

УДК 620.169.1

О.Г. ОСЯЕВ

МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КИНЕТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Предлагается метод оценки длительной прочности конструкционных полимеров на основе анализа обобщенных кинетико-механических характеристик, полученных путем синтеза кинетической теории прочности и теории ползучести.

Ключевые слова: прогнозирование, напряженно-деформированное состояние, запас прочности, длительная прочность, ресурс эксплуатации, механические характеристики, наследственная ползучесть, релаксация.

Необходимость достоверного прогнозирования остаточного ресурса несущих конструкций из полимерных материалов, особенно эксплуатируемых за пределами гарантийных сроков, требует поиска новых обобщенных методов решения задач наследственной ползучести, учитывающих сложное кинетико-химическое, тепловое и напряженно-деформированное состояние материалов и конструкций, обусловленное комплексным воздействием факторов естественного старения, накопления повреждений, изменения теплового и скоростного режимов нагружения. В качестве одного из путей решения данной проблемы предлагается метод оценки запаса прочности конструкционных полимеров на основе анализа их обобщенных кинетико-механических характеристик.

Произвольному моменту времени эксплуатации конструкционного полимерного материала соответствует определенная ветвь механической характеристики, определяемая условиями эксплуатации и последующего нагружения. Качественное изменение вида характеристик материала в зависимости от условий нагружения представлено на рис.1. Наиболее типичным для полимерных материалов является снижение ветви характеристики при повышении температуры, увеличении длительности эксплуатации, естественном старении и накоплении повреждений. Подъем ветви характеристик обычно обусловлен возрастанием скорости нагружения и (или) снижением температуры испытаний. Однако изменение характеристик конструкционных материалов в процессе эксплуатации или при изменении условий нагружения может и существенно отличаться от традиционных представлений. В частности, при старении полимеров характеристика наружного приповерхностного слоя возвышается (рис.1, ветви 4, 5, 6), что свидетельствует об охрупчивании наружного слоя материала, по сравнению со срединными слоями. Общая характеристика материала при этом снижается (рис.1, ветви 3, 2, 1). Для построения характеристик полимерных материалов могут быть использованы следующие кинетические и полуэмпирические выражения наследственной ползучести [1-3]:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a c_v v_{3\theta}}{3\lambda_T} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right) = E \varepsilon + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right), \quad (1)$$

$$\sigma = \beta \varepsilon \left[e^{-\lambda t} (E - \eta \lambda) - E \right], \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана; величина τ_0 – порядок периода тепловых атомных колебаний 10^{-13} с; E – модуль упругости, α – коэффициент термического расширения объема; C – атомная теплоемкость; t – время нагружения; T – температура; $v_{3\theta}$, λ_T , c_v – соответственно скорость звука, теплопроводность и объемная теплоемкость материала; β , λ – экспериментально определяемые функции материала при рассматриваемых условиях нагружения; η – коэффициент вязкости; a/Δ – величина разгрузки межатомных связей при ползучести и релаксации материала.

