

УДК 539.374:519.8

В. П. ПАВЛОВ

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ВО ВРЕМЕНИ ТЕМПЕРАТУРЕ

Излагается комплекс методов, который предназначен для обеспечения методик расчета конструкций из стеклопластиков объективной информацией о характере деформирования полимерных композитов данного вида при высокой переменной во времени температуре. Он включает: методы экспериментального изучения и теоретического описания тепловой деформации, диаграмм деформирования, ползучести и релаксации стеклопластиков при высокой температуре с учетом термодеструкции материала. Предложены математические модели, описывающие тепловую деформацию, диаграммы деформирования, ползучесть и релаксацию стеклопластиков при высокой нестационарной температуре. *Стеклопластик; расчет конструкций; термодеструкция; ползучесть; релаксация*

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В изделиях авиационной, ракетной и космической техники, например, при работе ракетного двигателя или при спуске на Землю космического летательного аппарата, температура на поверхности некоторых элементов конструкции может в течение сравнительно короткого времени, равного 10–20 мин, достигнуть и превысить 1000°С.

Для изготовления элементов конструкций, работающих при таких условиях, часто применяют стеклопластики.

В связи с этим существует проблема расчета конструкций из стеклопластиков, работающих при высокой переменной во времени температуре.

Для решения данной проблемы необходимо знать свойства применяемых стеклопластиков в условиях высоких нестационарных температур, соответствующих условиям эксплуатации.

До настоящего времени практически не существует стандартных методов экспериментального изучения и математического описания механических свойств стеклопластиков при высоких переменных во времени температурах и, в основном, применяются различные нестандартные подходы, точность и эффективность которых нуждается в детальном изучении.

Исходя из этого в предлагаемой работе была поставлена и решена задача разработки комплекса методов экспериментального изучения и математического описания теплового и вязкоупругого деформирования стеклопластиков при высоких переменных во времени температурах.

2. СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемое исследование содержит следующий комплекс методов, обеспечивающих расчет конструкций из стеклопластиков при высокой переменной во времени температуре:

- метод экспериментального изучения теплового деформирования стеклопластиков при переменной во времени высокой температуре, изменяющейся по закону, близкому к условиям реальной эксплуатации;
- метод построения математической модели теплового деформирования при переменной во времени высокой температуре;
- метод экспериментального изучения деформационных, прочностных и термовязкоупругих свойств стеклопластиков при высоких переменных во времени высоких температурах, близких к условиям реальной эксплуатации;
- метод построения математической модели ползучести стеклопластиков при переменной во времени высокой температуре.

3. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ И АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТЕПЛООВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

При расчете конструкции, работающей при переменной во времени высокой температуре, необходимо знание тепловой деформации ϵ_T в каждый момент времени.

Для определения тепловой деформации ϵ_T при произвольном законе изменения температуры $T = T(t)$ необходима соответствующая математическая модель теплового деформирования.

Построить такую модель можно только на основе экспериментальных исследований тепловой деформации при переменной во времени высокой температуре, для проведения которых было создано специальное экспериментальное оборудование.

Экспериментальное оборудование

Изучение теплового деформирования стеклопластиков проводилось на специально созданном испытательном комплексе [9], обеспечивающем экспериментальное исследование теплового деформирования стеклопластиков до температуры $T = 2000^\circ\text{C}$ при переменной во времени высокой температуре $T = T(t)$.

На этом оборудовании было изучено тепловое деформирование двух марок стеклопластиков, характеризующихся следующим составом и технологией изготовления.

Материалы

Стеклопластик КТ-11-К-Ф является слоистым композитом, изготовленным на основе полотна, сшитого из кремнеземно-капроновой ткани марки КТ-11-К ГОСТ 13863-77 [1,6], пропитанной связующим на основе бакелитового лака марки ЛБС-4 ГОСТ 901-71. Материал получался методом вакуумно-автоклавного прессования при температуре 135°C с окончательной термообработкой при температуре 180°C в течение 10 ч.

Стеклопластик КТАН-К-Ф изготовлен на основе стеклотрикотажа марки КТАН-К согласно ТУ 6-11-371-76 [1] и фенолформальдегидного связующего резольного типа. В качестве связующего использована смесь бакелитового лака марки ЛБС-4 ГОСТ 901-71 и жидкого бакелита марки БЖ-1 ГОСТ 4559-71, взятых в соотношении 1:1. Полотно марки КТАН-К изготовлено из выпцело-

ченных кремнеземных волокон и капроновых нитей. Материал марки КТАН-К-Ф изготавливался методом прессования при удельном давлении $40\text{--}45\text{ кг/см}^2$ с окончательной термообработкой в течение 5 часов при температуре 140°C .

