УДК 691.537 (575.2) (04)

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОРГАНОКОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

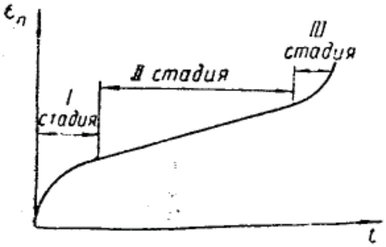
Е.С. Суворова – инженер
КГУСТА

Рассмотрены основы теории прочности и деформационные критерии разрушения, зависящие от предыстории нагружения и влияющие на длительную прочность композита, работающего в условиях ползучести.

Органокомпозиты (полиармин, соломолит, арболит и др.) относятся к группе местных строительных материалов, получаемых из отходов сельскохозяйственных производств и промышленности на полимерных или минеральных вяжущих. Технологические свойства органокомпозитов, получаемых в Кыргызской Республике по новым технологиям, позволяют применять их в сейсмостойком строительстве в качестве облегченных ограждающих конструкций зданий (панели покрытий и перекрытий; стеновых ограждений, элементов перегородок и других изделий).

Строительные конструкции из органокомпозитов работают в условиях длительной эксплуатационной нагрузки. Со временем они существенно снижают свои прочностные и главным образом жесткостные характеристики. Это может привести к тому, что в конструкциях, нормально функционирующих в начальный период эксплуатации, постепенно развиваются большие деформации, и такие конструкции перестают удовлетворять эстетическим и конструктивным требованиям. При достаточно больших уровнях нагружений они разрушаются. Для обеспечения надежности и долговечности изделий из органокомпозитов при их конструировании следует учитывать изменение характеристик материала со временем (ползучесть), имеющееся при длительной нагрузке.

Фактор ползучести имеет существенное значение для работы конструкций из органокомпозитов. Эксперименты по ползучести строительных материалов показали, что она наблюдается при любых напряжениях, даже таких, которые при кратковременном действии нагрузки вызывают только упругие деформации. Результаты испытаний представлены в виде кривых ползучести, т.е. кривых зависимости деформаций от времени (рис. 1).



, время

Рис. 1. Кривая ползучести при постоянной нагрузке.

Первая стадия на рис. 1 характеризуется убывающей скоростью ползучести (неустановившаяся ползучесть), вторая стадия – постоянной скоростью ползучести (установившаяся ползучесть), третья стадия – возрастающей скоростью ползучести (стадия разрушения).

Поведение материалов в стадии разрушения мало изучено, поэтому при рассмотрении материалов с ярко выраженными первой и второй стадиями, условно допустим, что разрушение происходит в конце второй стадии ползучести, представив деформацию ползучести как сумму затухающей и незатухающей установившейся ползучести (рис. 2).

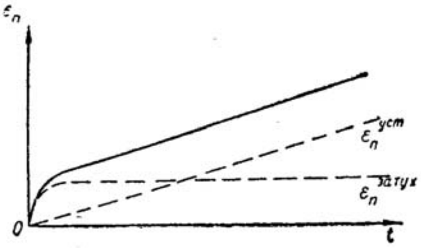


Рис. 2. Сумма затухающей и незатухающей ползучести.

Исследование экспериментальных кривых простого последействия показывает, что не затухающая компонента деформации ползучести нелинейно зависит от напряжения, а затухающая может быть представлена как сумма линейной и нелинейной составляющих.

Учитывая это, основной закон нелинейного деформирования, обобщающий закон теории упругой наследственности, можно записать в таком виде:

$$E=(t)\varepsilon(t)=\sigma(t)+\int_{\tau 0}^{t}K_1(t,\tau)\,\sigma(\tau)\,d\tau+$$
$$+\int_{\tau 0}^{t}K_2(t,\tau)\,f[\sigma(\tau)]\,d\tau+\int_{\tau 0}^{t}K_3(t,\tau)\,\varphi\,[\sigma(\tau)]\,d\tau, \qquad (1)$$

где τ_0 – момент начала загружения; $K_1(t,\tau)$, $K_2(t,\tau)$ и $K_3(t,\tau)$ – функции влияния, удовлетворяющие условиям:

$$\left.\begin{aligned}
&\lim_{t\to\infty}\frac{d}{dt}\int_{\tau_o}^{t}K_1(t,\tau)d\tau=0;\\
&\lim_{t\to\infty}\frac{d}{dt}\int_{\tau_o}^{t}K_2(t,\tau)d\tau=0;\\
&\frac{d}{dt}\int_{\tau_o}^{t}K_3(t,\tau)d\tau=const\neq 0;
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

$f(\sigma)$ и $\varphi(\sigma)$ – некоторые нелинейные функции, которые обычно берутся степенными [1].

