микромеханики.

Актуальное развитие строительного материаловедения, как результат исследования в разных областях естественных наук, тесно связано с запросами современного строительства. Технический прогресс, с одной стороны, порождает необходимость разработки новых конструкционных материалов, а с другой – в значительной степени обусловлен результатами этих разработок. В последнее время, были получены совершенно новые материалы с заранее заданными свойствами, разработана технология их производства и методы расчета. Современная наука о таких материалах представляется чрезвычайно разветвленной и далекой от своего завершения [1].

Среди новых материалов особое место занимают композиционные материалы, обладающие целым комплексом различных свойств, рациональное сочетание которых позволяет получать оптимальные конструкции. В строительной отрасли широко применяются композиционные строительные материалы.

Для экспериментального определения свойств композиционных материалов необходимо провести большой объем дорогостоящих исследований. Выходом из сложившейся ситуации может стать проведение теоретических аналогий и использование теоретических моделей композиционных материалов, которые могут помочь в определении требуемых характеристик, таких как прочность и однородность. Зная начальные параметры, внешние условия и сопутствующие факторы, можно построить математическую модель поведения материала во времени. Для решения этой задачи целесообразно применение методов микромеханики.

Микромеханика находится еще в начальной стадии своего развития, в то время как механика сплошной среды и механика разрушения (являющееся составной ее частью) уже достигли большого развития. Линейная механика разрушения рассматривает материал как сплошную, однородную, упругую среду и пользуется аппаратом классической линейной теории упругости.

Фундаментальное понимание и математический количественный анализ характеристик поведения нано-, микро- и макроструктур необходимы для рационального и эффективного конструирования материалов и структур.

Модели случайной и упорядоченной гомогенизации, примененные на уровне микроструктуры материала, показывают, что сложные характеристики разрушения такого материала, как бетон, могут быть разложены на составляющие их простые характеристики разрушения отдельных наноструктур – гидратов в бетоне. В то же время существенное влияние на общие прочностные характеристики оказывает содержание воды в материале. В конструкциях промышленного и гражданского строительства содержание воды может значительно меняться вследствие процессов гидратации и дегидратации бетона.

Бетон является микрогетерогенным материалом, получаемым при смешивании цемента, воды, песка и заполнителей. В результате химической реакции между цементом и водой образуются так называемые продукты гидратации. Последние устанавливают связи между отдельными частицами микроструктуры и таким образом отвечают за макроскопические механические свойства бетона, включая упругость и прочность. Поскольку зерна цементного клинкера и продукты гидратации значительно меньше зерен песка и заполнителей, для описания микромеханической модели бетона применяются два элементарных объемных элемента: цементный камень и бетон. Первый относится к поликристаллическому цементному тесту со сферическими фазами вещества, представляющими цементный клинкер, воду, гидраты и пузырьки воздуха, непосредственно взаимодействующими между собой. Второй относится к бетону, состоящему из сферических фаз заполнителя (песка), расположенных в матрице, образованной цементным тестом. Поскольку зерна песка и заполнителя незначительно отличаются формой и упругостью, в микромеханике сплошных сред они рассматриваются как частицы с одинаковыми свойствами и носят название "заполнители".

Содержание отдельных фаз вещества в элементарном объемном элементе зависит от состава материала. В цементном тесте оно определяется соотношением масс воды и цемента ( $W/C$ ), в торкрет-бетоне  $\square$  как значением  $W/C$ , так и соотношением масс заполнителя и цемента ( $Z/C$ ). В процессе гидратации содержание в цементном тесте фракций клинкера, воды, гидратов и пузырьков воздуха зависит от протекания химической реакции. Этот процесс обычно представляется с помощью закона гидратации Пауэрса, параметром которого является степень гидратации, равная 0 в начале реакции и принимающая значение 1, после того как весь клинкер поглощен [2, 3].

Модули упругости фаз вещества можно определить с помощью непосредственных способов измерения, включая наноиндентирование. С целью упрощения жидкие фазы, вода и воздух, заменяются на условные твердые фазы, что является часто используемым допущением в микропоромеханической теории. Если при нагружении вода не покидает элементарный объемный элемент (закупоренное или влажное состояние) считается, что вода имеет пренебрежимо малую жесткость на срез и модуль объемной упругости 2,3 ГПа; если же наблюдается текучесть воды, говорят об высушенном состоянии. Точно так же "высушенное" состояние относится и к воздушной фазе.

В последнее время гомогенизация бетона также охватывает его вязкоупругие свойства. Здесь стоит отметить, что гидраты являются единственным вязкоупругим элементом цементирующих материалов, имеющим только пла-

стические деформации. Этот тип пластической деформации описан известной моделью Бюржера. Все остальные частицы материала считаются линейно упругими. Пользуясь принципом соответствия вязкоупругости, общие вязкоупругие свойства гомогенизируются в пространстве Лапласа-Карсона (LC), где применимы схемы гомогенизации упругих свойств. Получаемые в результате LC-преобразования функции пластической деформации и релаксации преобразовываются обратно во временную область. При гидратации бетона постоянно меняющиеся объемные доли компонентов цементного теста рассматриваются через новые интегральные выражения, описывающие законы поведения вязкоупругих составляющих, что позволяет точнее оценивать пластические деформации цементирующих материалов в начале эксплуатации.

Недавно было доказано, что в области анализа предела упругости можно получить прочностные характеристики бетона, зная прочностные характеристики гидратов. Таким образом, предполагается, что изучаемый материал сохраняет упругость при условии, что максимальные напряжения в гидратах не превышают некоторого порогового значения ("прочность гидратов"). Это значение соответствует предельной нагрузке элементарного объемного элемента цементного теста или бетона. Для определения критических напряжений гидратов рассчитываются среднеквадратичные напряжения. С этой целью вместо сферической используется игловидная модель гидратов с изотропной пространственной ориентацией. Прогноз, сделанный на основании принятой модели, согласуется с результатами независимых экспериментов.

**Выводы.** Во многих случаях механические свойства материалов и структур могут быть представлены в виде нескольких параметров, описываемых математически. Такое представление очень важно при конструировании новых материалов и структур, а также улучшении существующих инженерных решений, касающихся обработки и конструирования материалов.

Механика материалов является гораздо более молодой отраслью знаний. Несмотря на то, что она также опирается на общепризнанные математические теории, целостное экспериментальное подтверждение модели материалов остается необходимым для демонстрации пользы теории в инженерной практике.

**Литература.** 1. Бардзокас Д. И., Зобнин А. И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. – М.: Едиторал УРСС, 2003. – 376 с. 2. Андре Зауи, Микромеханика сплошной среды: Обзор. – Journal of engineering mechanics / August 2002 3. Манг, Аингер и др. Вычислительная механика в промышленном и гражданском строительстве - Обзор основных характеристик материалов и структур. - Институт механики материалов и структур Венского технологического университета, Карлсплац 12/202, А-1040, Вена, Австрия