НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

УДК 539.319
А.Г. Юрьев
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

При высоком уровне нестационарного нагрева необходим учет изменения физико-механических характеристик бетона в зависимости от температуры. При решении задачи о напряженном состоянии бетона принимаем следующие основные предпосылки:

1. Модуль деформации бетона при повышении температуры меняется в значительных пределах. Исследования показали, что зависимость модуля деформации бетона от температуры с точностью, достаточной для практических расчетов, может быть описана формулой

$$E_{bT} = E_b(1 - 0,0022\Delta T), \tag{1}$$

где E_b – мгновенный модуль деформации бетона;

ΔT – температура бетона, отсчитываемая от 20°С.

2. Коэффициент температурного расширения бетона α_{bT} при нагревании также сильно меняется:

$$\alpha_{bT} = (14,6 + 0,011b^4 + 0,31D + 1,8V^2)10^{-6}, \tag{2}$$

где b – начальная весовая влажность бетона, %;

D – средний диаметр заполнителя, мм;

V – скорость нагрева бетона, °С/с.

3. Высокотемпературный нагрев приводит к значительным изменениям коэффициента теплопроводности бетона λ_b. Для сухого бетона $\lambda_b \approx 1$, для влажного $\lambda_b \approx 3$.

Являясь функцией температуры и влажности, величина λ_b в свою очередь оказывает значительное влияние на характер и скорость перемещения их полей. Таким образом, имеет место связанная задача, которая может привести к значительным математическим трудностям. Определение коэффициента теплопроводности бетона опытным путем технически сложно и трудоемко. Поэтому наиболее целесообразно нахождение величины λ_b с помощью математического эксперимента.

4. Задача решается в квазистатической постановке, т.е. без учета влияния динамического эффекта. Это упрощение связано с тем, что ко-

личество тепла, выделяемое в процессе деформирования, и инерционные эффекты достаточно малы ввиду небольших скоростей нагрева и деформирования. Поэтому задача по определению температурных напряжений распадается на две самостоятельные задачи. Если считать, что задача о распределении тепла и влаги решена, то задача о напряжениях может быть сведена к линейной несвязанной задаче квазистатической теории термического деформирования.

5. При исследовании тепло- и массопереноса бетон считается твердым капиллярно-пористым телом. Однако при определении напряжений целесообразно считать бетон сплошным твердым телом. Это допущение не может оказать заметного влияния на результат, однако позволяет использовать при решении поставленной задачи известные законы механики деформируемого твердого тела. При этом считается, что указанные законы будут справедливы и при переменных термомеханических характеристиках бетона.

6. Коэффициент линейного набухания бетона считается постоянным [1] и принимается равным $\eta_b = 5 \cdot 10^{-5}$ мм/мм.

7. Для деформаций бетона считается справедливым принцип суперпозиции, и составляющая полной деформации равна алгебраической сумме соответствующих составляющих температурных и влажностных деформаций.

8. Реологические характеристики бетона также зависят от изменения температуры. Зависимость меры ползучести от температуры и времени ее действия с точностью, достаточной для практических расчетов, может быть описана формулой [2]:

$$c(t,\tau,T) = c(t,\tau)[0,228(t-\tau_1)^{0,278} \cdot (e^{0,004T} - 1) + 1], \qquad (3)$$

где $c(t,\tau)$ – мера ползучести при нормальной температуре;

$t - \tau_1$ – время действия температуры в минутах;

T – температурная функция.

Становление вариационных принципов в термодинамике тесно связано с работами М. Био, который показал, что основные уравнения для необратимых систем могут быть получены из условия стационарности функционала энергии [3].

Термодинамическая теория необратимого процесса термоупругого деформирования основана на предположении о локальном равновесии, при котором мгновенные значения термодинамических функций являются однозначными функциями своих параметров. Основные уравнения классической термодинамики распространяются на локальноравновесные макроскопические части термодинамической системы.