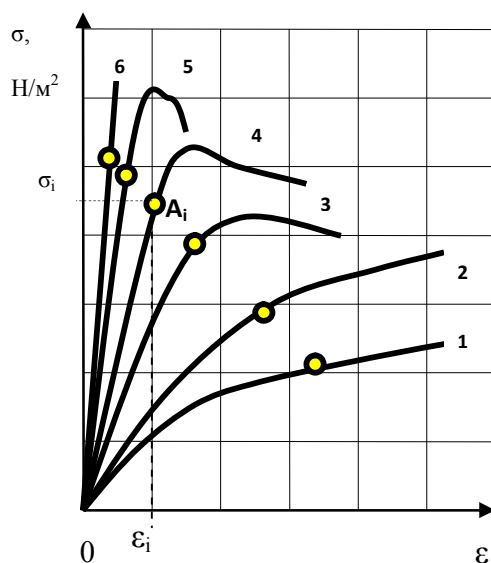


Рис.1. Изменение вида характеристик полимерного материала, в зависимости от условий нагружения: 1 - $T_1 > T_2$, $\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2$, $t_{*1} > t_{*2}$; 2 - $T_2 > T_3$, $\dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_3$, $t_{*2} > t_{*3}$; 3 - $T_3 > T_4$, $\dot{\epsilon}_3 < \dot{\epsilon}_4$, $t_{*3} > t_{*4}$; 4 - $T_4 > T_5$, $\dot{\epsilon}_4 < \dot{\epsilon}_5$, $t_{*4} > t_{*5}$; 5 - $T_5 > T_6$, $\dot{\epsilon}_5 < \dot{\epsilon}_6$, $t_{*5} > t_{*6}$; 6 - $T_6 < T_5$, $\dot{\epsilon}_6 > \dot{\epsilon}_5$, $t_{*6} < t_{*5}$

Состояние материала в каждый момент времени характеризуется не только видом соответствующей кривой (см.рис.1), но и точкой A_i , характеризующей напряженно-деформированное состояние тела в данный момент времени. Уравнения (1) – (2) позволяют получить для каждого момента времени t_i эксплуатации конструкционного материала соответствующую ветвь характеристической кривой с расположенной на ней точкой A_i , характеризующей мгновенное напряженно-деформированное состояние материала конструкции. Поскольку характеристическая кривая содержит также информацию о предельных значениях прочности $[\sigma_i]$ и предельных деформациях $[\epsilon_i]$, то существуют все условия для определения запаса прочности материала в каждый момент времени, а также для прогнозирования запасов прочности, деформативности, несущей способности конструкционных материалов при известных условиях последующего нагружения. Графоаналитическое исследование характеристических кривых позволит определять изменения, текущий и прогнозируемый запас прочности, несущей способности и долговечности материалов конструкций. Следует отметить, что в ряде практических случаев характеристические кривые могут иметь значительно более сложные формы, отличающиеся различным видом участков спуска после достижения максимальных напряжений. Однако, исходя из условий работоспособности конструкционных материалов, вид этих кривых может быть ограничен участком, ограниченным по оси $O - \epsilon$ значением предела допустимых деформаций $[\epsilon]$.

В качестве примера рассмотрим изменение запаса прочности материала между состояниями, определяемыми кривой 1, с точкой, характеризующей напряженно-деформированное состояние A_1 , и кривой 2 с точкой A_2 (рис.2).

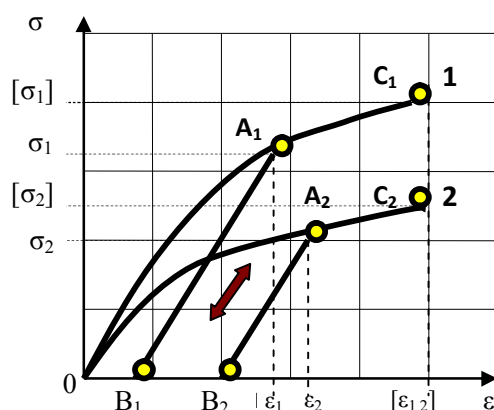


Рис.2. Изменение вида характеристик полимерного материала при нагружении и разгрузке:
 1 - $T_1 < T_2$, $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2$; 2 - $T_2 > T_1$, $\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_1$.

Предполагаем, что материал гипотетически не имеет предварительного напряженно-деформированного состояния в виде остаточных напряжений и деформаций. Нагружение материала при условиях 1 и 2 происходит из начала координат. Условиям нагружения 1, 2 соответствуют температуры $T_1 < T_2$ и скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2$. В обоих случаях после нагружения по линиям OA_1 , OA_2 происходит полная разгрузка по линиям A_1B_1 , A_2B_2 соответственно. Аналогичные результаты испытаний могут быть получены при условиях $T_1 = T_2$, $\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2$ или при комбинации подобных вариантов нагружения. В данном случае изменение запаса прочности определяется разностью $[\sigma_1] - [\sigma_2]$ при неизменном уровне предельных напряжений $[\epsilon_1] = [\epsilon_2]$. Однако, как будет показано ниже, такой способ оценки запаса прочности не является достаточно информативным, поскольку при этом не учитываются возможные изменения предельных деформаций и появление необратимых остаточных напряжений и деформаций, приводящее к существенной утрате запаса прочности материала.