Результаты экспериментов по изучению теплового деформирования стеклопластика КТАН-К-Ф

В процессе экспериментальных исследований был изучен процесс теплового деформирования изучаемых стеклопластиков при различных условиях испытаний.

Так, на рис. 1 показано изменение тепловой деформации ϵ_T во времени t для стеклопластика КТАН-К-Ф при различных законах изменения температуры $T = T(t)$ [2].

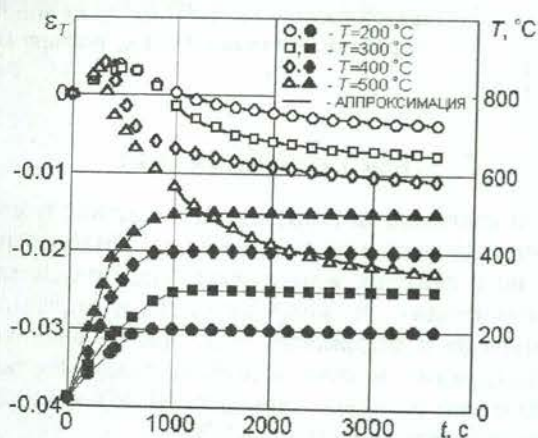


Рис. 1. Зависимости тепловой деформации ϵ_T от времени t (светлые символы) и соответствующие им законы изменения температуры $T = T(t)$ (темные символы) для КТАН-К-Ф

Из рис. 1 видно, что на участке, когда температура постоянна, $T = \text{const}$, тепловая деформация ϵ_T все равно изменяется во времени t , и это изменение весьма значительно.

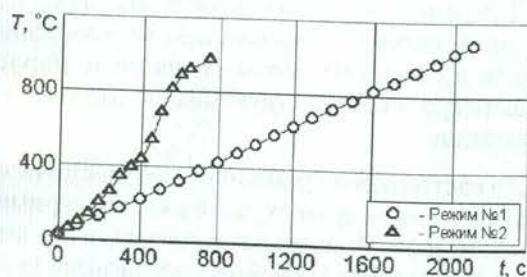


Рис. 2. Изменение температуры T стеклотрикотажа КТАН-К-Ф во времени t при двух режимах нагрева

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости тепловой деформации ϵ_T

стеклопластика КТАН-К-Ф от температуры T при двух законах изменения температуры во времени (рис. 2). Один из законов нагрева является линейным $T = 27 + 0,5t$ (см. рис. 2).

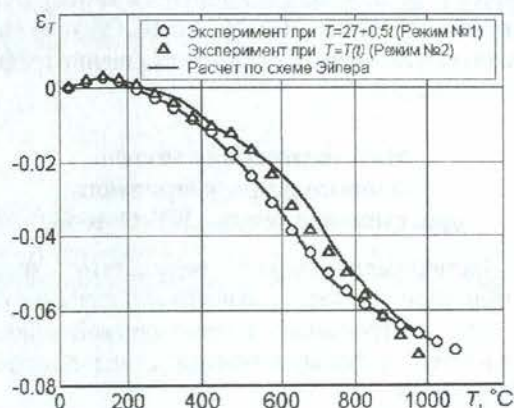


Рис. 3. Изменение тепловой деформации ε_T стеклопластика КТАН-К-Ф в зависимости от температуры при режимах 1 и 2. Символы — эксперимент, линии — расчет по схеме Эйлера

Видно (см. рис. 3), что в отличие от традиционных представлений при температуре $T > 133^\circ\text{C}$ с ростом температуры тепловая деформация убывает и при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ достигает величины $\varepsilon_T \approx -0,07$.

Результаты экспериментов, представленных на рис. 1 и 3, свидетельствуют о том, что при высоких температурах тепловая деформация стеклопластика КТАН-К-Ф зависит как от температуры, так и от времени.

Математическая модель теплового деформирования стеклопластика КТАН-К-Ф

Для описания процесса теплового деформирования стеклопластика КТАН-К-Ф при произвольном законе изменения температуры $T = T(t)$ была предложена [7] дифференциальная модель теплового деформирования следующего вида:

$$\frac{d\varepsilon_T}{dt} = \begin{cases} \beta(T) \frac{dT}{dt} & \text{при } T \leq 133^\circ\text{C}, \\ a(T)\chi(\varepsilon_T) & \text{при } T > 133^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (1)$$

Параметры данной модели были определены на основе экспериментов, представленных на рис. 1 и 3.