То обстоятельство, что кривые ползучести и момент загружения имеют вертикальную касательную, можно учесть как и в линейной теории ползучести, если в качестве ядер K_1, K_2, K_3 взять функции с особенностью при $t=\tau$. Однако ввиду особенной сложности нелинейных задач ограничимся рассмотрением простейших ядер.

Разрешим уравнение (1) относительно $\sigma(t)$:

$$\begin{aligned}
&\sigma(t)=\mathrm{E}(\tau)\,\varepsilon(t)-\int_{\tau 0}^{t}K_2(t,\tau)f[\sigma(\tau)]\,d\tau-\\
&-\int_{\tau 0}^{t}K_3(t,\tau)\varphi[\sigma(t)]\,d\tau-\int_{\tau 0}^{t}\{E(t)\,\varepsilon(\tau)-\\
&-\int_{\tau 0}^{t}K_2(\tau,x)f[\sigma(x)]\,dx-\\
&-\int_{\tau 0}^{t}K_3(\tau,x)\varphi[\sigma(x)]\,dx\}R_1(t,\tau)\,d\tau
\end{aligned} \qquad (3)$$

Здесь $R_1(t,\tau)$ – резольвента линейного интегрального уравнения с ядром $K_1(t,\tau)$.

Ползучесть, возникающая при действии длительной нагрузки деформации, состоит из трех частей: 1) упругих деформаций, которые возникают в момент приложения нагрузки и с течением времени не изменяются, а после удаления нагрузки мгновенно исчезают; 2) обратимых упругоэластических деформаций; 3) необратимых деформаций, развивающихся во времени.

Деформации в зависимости от уровня нагружения могут стремиться к некоторому конечному значению, которое после удаления нагрузки будет представлять собой остаточную деформацию, либо неограниченно возрастать, что со временем приведет к разрушению конструкции.

Максимальная величина напряжений, под воздействием которых не происходят разрушения при практически бесконечном времени, называется пределом длительного сопротивления. Естественно, напряжения в конструкциях должны быть меньше указанной величины.

Известен ряд подходов к оценке длительной прочности конструкций, находящихся в условиях ползучести. К ним относится деформационный критерий разрушения [2], где условие разрушения связано с накопленной деформацией ползучести, энтропийный критерий А.И. Чудновского [3], в котором за параметр разрушения принята плотность энтропии элементарного объема материала, энергетический критерий О.В. Соснина [2, 4], где за критический параметр принята удельная энергия рассеяния в процессе ползучести:

$$U = \int_0^{t_*} \sigma_{ij} p_{ij} dt, \qquad (4)$$

где t_* – время до разрушения; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; p_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций ползучести.

Как показали экспериментальные исследования, критические параметры в данных критериях зависят от предыстории нагружения.

В.В. Федоровым предложена теория прочности [5, 6], в которой условие разрушения связано с частью удельной энергии рассеяния U_c, обуславливающей структурные изменения материала конструкций в процессе ползучести, и с начальной плотностью внутренней энергии

$$U_o(T) = \int_0^T \rho \cdot c \cdot dT,$$

где c – теплоемкость материала при постоянных напряжениях; T – абсолютная температура; ρ – плотность.

Условие прочности для бездефектного материала записывается в виде соотношения

$$U - Q \le U_c - U_o(T) = U_*(T), \qquad (5)$$

где Q – удельная рассеянная энергия за счет теплообмена. Тогда условие разрушения примет вид

$$U - Q = U_*(T). \qquad (6)$$

Величина $U_t(T)$ есть плотность внутренней энергии, она является однозначной термодинамической функцией состояния материала конструкции. Экспериментальные исследования показали, что энергия U_c не зависит от предыстории нагружения. Тогда при постоянной температуре T_o критический параметр $U_*(T_o)$ также не будет зависеть от предыстории нагружения конструкции.

Предположим, что на процесс теплообразования не влияет механизм разрушения материала.

Для определения $U_*(T)$ необходимо знать величины U и Q в процессе деформирования. Удельная рассеянная энергия U определяется по формуле (4). Энергию Q можно определить калориметрированием или путем замера температуры нагружаемой конструкции в изотермических условиях. Однако трудоемкость указанных методов определения Q делает невозможным их практическое применение в процессе ползучести реальных конструкций.

Согласно первому закону термодинамики, в случае отсутствия притока тепла извне приращение удельной рассеянной энергии за время Δ_t можно представить в виде:

$$\Delta u = \sigma \cdot p \cdot \Delta t, \qquad (7)$$

где σ – напряжения; p – скорость деформации ползучести.

Величина Δu запишется в виде соотношения

$$\Delta u = \Delta u_* + \Delta q,$$

где Δu_* – приращение плотности внутренней энергии за время Δ_t; Δq – приращение удельной рассеянной энергии за время Δt за счет теплообмена.