Таким образом, запас прочности и несущей способности материала, в первую очередь, определяется самими условиями нагружения, а именно скоростью нагружения $\dot{\epsilon}$ и температурой T . Аналогичный спуск характеристической кривой из состояния 1 к состоянию 2 может быть получен при эквивалентной замене температуры T временем нагружения t либо путем комбинации всех основных параметров нагружения. Прогнозирование вида характеристических кривых можно осуществлять с помощью приведенных выше обобщенных уравнений кинетико-механических характеристик полимерных материалов. Для определения прочности и несущей способности материала необходимо учитывать не только отдельные прочностные или деформационные свойства в виде пределов прочности $[\sigma]$ или предельных деформаций $[\epsilon]$, но и совокупность этих показателей. Поэтому для полноценного и наиболее информативного анализа прочностных и деформационных свойств материалов целесообразно рассматривать обобщенные энергетические показатели в виде произведений основных параметров, характеризующих текущее состояние материала.

В качестве таких обобщенных энергетических показателей целесообразно рассматривать следующие величины:

- энергия нагружения: $\Theta = \sigma \epsilon V$, Дж; (3)

- удельная объемная энергия нагружения: $\hat{\Theta} = \sigma \epsilon$, Дж/м³; (4)

- удельная массовая энергия нагружения: $\tilde{\Theta} = \frac{\sigma}{\rho} \epsilon$, Дж/кг. (5)

При этом целесообразно различать энергию внешнего воздействия или энерговклад внешнего термосилового нагружения, который будем обозначать $\hat{\Theta}_B$, $\tilde{\Theta}_B$ соответственно. В

этом случае величина внешней нагрузки выражается через напряжения σ_B либо через величину внешнего давления на единицу площади поверхности объекта $\sigma_B = \frac{P_B}{S}$. Кроме того, указанный обобщенный показатель может включать параметры, характеризующие воздействие любого вида. Величину поглощенной материалом энергии внешнего воздействия целесообразно обозначить $\hat{\Theta}_\Pi, \tilde{\Theta}_\Pi$, которая, как правило, меньше энергии воздействия или равна ей. Способность материала поглощать энергию внешнего воздействия до наступления предельного состояния обозначим как энергоемкость $\hat{\Theta}_E, \tilde{\Theta}_E$.

Величину внутренней энергии тела обозначим общепринятым символом U с соответствующими уточняющими верхними символами для удельной объемной \hat{U} и массовой \tilde{U} внутренней энергии. Остаточная энергоемкость материала в наибольшей степени может характеризовать остаточную прочность и деформативность материала конструкции или запас его прочности. Переход от величины остаточной энергоемкости $\Theta_{E_{ост}}$ к эквивалентному ей энергокладу Θ_B позволяет наиболее полно характеризовать запас несущей способности Z конструкционных материалов. Кроме энергетических показателей целесообразно ввести соответствующие им показатели мощности, характеризующие интенсивность рассматриваемых процессов энергообмена, соответственно $\hat{\Theta}, \dot{\Theta}, \tilde{\Theta}$. Используя введенные обозначения, удобно провести анализ изменений характеристик, приведенных на рис.2. Начальная энергоемкость материала до испытаний определяется интегралами от функций характеристических кривых 1 и 2 на участке от 0 до $[\varepsilon]$. Принимая для рассматриваемых условий нагружения и интегрирования параметры времени и температуры постоянными, на основании (1) получим:

$$\hat{\Theta} = \int_0^{[\varepsilon]} \left[E\varepsilon + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right) \right] d\varepsilon = [\varepsilon] \left\{ E \frac{[\varepsilon]}{2} + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \frac{\eta}{t} \right) \right\}. \quad (6)$$

