

## Литература

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.
2. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / Пер. с франц. - М.: Мир, 1968. - 464 с.
3. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. - 268 с.
4. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. - 1951. - Т.21. - Вып.6. - С.667-685.
5. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
6. Горчаков Г.И., Лифанов И.И. и др. Прогнозирование теплопроводности композиционных материалов различного строения // Строительные материалы. 1992. - N4. - С.27-29.
7. Обьедков В.А., Феофанова А.И., Езерский В.А. Коэффициент теплопроводности соледержащих каменных материалов // Вопросы температурно-влажностного режима памятников истории и культуры. Сб. научн. тр. НМС МК СССР. - М., 1990. С.18-33.

## ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ОГРАЖДЕНИЙ СТАРИННЫХ ЗДАНИЙ

*Никитин В.И.*

Прогнозирование долговечности материалов ограждений старинных зданий для планирования последующих ремонтов является важной и достаточно сложной проблемой. При ее решении можно использовать экспериментальный подход, основанный на предположениях теории форсированных испытаний /1, 2, 3, 4/.

Пусть  $\varepsilon', \dots, \varepsilon^k$  – параметры внешней среды, влияющие на долговечность материала. Эти параметры изменяются во времени. Функции, описывающие изменение значений параметров во времени, назовем режимом работы материала  $\varepsilon = f(\varepsilon', \dots, \varepsilon^k)$ . Среди множества возможных режимов следует выделить режим нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$  и форсированный режим  $\varepsilon_*$ , который обычно реализуется в эксперименте для сравнительной оценки долговечности материалов. Режим нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$ , как правило, является случайным. Форсированный режим  $\varepsilon_*$  носит детерминированный характер (например, циклические испытания образцов материала). Состояние материала описывается с помощью различных показателей (свойств), которые определяются его структурой, характеризуемой набором внутренних параметров  $\omega = (\omega^1, \dots, \omega^m)$ . В процессе работы или испытания изделия изменяется структура материала, утрачивается уровень первоначальных свойств и запас ресурса. При форсированных испытаниях это происходит быстрее, чем при

режиме нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$ . Изделие считается негодным, если значения свойств материала вышли за границы поля допуска (достигли предельной величины). Момент времени, при котором изделие становится негодным, принято называть моментом отказа.

Исходя из современных представлений о причинности в природе можно утверждать, что при заданном режиме работы у двух образцов с одинаковыми начальными значениями внутренних параметров  $\omega_0$  их свойства будут меняться во времени по одному и тому же закону и одновременно наступит момент отказа /2/. Предполагается, что между моментами отказа одного и того же образца в нормальном и форсированном режимах существует функциональная зависимость. Из-за случайностей при изготовлении образцов начальные значения внутренних параметров меняются от образца к образцу. Поэтому измеряемые показатели следует считать случайными величинами и при их описании и анализе применять вероятностно-статистические методы.

Форсированные испытания можно проводить, опираясь на известные принципы расходования ресурса изделий. К настоящему времени предложено немало таких принципов /1/. Применительно к циклическим воздействиям целесообразно воспользоваться принципом Фрейдентала. На основе этого принципа в нашем случае проще всего провести форсированные испытания методом "доламывания" /1/ на двух выборках образцов. Одна выборка объема  $m_1$ , испытывается в форсированном режиме  $\varepsilon_*$  до отказа всех образцов. Другая выборка объема  $m_2$  испытывается в переменном режиме, состоящем из двух режимов  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_*$ :

$$\varepsilon^2(n) = \begin{cases} \varepsilon_0, & 0 \leq n \leq n' \\ \varepsilon_*, & n' \leq n \leq \infty \end{cases}, \quad (1)$$

где  $n'$  – число циклов при переключении режимов.