Обратимся к вариационным принципам изотермической теории упругости, предполагая, что тело в исходном состоянии находится под действием сил $\vec{p}_s$ на части поверхности S_1 и объемных сил $\vec{\rho}$ при температурном поле T. Обобщение принципа возможных перемещений сводится к замене удельной потенциальной энергии деформации удельной свободной энергией Гельмгольца $\overline{\Gamma}$, а обобщение принципа возможных изменений напряженного состояния – к замене удельной дополнительной энергии функцией, в некотором смысле аналогичной удельной свободной энергии Гиббса в термодинамике [4].

Решение задач термоупругости ведется с помощью термоупругого потенциала перемещений. Введение этой функции в уравнения термоупругости в перемещениях позволяет значительно упростить их и более просто найти частные, а затем и общие решения дифференциальных уравнений.

Следует, однако, заметить, что использование термоупругого потенциала перемещений приводит к значительным упрощениям задачи лишь в том случае, когда рассматриваемое тело является идеально упругим с независимыми физико-механическими характеристиками.

В порядке первого приближения осесимметричная задача решается в рамках термоупругости при переменном модуле деформации бетона как функции изменения температуры. Выводится обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами относительно составляющих радиального напряжения при соответствующих граничных условиях. Решение этого уравнения осуществляется численным методом с помощью ЭВМ. Затем определяются полные радиальные, тангенциальные и продольные напряжения. Однако здесь не было учтено изменение ряда других физико-механических характеристик бетона при повышении температуры, а также влияние влажности на напряженное состояние. Введение в исходные уравнения переменных термомеханических характеристик бетона делает поставленную задачу при данной методике ее решения математически сложной.

Анализ названных и ряда других методов решения задач термоупругости показал, что наиболее просто и удобно при достаточной точности строить решение поставленной задачи дискретным методом. Он использован для расчета неравномерно нагретых труб с изменяющимся от температуры модулем упругости [5]. Преимущество дискретного метода по сравнению с другими методами заключается, прежде всего, в том, что введение в исходные уравнения переменных термомеханических характеристик материала не приводит к значительному усложнению решения задачи. Кроме того, этот метод удобен для решения задач с использованием ЭВМ.

Опыты показали, что при нагреве бетона величина α_b возрастает за счет давления пара, а затем снижается ввиду обезвоживания бетона и его усадки. Образцы нагревались равномерно по всему сечению, и поэтому не имело место накопление влаги, наблюдаемое в неравномерно нагретых образцах.

Поскольку для решения поставленной задачи используется выражение (2) для α_b, необходимо к вычисленным напряжениям прибавить напряжения, которые возникают в зоне скопления влаги от набухания бетона. Однако более целесообразно определять напряжения в одном решении, заменив в исходных уравнениях температурные деформации $\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T$ на полные $\varepsilon = \alpha_T \Delta T + \eta_b \Delta W$.

Для углубленного исследования высокотемпературных напряжений при нестационарном нагреве следует использовать значения термомеханических характеристик бетона $E_b, \alpha_b, \Delta W$ не в виде постоянных во времени коэффициентов, а в виде функций температуры, зависящих от времени. Вывод разрешающих уравнений должен вестись с учетом двойной дискретизации как по радиусу, так и по времени.

Вначале определяем упругие напряжения, возникающие в цилиндре бесконечной длины с центральным круглым отверстием при его высокотемпературном нестационарном нагреве.

Приняв время как параметр и коэффициент поперечной упругой деформации $\nu_1(\tau)$ постоянным, нестационарную задачу теории упругости рассматриваем как квазистационарную [6]. Влияние изменения величины $\nu_1(\tau)$ от температуры на напряженное состояние относительно невелико, а неучет этого изменения дает возможность использовать решение осесимметричной контактной задачи с физической дискретизацией по радиусу, примененное в работе [5], в качестве решения упругомгновенной задачи при определении осесимметричных напряжений в упругоползучем цилиндре.

При определении напряжений с учетом ползучести модуль поперечной деформации ползучести $\nu_2(t,\tau)$ также считается постоянным, т.е. принимается гипотеза: $\nu_1(\tau) = \nu_2(t,\tau) = \nu=\text{const}$.