Температурные зависимости $\beta = \beta(T)$ и $a = a(T)$ описываются выражениями

$$\beta = \begin{cases} 3 \cdot 10^{-5} & \text{при } T \leq 100^\circ\text{C}, \\ 3 \cdot 10^{-5} - 9,3 \cdot 10^{-8}(T - 100) - \\ - 2,5 \cdot 10^{-8}(T - 100)^2 & \\ \text{при } 100 < T \leq 133^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

и

$$a(T) = 10^{0,009(T-200)}. \quad (3)$$

Для описания функции $\chi = \chi(\varepsilon_T)$ выбран сплайн третьей степени дефекта 1 [5].

На рис. 4 точками представлена экспериментальная зависимость $\chi = \chi(\varepsilon_T)$, а сплошной линией показана соответствующая сплайновая аппроксимация.

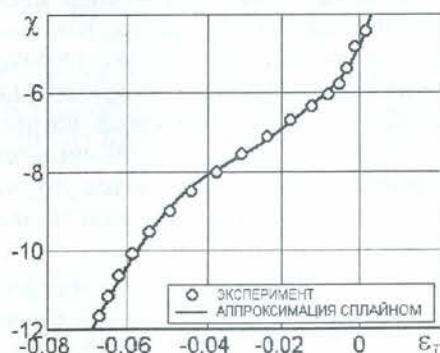


Рис. 4. Зависимость $\chi = \chi(\varepsilon_T)$ обобщенной скорости тепловой деформации стеклопластика КТАН-К-Ф от величины деформации. Символы — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация сплайном

На основе сформированной математической модели теплового деформирования были рассчитаны зависимости тепловой деформации ε_T от времени t для двух законов изменения температуры $T = T(t)$, представленных на рис. 2.

Результаты расчетов тепловой деформации ε_T стеклопластика КТАН-К-Ф представлены сплошными линиями на рис. 3.

Достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов на рис. 3 свидетельствует о достаточно высокой точности математической модели теплового деформирования в форме дифференциальных уравнений (1).

Результаты экспериментов по изучению теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф

Отметим, что стеклопластики КТ-11-К-Ф и КТАН-К-Ф имеют близкие по составу полимерные матрицы, но различаются армирующими тканями:

• КТАН-К-Ф — изготавливался на основе ткани трикотажного плетения;

• КТ-11-К-Ф — на основе ткани сатинового плетения.

Кроме этого, стеклопластик КТ-11-К-Ф подвергался термообработке при температуре $T = 180^\circ\text{C}$, а КТАН-К-Ф термообработывался при $T = 140^\circ\text{C}$.

Схожесть полимерных матриц данных стеклопластиков приводит к тому, что их тепловое деформирование при высоких температурах имеет во многом подобный качественный характер.

При экспериментальном изучении и математическом описании теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф, в отличие от КТАН-К-Ф, применялась иная методика определения параметров математической модели теплового деформирования. Она базируется исключительно на экспериментальных исследованиях при переменных во времени температурах, без исследований при постоянных температурах. Используются результаты экспериментов для двух законов изменения температуры

$$\begin{aligned} T_1 &= 20 + 0,5t, \\ T_2 &= 20 + 10t, \end{aligned} \quad (4)$$

где T — температура, измеряемая в град. Цельсия, t — время, с.

Зависимости тепловой деформации ε_T от температуры T для законов нагрева (4) представлены на рис. 5.

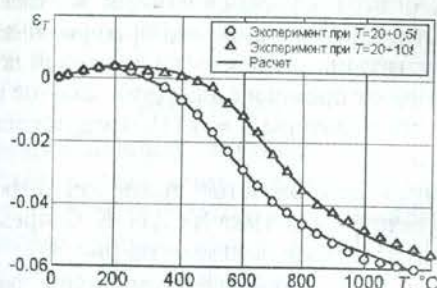


Рис. 5. Зависимость тепловой деформации ε_T стеклопластика КТ-11-К-Ф от температуры T при двух режимах нагрева

Результаты экспериментов, представленные на рис. 5, свидетельствуют о следующих основных закономерностях:

• для всех режимов нагрева с ростом температуры при $T \geq 20^\circ\text{C}$ тепловая деформация ε_T вначале возрастает и при $T \approx 180^\circ\text{C}$ достигает максимума, а при дальнейшем увеличении температуры тепловая деформация монотонно убывает и при $T \approx 1200^\circ\text{C}$ достигает отрицательной величины $\varepsilon_T \approx -0,06$;

• наблюдается (рис. 5) весьма заметное влияние скорости нагрева на тепловое деформирование, проявляющееся в том, что для «быстрого» нагрева ($T = 20 + 10t$) достижение той же деформации, что для «медленного» нагрева ($T = 20 + 0,5t$), требуется температура приблизительно на 150°C выше. Об этом свидетельствует относительное смещение графиков вдоль оси T .