В рамках линейных моделей принцип Фрейдентала смыкается с широко известным принципом Пальмгрена-Майнера /1, 4/, который часто называют гипотезой линейного суммирования повреждений. Согласно этой гипотезе

$$\frac{n(\varepsilon_0)}{N(\varepsilon_0)} + \frac{n(\varepsilon_*)}{N(\varepsilon_*)} = 1, \quad (2)$$

где  $n(\varepsilon_0)$  – среднее число циклов (лет), отработанных образцами выборки  $m_2$  в режиме нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$ ;  $n(\varepsilon_*)$  – среднее число циклов, отработанных образцами выборки  $m_2$  до отказа в форсированном режиме  $\varepsilon_*$ ;  $N(\varepsilon_0)$  – среднее количество циклов (лет), отработанных образцами выборки  $m_1$  или  $m_2$  до отказа в режиме  $\varepsilon_0$  (искомая характеристика долговечности);  $N(\varepsilon_*)$  – среднее количество циклов, отработанных образцами выборки  $m_1$  до отказа в форсированном режиме  $\varepsilon_*$ . В нашем случае  $n(\varepsilon_0)$  может быть установлено по истории эксплуатации здания.

Значения  $n(\varepsilon_*)$  и  $N(\varepsilon_*)$  находятся из эксперимента. Затем по (2) определяется искомая величина  $N(\varepsilon_0)$ .

Рассмотренные положения были использованы при оценке остаточной долговечности каменных элементов декора Останкинского музея творчества крепостных. Необходимая информация собиралась в эксперименте на образцах из старых материалов, имеющих возраст 195 лет а также новых, используемых в настоящее время для восполнения утрат.

В интерьерах помещений Останкинского дворца широко используются гипс и штукатурка. Из гипса выполнены лепные ажурные розетки, фризy, кариатиды и т.д. При использовании на фасадах гипс пропитывался олифой. Штукатурка используется в качестве основы под обои или в качестве отделки в чистом виде – потолки, колонны. Если на сохранность деревянных несущих конструкций дворца в основном влияют конструктивные недостатки зданий, биологические и химические воздействия, то отделочные слои ограждающих конструкций и декор, представляющие собой часть интерьера, стареют главным образом под действием температуры и относительной влажности внутренней воздушной среды помещений. Поэтому в качестве показателя долговечности может быть принята влагостойкость и морозостойкость материалов, оцениваемые числом циклов попеременного увлажнения-высушивания и замораживания-оттаивания.

В реальных условиях удалось выпилить партию образцов старых материалов размером приблизительно  $2 \times 2 \times 2$  см. Образцы новодела размером  $2 \times 2 \times 2$  см изготавливались путем заливки растворной смеси в металлические формы. Полученные образцы испытывались на влагостойкость и морозостойкость.

При испытании образцов на влагостойкость имели:

режим  $\varepsilon_0$  – образцы, высушенные до постоянной массы, помещались на четверо суток в эксикатор со 100%-ной влажностью, а затем на 6 ч в сушильный шкаф, температура в котором поддерживалась на уровне  $55-60^\circ\text{C}$ . Предполагалось, что такой режим имитирует режим нормальной эксплуатации;

форсированный режим  $\varepsilon_*$  – образцы погружались в воду и выдерживались в ней 16 ч, а затем на 8 ч помещались в сушильный шкаф,

При испытании образцов на морозостойкость их предварительно увлажняли путем погружения в воду на 16 ч и затем реализовывали два режима:

режим  $\varepsilon'_0$  – образцы 8 ч находились в морозильной камере при температуре  $-10^\circ\text{C}$  и 16 ч хранились в эксикаторе со 100%-ной влажностью при комнатной температуре;

режим  $\varepsilon'_*$  – увлажненные образцы запаивались в полиэтиленовые пакеты, а затем каждые сутки 8 ч выдерживались в морозильной камере при температуре  $-10^\circ\text{C}$  и 16 ч оттаивали в комнатных условиях. Считалось, что изолированные образцы имели более высокий уровень увлажнения и, следовательно, работали в более жестком режиме.