Экспериментальные исследования показывают, что отношение Δu_* к Δu зависит от приложенного напряжения σ и температуры T, поэтому

$$\frac{\Delta u_*}{\Delta u} = f(\sigma, T)$$

где f(σ, T) – некоторая функция от напряжения и температуры, причем $0 < f(\sigma, T) \le 1$, тогда

$$\Delta u_* = f(\sigma, T)\, \Delta u,$$

или с использованием выражения (7)

$$\Delta u_* = f(\sigma, T)\, \sigma \cdot p \cdot \Delta t. \qquad (8)$$

Интегрируя соотношение (8), получается условие разрушения (6) в виде

$$U_*(T) = \int_0^{t_*} du_* = \int_0^{t_*} f(\sigma, T)\, \sigma \cdot p \cdot dt = \int_0^{p_*} f(\sigma, T)\, \sigma dp, \qquad (9)$$

где t_* – время до разрушения; p_* – деформация ползучести в момент разрушения.

Аппроксимировав функцию f(σ, T) степенной зависимостью

$$f(\sigma, T) = k\, \sigma^{\alpha(T)}, \qquad (10)$$

где k – постоянная материала.

Подставив (7) в (6), окончательно получим

$$\frac{U_*(T)}{k} = \int_0^{p_*} \sigma^{\alpha(T)+1} dp. \qquad (11)$$

Заметим, что при α = 0 соотношение (11) превращается в энергетический критерий О.В. Сосина, при α = -1 – в деформационный критерий разрушения.

Соотношение (11) для напряжений

$$\sigma_1 = const, \quad \sigma_2 = const, \quad \sigma_1 \ne \sigma_2$$

при постоянной температуре T_o

$$\frac{U_{*1}(T_0)}{k} = \int_0^{p_{*1}} \sigma_1^{\alpha(T_0)+1} dp; \qquad (12)$$

$$\frac{U_{*2}(T_0)}{k} = \int_0^{p_{*2}} \sigma_2^{\alpha(T_0)+1} dp. \qquad (13)$$

Приравняв левые части в соотношениях (12) и (13), получим

$$p_{*1} \sigma_1^{\alpha(T_0)+1} = p_{*2} \sigma_2^{\alpha(T_0)+1},$$

отсюда

$$\alpha_1\left(T_0\right)=\frac{\ln\dfrac{P_{*2}}{P_{*1}}}{\ln\dfrac{\sigma_1}{\sigma_2}}-1, \tag{14}$$

где $\alpha_1(T_0)$ есть значение параметра $\alpha_1(T_0)$, найденного по напряжениям σ_1 и σ_2.

Усредненное $\alpha_i(T_0)$ находится как значение параметра $\alpha(T_0)$, минимизирующего функционал

$$J\left(\alpha\left(T_0\right)\right)=\sum_{i=1}^{n-1}\left(p_{*i}\,\sigma_i^{\alpha(T_0)+1}-p_{*i}\,\sigma_i^{\alpha(T_0)+1}\right)^2, \tag{15}$$

где n – число известных уровней напряжений [7].

Отклонения температурной зависимости свидетельствуют о стремлении t к конечному значению с понижением температуры. Эти отклонения особенно ярко выражены у полимеров. Они являются следствием того, что скорость блокирования связей в полимерных цепях уменьшается при понижении температуры быстрее падения интенсивности теплового движения.

Проведенные эксперименты позволяют наметить научное направление наиболее перспективных исследований ползучести композиционных строительных материалов, при котором имеется возможность целенаправленного управления изменением эксплуатационных свойств органокомпозитов и сроков их работоспособности.

Литература

1. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник / Под ред. С.А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с.
2. *Курдюмова В.М., Суворова Е.С.* Оценка ресурсоспособности конструкций из органокомпозитов, работающих в условиях ползучести // Материалы и изделия для ремонта и строительства: Международн. сб. научн. тр. – Новосибирск: 2006. – С. 102–106.
3. *Чудновский А.И.* Некоторые вопросы разрушения деформируемых твердых тел // Механика твердого тела. – 1969. – №5. – С. 184–185.
4. *Соснин О.В.* Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности // Проблемы прочности. – 1973. – №5. – С. 45–49.
5. *Федоров В.В.* Термодинамические представления о прочности и разрушении твердого тела // Проблемы прочности. – 1971. – №11. – С. 32–34.
6. *Федоров В.В.* Термодинамический метод оценки длительной прочности // Проблемы прочности. – 1972. – №9. – С. 45–47.
7. Ползучесть и длительная прочность конструкций: Сборник научных трудов. – Куйбышев: КПтИ, 1986. – 164 с.