Математическая модель теплового деформирования для стеклопластика КТ-11-К-Ф

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 5, приняты в качестве базы для построения математической модели теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф.

Примем, что температура начала термической деструкции T_S стеклопластика КТ-11-К-Ф равна

$$T_S = 180^\circ\text{C}. \quad (5)$$

При описании тепловой деформации ε_T стеклопластика КТ-11-К-Ф для температуры T , превышающей T_S ($T \geq T_S$), воспользуемся вторым уравнением из системы (1):

$$\frac{d\varepsilon_T}{dt} = a(T)\chi(\varepsilon_T). \quad (6)$$

Учитывая соотношение (3), полученное для стеклопластика КТАН-К-Ф, функцию масштаба $a(T)$ опишем выражением вида

$$a(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T < 180^\circ\text{C}, \\ 10^{\psi(T-T_S)} & \text{при } T \geq 180^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\psi = \text{const}$ — постоянный коэффициент, учитывающий влияние температуры на скорость изменения тепловой деформации.

Далее рассмотрим нагрев при линейном законе изменения температуры T во времени t :

$$T = T_0 + bt, \quad (8)$$

где T_0 — начальная температура при $t = 0$, b — постоянная скорость изменения температуры

$$b = dT/dt = \text{const}. \quad (9)$$

Преобразуем дифференциальное уравнение (6):

$$\frac{d\varepsilon_T}{dT} \frac{dT}{dt} = a(T)\chi(\varepsilon_T). \quad (10)$$

При условии (9) из уравнения (10) получаем

$$\frac{d\varepsilon_T}{dT} = \frac{a(T)\chi(\varepsilon_T)}{b}, \quad (11)$$

Решая (11) методом разделения переменных, запишем

$$\int_{\varepsilon_{TS}}^{\varepsilon_T} \frac{d\varepsilon_T}{\chi(\varepsilon_T)} = \int_{T_S}^T \frac{a(T)}{b} dT, \quad (12)$$

где ε_{TS} — деформация при температуре начала деструкции T_S , ε_T — деформация при конечной температуре T . Введем обозначение:

$$F(\varepsilon_T) = \int \frac{d\varepsilon_T}{\chi(\varepsilon_T)} \quad (13)$$

и на его основе с учетом (7) и (12) получим

$$\begin{aligned} F(\varepsilon_T) - F(\varepsilon_{TS}) &= \\ &= \frac{1}{b\psi} \frac{1}{\ln 10} \left(10^{\psi(T-T_S)} - 1 \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотрим два линейных закона нагрева, начинающихся при температуре появления термической деструкции композита T_S

$$\begin{aligned} T_1 &= T_S + bt, \\ T_2 &= T_S + kbt, \end{aligned} \quad (15)$$

где b и k — некоторые постоянные коэффициенты

$$\begin{aligned} b &= \text{const}, \\ k &= \text{const}. \end{aligned} \quad (16)$$

Учтем, что в обоих случаях начальные тепловые деформации ε_{TS} являются одинаковыми.

При нагреве по законам, задаваемым (15), при некоторой температуре T_1 для первого режима нагрева со скоростью b и температуре T_2 при втором режиме нагрева с другой скоростью kb будет иметь место совпадение значений тепловых деформаций $\varepsilon_T^{(1)} = \varepsilon_T^{(2)}$.

Функция $F(\varepsilon_T)$ является общей для любых законов нагрева и поэтому согласно (14) для двух линейных законов нагрева (15) при одинаковых значениях тепловых деформаций $\varepsilon_T^{(1)} = \varepsilon_T^{(2)}$ для различных температур T_1 и T_2 справедливо равенство

$$\begin{aligned} \left(10^{\psi(T_1-T_S)} - 1 \right) &= \\ &= \frac{1}{k} \left(10^{\psi(T_2-T_S)} - 1 \right), \end{aligned} \quad (17)$$

из которого следует, что при $k > 1$ обязательно $T_2 > T_1$.