Деструктивные процессы отслеживались по изменению массы и прочности образцов, скорости распространения ультразвуковых волн и внешнего вида. Оценка изменения прочности и внешнего вида производилась на основании сравнения состояния испытанных образцов с контрольными, не участвующими в испытаниях. Полагалось, что наиболее объективной оценкой может быть потеря массы испытываемых образцов, так как при циклических температурно-влажностных воздействиях деструкция изучаемых материалов носит характер поверхностного шелушения. Следует отметить, что все упомянутые показатели дают довольно размытую оценку момента отказа.

Относительная потеря массы образцов определялась по формуле:

$$\Delta m = (m_0 - m)100/m_0, \quad (3)$$

где  $m_0$  и  $m$  – массы образцов до и в процессе испытания, высушенных до постоянного значения.

Относительное изменение прочности образцов при сжатии находилось из выражения:

$$\Delta R = (R_0 - R)100/R_0 \quad (4)$$

где  $R_0$  – предел прочности при сжатии контрольных образцов,  $R$  – предел прочности образцов при сжатии по окончании эксперимента.

Для ультразвуковых испытаний был использован серийный ультразвуковой прибор “Бетон-12” со специально разработанными для подобных испытаний преобразователями в виде конических волноводов с точечным контактом.

Рассмотрим решение поставленной задачи на гипсовых образцах. Одна партия образцов выпиливалась из гипсового декора, а другая изготавливалась вновь. Предполагалось, что на любом уровне описания значения первоначальной достаточно полной совокупности внутренних параметров  $\omega_0$  старого и нового гипса одинаковы (тождественность старого и нового гипса). Тогда в соответствии с принципом инвариантности /4/, вытекающим из современных представлений о причинности в природе, измеряемые параметры, отражающие деструктивные процессы, у этих двух партий образцов будут изменяться во времени по одному и тому же закону в любом режиме испытаний. Принималось, что расходование ресурса подчиняется принципу Пальмгрена-Майнера (2). В дальнейшем эти два принципа получили экспериментальное подтверждение, что позволило пересчитать результаты форсированных испытаний к нормальным условиям.

При экспериментировании каждый опыт повторялся пять раз. Выяснилось, что значения водопоглощения гипса  $B$ , полученные при погружении образцов в воду, почти на порядок превосходят значения сорбционной влажности  $\omega$ . Так, для новых гипсовых образцов по результатам пяти повторных опытов имеем следующие средние значения:  $B = 57,7\%$  и  $\omega = 8,85\%$ . Следовательно, при испытаниях на водостойкость жесткость режима  $\varepsilon_*$  будет больше, чем у режима  $\varepsilon_0$ . Это подтвердили измерения потери массы  $\Delta m$ . Если с помощью показателя  $\Delta m$  отмечается существенное ускорение

деструкции материала при переходе от режима  $\varepsilon_0$  к  $\varepsilon_*$  то ультразвуковой метод оказался менее чувствительным и не улавливал этой разницы. Поэтому все последующие выводы делались на основании результатов определения относительной потери массы.

Для обеспечения соответствия деструктивных процессов в образцах из старого и нового материалов, характеризующихся одинаковой достаточно полной совокупностью начальных внутренних параметров  $\omega_0$ , требуется чтобы они перед испытаниями имели одинаковую форму и размеры. При формовании новых образцов это условие выполнить проще, чем для образцов старинных материалов, выпиленных из штукатурки и гипсовых элементов. Поэтому возникает задача приведения образцов с различной формой и массой к образцу, выбранному в качестве базового. Переход от одного образца к другому по показателю  $\Delta m$  условно можно записать в следующем виде:

$$m_{пр} = \Delta m_s \cdot k_{пр}, \quad (5)$$

где  $\Delta m_{пр}$  и  $\Delta m_s$  – приведенная и приводимая потеря массы образцов,  $k_{пр}$  – коэффициент приведения.