В осесимметричной задаче физическая дискретизация по радиусу заключается в следующем. Тело цилиндра расчленяется на несколько трубок, для каждой из которых модуль деформации $E_{bT}(\tau)$, функция температурного расширения бетона $\alpha_{bT}(\tau)$ и влажность $\Delta W(\tau)$ считаются постоянными и равными значениям этих величин на средних радиусах трубок. Криволинейные эпюры $E_{bT}(\tau), \alpha_{bT}(\tau), \Delta W(\tau)$ заменяются ступенчатыми. Число трубок, на которые разбивается тело цилиндра, может быть взято сколь угодно большим.

Учитывая, что температурные градиенты, а следовательно, и градиенты возникающих при этом напряжений по сечению образца неравномерны и особенно велики у источника нагрева, для повышения точности решения дискретизация по радиусу также должна быть неравномерной и наиболее мелкой у внутренней поверхности цилиндра.

При ступенчатых эпюрах $E_{bT}(\tau), \alpha_{bT}(\tau), \Delta W(\tau)$ на границах участков будут иметь место разрывы в производной радиального перемещения. Поэтому должна быть решена контактная задача слоистого цилиндра.

В рассмотрение вводится цилиндр с постоянными значениями $E_b, \alpha_b, \Delta W$,но нагруженный на границах трубок пограничными радиальными силами, которые подбираются так, чтобы радиальные перемещения и их производные в цилиндре со ступенчатыми значениями $E_{bT}(\tau), \alpha_{bT}(\tau), \Delta W(\tau)$ и с постоянными $E_b, \alpha_b, \Delta W$ совпадали.

Зная зависимость от радиуса радиальных перемещений для цилиндра с постоянными E_b, α_b и ΔW , нагруженного радиальными силами, можно определить напряжения в любой точке цилиндра со ступенчатым изменением величин $E_{bT}(\tau), \alpha_{bT}(\tau)$ и $\Delta W(\tau)$.

Таким образом, можно получить уравнения для напряжений в бетоне при нестационарном высокотемпературном нагреве с учетом изменения $E_{bT}(\tau), \alpha_{bT}(\tau)$ и $\Delta W(\tau)$ по радиусу.

Решение проблемы проектирования рациональных несущих конструкций следует связывать с непосредственным использованием принципов, которым подчинено деформирование твердого тела. Если функционал прямой задачи имеет в качестве уравнений Эйлера—Лагранжа и естественных граничных условий уравнения и граничные условия принятой теории деформирования, то функционалу проектной задачи должны соответствовать, кроме того, дополнительные уравнения, свидетельствующие о зависимости изменения энергии системы от изменения конфигурации и модулей упругости материала тела.

Возможными вариациями функций конфигурации и модулей упругости материала тела будут бесконечно малые изменения функций, удовлетворяющие требованиям к конструкции и материалу; они непрерывны и удовлетворяют требованиям дифференцируемости. Вследствие малости вариаций функций, определяющих конфигурацию, пренебрегаем изменениями в расположении внешних сил относительно отдельных частей тела и изменениями температурного поля.

Вариационные постановки проектных задач механики деформируемого твердого тела рассмотрены в работах [7,8]. Практика проектирования конструкций, используемых в термических условиях, показывает, что насущной проблемой становится приведение в соответствие не только механических, но и термомеханических свойств массы тела и его пространственного устройства.

Библиографический список

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: СИ, 1973. – 218 с.
2. Фарбер С.Г. Влияние температуры на физико-механические свойства железобетонных конструкций / С.Г. Фарбер, С.Л. Фомин // Прочность и деформативность железобетонных конструкций. – Харьков: ХИСИ, 1969. – С. 21–28.
3. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
4. Коваленко А.Д. Термоупругость. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.
5. Малинин Н. Н. Расчет неравномерно нагретых толстостенных труб // Расчет на прочность элементов машиностроительных конструкций. – М.: Машгиз, 1955. – С. 34–42.
6. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. – М.: Гостехтеориздат, 1952. – 324 с.
7. Юрьев А. Г. Строительная механика: Синтез конструкций. – М: МИСИ, 1982. – 100 с.
8. Юрьев А. Г. Вариационные постановки задач структурного синтеза в статике сооружений. – М: МИСИ, 1987. – 94 с.