Для стеклопластика КТАН-К-Ф согласно (3) имеем $\psi \approx 0,01$.

Предположим, что для стеклопластика КТ-11-К-Ф значения коэффициента ψ того же порядка, что и у КТАН-К-Ф. Это позволяет считать, что при $T_2 - T_S \geq 200^\circ\text{C}$ и $T_1 - T_S \geq 200^\circ\text{C}$ с точностью до 1% справедливы соотношения

$$\begin{aligned} 10^{\psi(T_1-T_S)} - 1 &\approx 10^{\psi(T_1-T_S)}, \\ 10^{\psi(T_2-T_S)} - 1 &\approx 10^{\psi(T_2-T_S)}. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставив (18) в (17), получим

$$10^{\psi(T_1-T_S)} \approx \frac{1}{k} 10^{\psi(T_2-T_S)}. \quad (19)$$

Вычислив десятичные логарифмы от левой и правой частей равенства (19), после простейших преобразований получаем

$$\psi = \frac{\lg k}{T_2 - T_1}. \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что для модели теплового деформирования в форме (6) при нагреве по линейным законам (15) для одинаковых деформаций $\varepsilon_T^{(1)} = \varepsilon_T^{(2)}$, начиная с некоторой температуры, должно выполняться соотношение

$$T_2 - T_1 \approx \frac{\lg k}{\psi} = \text{const} = \text{inv}(T). \quad (21)$$

Таким образом, в рамках предложенной математической модели теплового деформирования графики температурных зависимостей тепловых деформаций при нагреве по линейным законам (15) в координатах $\varepsilon_T \sim T$, начиная с некоторой температуры, должны стать практически эквидистантными для перемещения вдоль оси T .

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 5, показывают, что при температуре $T > 400^\circ\text{C}$ графики температурных зависимостей тепловых деформаций, действительно, практически параллельны при совмещении вдоль оси температур T . Это является убедительным доводом в пользу модели теплового деформирования в форме дифференциального уравнения (6).

Для экспериментальных результатов, представленных на рис. 5, имеем

$$k = 20, \quad T_2 - T_1 \approx 150. \quad (22)$$

На основе (22) по формуле (20) получаем

$$\psi = \frac{\lg 20}{150} \approx 0,0087 \approx 0,009. \quad (23)$$

В итоге выяснилось, что значение коэффициента ψ для стеклопластика КТ-11-К-Ф практически совпадает со значением соответствующего коэффициента для стеклопластика КТАН-К-Ф. И это вполне объясняется тем, что оба рассматриваемых композита имеют близкие коэффициенты армирования и схожие матрицы.

Определившись с функцией $a(T)$, вновь обратимся к уравнению (6). В нем при изменяющейся во времени температуре $T = T(t)$ коэффициент a также является функцией времени $a = a[T(t)]$.

Учитывая это, для решения дифференциального уравнения (6) воспользуемся методом разделения переменных, записав

$$\frac{d\varepsilon_T}{\chi(\varepsilon_T)} = a[T(t)] dt. \quad (24)$$

Уравнение (6) предназначено для описания теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф в условиях термической деструкции при температурах, превышающих температуру начала термической нестабильности T_S , принимаемую равной $T_S = 180^\circ\text{C}$.

Поэтому начальным считаем некоторый момент времени t_S , для которого температура равна температуре приведения T_S , т. е.

$$T_S = T(t_S). \quad (25)$$

Деформацию для времени t_S обозначим ε_{TS} . В текущий момент времени t температуру обозначим через T , а деформацию — ε_T .

Рассмотрим определенные интегралы от левой и правой частей уравнения (24):

$$\int_{\varepsilon_{TS}}^{\varepsilon_T} \frac{d\varepsilon_T}{\chi(\varepsilon_T)} = \int_{t_S}^t a[T(t)] dt. \quad (26)$$

Введем обозначения

$$F(\varepsilon_T) = \int \frac{d\varepsilon_T}{\chi(\varepsilon_T)}, \quad t' = \int_{t_S}^t a[T(t)] dt. \quad (27)$$

Величину t' назовем приведенным временем. С учетом (27) из (26) получаем

$$F(\varepsilon_T) - F(\varepsilon_{TS}) = t'. \quad (28)$$

Из равенства (28) следует, что между приведенным временем t' и тепловой деформацией ε_T существует однозначная связь, не зависящая от закона нагрева $T(t)$.