В случае, когда время в выражении (6) совпадает с временем релаксации напряжений после снятия нагрузки $t = t_p$ последнее слагаемое можно заменить модулем упругости. Тогда

$$\hat{\Theta} = E [\varepsilon] \left\{ 0,5 [\varepsilon] + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \left(\ln \frac{t}{\tau_0} + 1 \right) \right\}. \quad (7)$$

Если в качестве постоянной величины выбрать скорость нагружения $\dot{\varepsilon}$, тогда можно получить:

$$\hat{\Theta} = [\varepsilon] \left\{ E \left(\frac{[\varepsilon]}{2} + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right) + \eta \dot{\varepsilon}(T) \right\}. \quad (8)$$

Произведем замену коэффициента вязкости η на коэффициент λ , где $\eta = \frac{E}{\lambda}$. Тогда получим выражение (8) в более компактном полуэмпирическом виде:

$$\hat{\Theta} = E [\varepsilon] \left\{ \left(\frac{[\varepsilon]}{2} + \frac{\alpha k T}{C} \frac{a}{\Delta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right) + \frac{1}{\lambda} \dot{\varepsilon}(T) \right\}. \quad (9)$$

Полученные формулы (7)-(9) удобны для прогнозирования и анализа начальной энергоемкости материалов при различных условиях испытаний. Так, например, для оценки энергоемкости материала при условиях, характеризуемых кривыми 1 и 2, достаточно найти разность между величинами энергоемкости $\hat{\Theta}_2 - \hat{\Theta}_1$, при подстановке в соответствующие выражения (7)-(9)

значений параметров нагружения. Например, при проведении испытаний с условиями температуры $T_1 < T_2$ и скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2$ удобно воспользоваться выражением (8) или (9). Эти же формулы можно использовать при условиях испытаний $T_1 = T_2$, $\dot{\epsilon}_1 > \dot{\epsilon}_2$, а также в других случаях нагружения, когда один из указанных параметров остается фиксированным, а другой – переменным. В случаях различного времени нагружения при постоянной температуре также удобно использовать выражения вида (7)-(9), поскольку они позволяют проводить комплексный анализ начальной энергоемкости материалов при комбинированном изменении параметров нагружения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что энергоемкость материала зависит от условий нагружения и, прежде всего, от температуры и скорости нагружения. Разность энергоемкостей материалов при различных условиях нагружения можно также определить как J - интеграл, представляющий собой разность интегралов $J = \hat{\Theta}_2 - \hat{\Theta}_1$. Переход к J - интегралу является важным для установления связи с современными представлениями механики разрушения о накоплении повреждений, определяющих условия разрушения твердого тела. В наиболее общих случаях повторных нагружений и промежуточной разгрузки материала остаточную энергоемкость материала можно определить как площадь фигуры $B_2A_2C_2[\epsilon_2]$, соответствующая характеристике рассматриваемого конечного состояния материала (в данном случае кривая 2 на рис.2).

Рассмотрим общие случаи нагружения реологических материалов при различных условиях, способах и режимах действия нагрузок. В частности, анализируя состояние материала A_2 (рис.2) при произвольных условиях нагружения, следует выделить потенциальную энергоемкость $\hat{\Theta}_{E_{II}}$, определяемую площадью $B_2A_2C_2[\epsilon_2]$ и действительную $\hat{\Theta}_{E_d} - \epsilon_2 A_2 C_2[\epsilon_2]$. Потенциальная энергоемкость определяет запас несущей способности материала в случае его полной разгрузки. Действительная энергоемкость определяет запас несущей способности, соответствующий напряженно-деформированному состоянию материала при действующем уровне нагружения. Исходя из удобства вычисления интегралов и последующего анализа возможностей материала сохранять работоспособность при различных исходных состояниях, необходимо определить значения обоих интегралов. Разность рассматриваемых величин энергоемкостей определяется величиной временного запаса несущей способности или временным энергопоглощением, зависящим от времени действия нагрузки до момента возможного ее снятия и определяемым разностью $\hat{\Theta}_{II_B} = \hat{\Theta}_{E_{II}} - \hat{\Theta}_{E_d}$ или как площадь фигуры $B_2A_2\epsilon_2$ на рис.2. Если учесть, что точке B_2 соответствует значение остаточной деформации материала $\epsilon_{2ост}$ в случае его разгрузки из состояния A_2 в B_2 , то временное энергопоглощение можно определить соотношением:

$$\hat{\Theta}_{II_B} = \hat{\Theta}_{E_{II}} - \hat{\Theta}_{E_d} = \frac{\sigma_2}{2(\epsilon_2 - \epsilon_{2ост})}, \quad (10)$$

где σ_2, ϵ_2 - напряжения и деформации, соответствующие действующим условиям нагружения материала.