При построении формулы для определения коэффициента приведения  $k_{пр}$  можно опираться на критерий подобия в виде отношения поверхности образца  $S$  к его массе  $m$  (площадь удельной поверхности). Поверхность образца связана с его формой. Например, при переходе от прямой треугольной призмы массой  $m$  к кубу той же массы величина критерия  $S/m$  уменьшается в 0,857 раз. Поэтому коэффициент приведения можно записать так

$$k_{пр} = k_m \cdot k_f, \quad (6)$$

где  $k_m$  и  $k_f$  – коэффициенты, учитывающие различия в массе и форме образцов.

В нашем случае образцы имеют форму куба и являются геометрически подобными. Тогда  $k_f = 1$ , а при переходе от куба массой  $m$  к массе  $m_{пр}$  коэффициент  $k_m$  равен

$$k_m = \sqrt[3]{m_y / m_{10}}, \quad (7)$$

где  $m$  и  $m_{пр}$  – приводимая и приведенная массы образцов.

Все последующие результаты измерений потери массы гипсовых образцов с помощью формулы (5) были приведены к образцу в форме куба, имеющему начальную массу  $m_0 = 7,4$  г.

По форсированному режиму  $\varepsilon_*$  на разнесенных интервалах времени было испытано две серии образцов из старого и нового гипса. Одна серия из пяти старых и пяти новых образцов отработала до отказа всех образцов по внешнему виду” Последний образец из этой серии отказал после 72 циклов увлажнения-высушивания. Другая серия образцов из старого и нового гипса (по пяти образцов) отработала 31 цикл по режиму  $\varepsilon_*$  до отказа всех старых образцов. При этом среднее число циклов увлажнения-высушивания, отработанных старыми образцами до отказа (выборка  $m_2$ ) в

форсированном режиме  $\varepsilon_*$  составило  $n(\varepsilon_*) = 25$ . Среднее число циклов, отработанных новыми образцами до отказа (выборка  $m_1$ ) в режиме  $\varepsilon_*$ ,  $N(\varepsilon_*) = 67$ . Известно, что гипсовый декор помещений музея (выборка  $m_2$ ) уже отработал  $n(\varepsilon_0) = 195$  лет в режиме нормальной эксплуатации  $\varepsilon_0$ . Согласно гипотезе (5.19) общий срок службы гипсового декора в режиме нормальной эксплуатации равен  $N(\varepsilon_0) = 311$  лет. Если выполняются исходные предпосылки метода, то остаточная долговечность гипсового декора составит  $D_{\text{ост}} = N(\varepsilon_0) - n(\varepsilon_0) = 116$  лет.

### Литература

1. Карташов Г.Д. Методы форсированных испытаний // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий. – М., 1979. – С.56–98.
2. Карташов Г.Д. Предварительные исследования в теории форсированных испытаний // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий. – М. 1980. – С.62–104.
3. Карташов Г.Д. Форсированные испытания аппаратуры // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий. – М., 1986. – С.51–106.
4. Карташов Г.Д. Основы форсированных испытаний. – М.: Знание, 1977. – 52 с.

## ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА УСИЛИЙ В ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ НА СОВРЕМЕННЫХ ПЭВМ НА БАЗЕ МКЭ

*Игнатюк В.И., Гойшик И.М.*

Одним из методов расчета, широко применяющихся для численного исследования и анализа строительных конструкций и сооружений, является метод конечных элементов (МКЭ), отличающийся достаточной простотой, физической наглядностью, высокой логичностью и универсальностью. Эти его достоинства позволяют широко использовать МКЭ и при разработке различных вычислительных программ для ЭВМ.

Конечно, в настоящее время уже создано много программ, основанных на методе конечных элементов. Эти программы различны по своей сложности, возможностям, удобствам использования. Можно при этом заметить, что чем больше возможностей имеет программа, тем сложнее и менее удобен интерфейс ее использования, особенно для решений отдельных конкретных задач. Так, например, программный комплекс «Мираж», созданный в Киеве, имеет очень большие и широкие возможности, с его помощью можно решать как плоские и пространственные стержневые системы, так и разнообразные плиты, пластины, оболочки, причем на широкий спектр воздействий. Но для осуществления работы с ним требуется изучение инструкции объемом более 400