Решая (28) относительно ε_T , приходим к выводу, что тепловую деформацию можно рассматривать как некоторую функцию приведенного времени

$$\varepsilon_T = \lambda(t'), \quad (29)$$

где далее $\lambda(t')$ будем называть обобщенной функцией теплового деформирования.

Функция $\lambda(t')$ определена на основе температурной зависимости тепловой деформации $\varepsilon_T(T)$, определенной при линейном законе нагрева $T = 20 + 0,5 t$ (рис. 5).

Построенная таким образом обобщенная кривая теплового деформирования $\lambda(t')$ в координатах $\lambda \sim \lg t'$ для температуры приведения $T_S = 180^\circ\text{C}$ представлена на рис. 6.



Рис. 6. Тепловая деформация ε_T стеклопластика КТ-11-К-Ф в зависимости от логарифма условного времени $\lg t'$ (символы). Обобщенная кривая теплового деформирования $\lambda(t')$ (линия)

Обобщенная кривая $\lambda(t')$ аппроксимирована сплайном третьей степени [5], который показан на рис. 6 сплошной линией. Из рис. 6 видно, что экспериментальная и расчетная обобщенные кривые теплового деформирования для стеклопластика КТ-11-К-Ф достаточно близки.

Для расчетов тепловой деформации при температурах, не превышающих температуру начала термической деструкции ($T \leq T_S = 180^\circ\text{C}$), получены следующие соотношения:

$$\frac{d\varepsilon_T}{dT} = \begin{cases} 2,5 \cdot 10^{-5} & \text{при } T \leq 156^\circ\text{C}, \\ 2,5 \cdot 10^{-5} - 1,04 \cdot 10^{-6}(T - 156) & \text{при } 156 < T \leq 180^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (30)$$

Объединяя (6), (29) и (30), получаем единую математическую модель для описания теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф в рассматриваемом диапазоне температур:

$$\frac{d\varepsilon_T}{dT} = 2,5 \cdot 10^{-5} \quad \text{при } T \leq 156^\circ\text{C},$$

$$\frac{d\varepsilon_T}{dT} = 2,5 \cdot 10^{-5} - 1,04 \cdot 10^{-6}(T - 156) \quad \text{при } 156 < T \leq 180^\circ\text{C},$$

$$\varepsilon_T(t) = \lambda(t') - \lambda(0) + \varepsilon_{T180}, \quad (31)$$

$$t' = \int_0^t a[T(\rho)] d\rho,$$

$$a(t) = 10^{0,009(T-180)} \quad \text{при } T > 180^\circ\text{C},$$

где ε_{T180} — тепловая деформация, возникающая при температуре начала термической деформации $T = 180^\circ\text{C}$, $\lambda(t')$ — обобщенная функция теплового деформирования, определяемая согласно рис. 6.

На основе (31) с использованием рис. 6 был выполнен расчет температурных зависимостей тепловых деформаций $\varepsilon_T(T)$ при линейных законах нагрева. Расчетные кривые представлены на рис. 5 сплошными линиями, а экспериментальные результаты показаны символами. Наблюдается (рис. 5) хорошее совпадение экспериментальных и расчетных результатов.

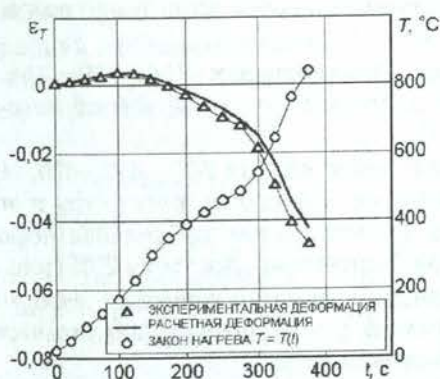


Рис. 7. Тепловая деформация ε_T стеклопластика КТ-11-К-Ф в зависимости от времени t при нагреве по закону $T = T(t)$

Кроме этого, была рассчитана временная зависимость тепловой деформации $\varepsilon_T(t)$ для закона нагрева $T = T(t)$ (рис. 7), отличающегося от линейного.

Полученная теоретическая зависимость изображена сплошной линией на рис. 7. Там

же точками представлены результаты соответствующих экспериментов.

Видно (рис. 7), что расчетная кривая достаточно близка к результатам реального эксперимента, что является хорошим подтверждением справедливости предложенной математической модели теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф.

4. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКА КТ-11-К-Ф ПРИ ВЫСОКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Для выявления особенностей деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф при высоких температурах были проведены три вида испытаний:

- изучение диаграмм деформирования;
- испытания на ползучесть;
- испытания на релаксацию.