Действительную энергоемкость $\hat{\Theta}_{E_d}$ определяем интегральным выражением:

$$\hat{\Theta}_{E_d} = \int_{\epsilon}^{[\epsilon]} \left[E\epsilon + \frac{\alpha k T a}{C \Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right) \right] d\epsilon = ([\epsilon] - \epsilon) \left\{ \frac{E}{2} ([\epsilon] + \epsilon) + \frac{\alpha k T a}{C \Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right) \right\}. \quad (11)$$

Тогда выражение для потенциальной или полной энергоемкости $\hat{\Theta}_{E_{II}}$ можно окончательно записать в следующем виде:

$$\hat{\Theta}_{E_{II}} = \frac{\sigma_i}{2(\epsilon_i - \epsilon_{iост})} + ([\epsilon] - \epsilon_i) \left\{ \frac{E}{2} ([\epsilon] + \epsilon_i) + \frac{\alpha k T a}{C \Delta} \left(E \ln \frac{t}{\tau_0} + \eta \frac{1}{t} \right) \right\}, \quad (12)$$

где $\sigma_i, \varepsilon_i, \varepsilon_{i_{ост}}$ - напряжения, деформации и остаточные деформации, соответствующие действующим условиям нагружения материала в рассматриваемой точке состояния (например, точке A_2 на рис.2).

Используя полученные выражения, можно определить величины, характеризующие остаточную прочность, несущую способность, накопленный ущерб, уровень предельных нагрузок и остаточный ресурс материала конструкции.

Остаточную прочность для текущего состояния A_2 (см.рис.2) целесообразно характеризовать величиной действительной энергоемкости $\hat{\Theta}_{E_d}$ (11), а в случае разгрузки материала до состояния B_2 - потенциальной или полной энергоемкостью $\hat{\Theta}_{E_n}$ (12). Запас несущей способности Z для этих состояний может быть выражен этими же величинами при условии эквивалентного соответствия между ними и энерговкладом от воздействия эксплуатационных нагрузок, т.е. $\hat{\Theta}_B \cong \hat{\Theta}_E$.

Библиографический список

1. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел / С.Н. Журков // Физика прочности и пластичности. – М.: Наука. – 1986. – С.5-10.
2. Осяев О.Г. Расчет несущей способности и оценка технического состояния тонкостенных и толстостенных многослойных оболочечных конструкций с учетом факторов длительной эксплуатации / О.Г. Осяев, А.В. Остапенко // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – №7. – С.16-22.
3. Осяев О.Г. Кинетический подход к расчету несущей способности полимерных многослойных конструкций, находящихся в длительной эксплуатации / О.Г. Осяев, А.В. Остапенко // Изв. ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2008. – С.92-98.

Материал поступил в редакцию 29.12.09.

O.G. OSYAEV

METHOD OF STRENGTH ESTIMATION OF CONSTRUCTURAL POLYMER MATERIALS BASED ON THE KINETICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS

A new method for estimation of long-term strength of constructional polymers is proposed. The method is based on the analysis of generalized kinetic and mechanical characteristics obtained by the synthesis of the kinetic strength theory and the creep theory.

ОСЯЕВ ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ (р.1963), старший преподаватель кафедры «Материаловедение» Ростовского военного института, кандидат технических наук (1995), доцент (2003). Окончил Ростовский военный институт (1985).

Область научных интересов: численные и экспериментальные методы исследования и прогнозирования прочностной надежности многослойных несущих конструкций из полимерных композитов.

Автор более 100 научных работ.

osyevog@mail.ru