Диаграммы деформирования

В работе были определены диаграммы деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф при температурах до 500°C .

Нагрев образцов производился по законам изменения температуры, полученным при одностороннем нагреве образца из стеклопластика КТ-11-К-Ф толщиной 10 мм и представленным на рис. 8. При этом координата слоя, отсчитываемая от нагреваемой поверхности, обозначается буквой z .

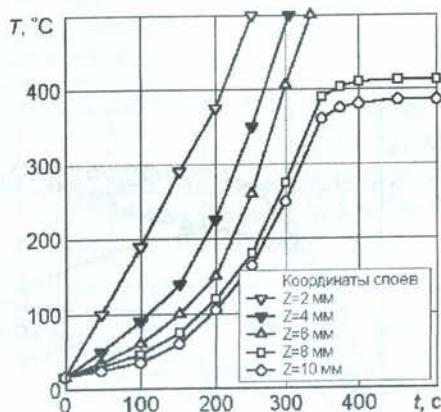


Рис. 8. Зависимости температуры нагрева T от времени t в слоях стержня из стеклопластика КТ-11-К-Ф при одностороннем нагреве

Диаграммы деформирования изучались при скорости растяжения $d\varepsilon/dt \cong 0,001$ 1/с.

Экспериментальные диаграммы деформирования $\sigma \sim \varepsilon$ для различных температур представлены точками на рис. 9–12.

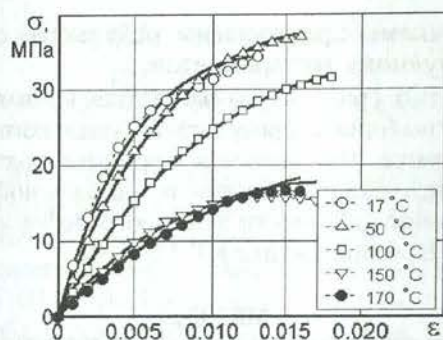


Рис. 9. Диаграммы деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф при $17 \leq T \leq 170^\circ\text{C}$. Символы — эксперимент, линия — аппроксимация

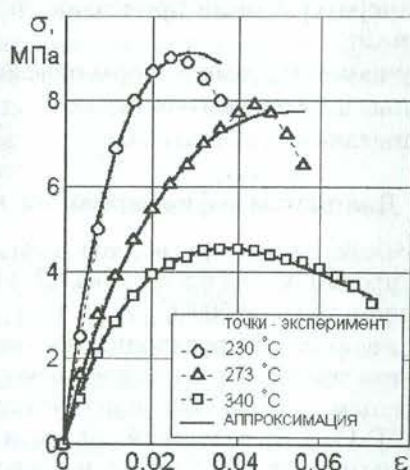


Рис. 10. Диаграммы деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф при $230 \leq T \leq 340^\circ\text{C}$. Символы — эксперимент, линия — аппроксимация

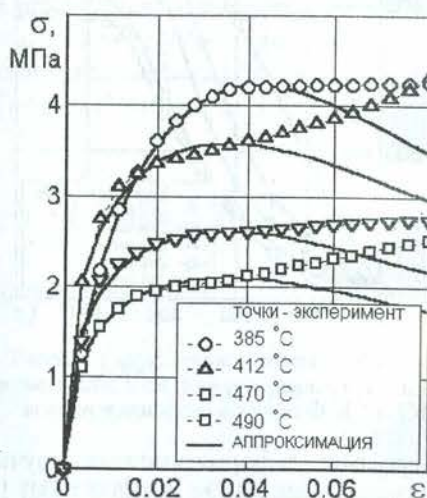


Рис. 11. Диаграммы деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф при $385 \leq T \leq 490^\circ\text{C}$. Символы — эксперимент, линия — аппроксимация

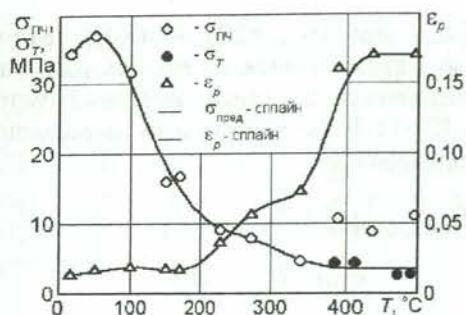


Рис. 12. Температурные зависимости предела прочности $\sigma_{пч}$, предела текучести $\sigma_{т}$, деформации при разрушении ε_p и сплайновые аппроксимации предельного напряжения $\sigma_{пред}$ и деформации при разрушении ε_p стеклопластика КТ-11-К-Ф

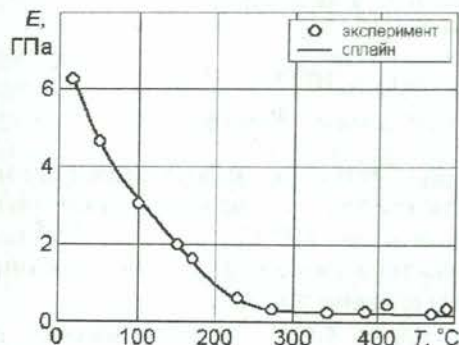


Рис. 13. Расчетная зависимость $E = E(T)$ по модели ползучести стеклопластика КТ-11-К-Ф в сравнении с экспериментом

Анализ результатов испытаний показывает, что:

- при температурах 17, 50, 100°C диаграммы деформирования вплоть до момента разрушения являются монотонно возрастающими (рис. 9);

- при температурах 150, 170, 230, 273, 340°C диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$ имеют максимум (рис. 10, 11);

- при температурах 385, 412, 470, 490°C наблюдается «площадка текучести» и значительно увеличивается предельная деформация при разрушении, достигая 20% (рис. 11).

Зависимости напряжения от деформации (диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$) описаны аналитическими выражениями вида

$$\sigma = A\varepsilon^B e^{C\varepsilon} \quad \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{анпр}}, \quad (32)$$

где $\varepsilon_{\text{анпр}}$ — максимальная деформация, допускаемая в аппроксимирующем выражении (32).

Сопоставление диаграмм деформирования, рассчитанных по формуле (32), с экспериментальными показывает их достаточно хорошее совпадение вплоть до выбранных

предельных значений деформаций аппроксимации $\epsilon_{\text{аппр}}$ (рис. 9–11).

По диаграммам деформирования были определены значения предела прочности $\sigma_{\text{пч}}$ и предельного удлинения ϵ_p при разрушении для различных температур. Полученные результаты точками представлены на рис. 12. Там же линиями показаны расчетные кривые, полученные при аппроксимации сплайном третьей степени.

Анализ диаграмм деформирования (рис. 9–11) позволяет принять допущение о линейной зависимости $\sigma \sim \epsilon$ до напряжений $(0,5-0,6)\sigma_{\text{пч}}$.

По диаграммам деформирования $\sigma \sim \epsilon$ были определены секущие модули упругости, соответствующие напряжениям $0,5\sigma_{\text{пч}}$ или $0,5\sigma_T$ в случае появления площадки «текучности». Соответствующая экспериментальная температурная зависимость $E = E(T)$ точками представлена на рис. 13.

Ползучесть

Ползучесть стеклопластика КТ-11-К-Ф изучалась при постоянных напряжениях, но переменной во времени температуре, меняющейся по выбранным законам.

Экспериментальное оборудование описано в работе [9].

Результаты экспериментов, проведенных при двух законах изменения температуры, обозначаемых далее как законы нагрева № 1 ($T_1 = T_1(t)$) и № 2 ($T_2 = T_2(t)$) для двух значений постоянных напряжений $\sigma = 5$ и 10 МПа, показаны на рис. 14, 15.

Графики экспериментальных законов изменения температуры представлены точками там же на рис. 14, 15.

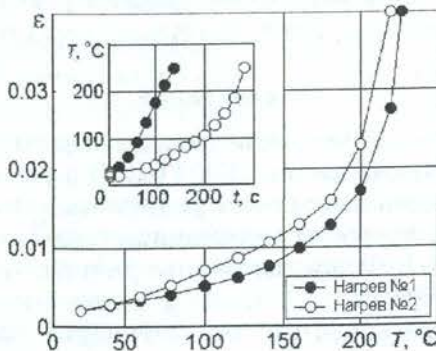


Рис. 14. Температурные зависимости $\epsilon = \epsilon(T)$ деформации стеклопластика КТ-11-К-Ф при двух законах изменения температуры $T = T(t)$ и постоянном напряжении $\sigma = 10$ МПа

Для изучения характера ползучести при температурах $T > 200^\circ\text{C}$ воспользуемся

[8] результатами изучения ползучести стеклопластика КТ-11-К-Ф при напряжениях $\sigma = 0, 21; 0, 35; 0, 49$ МПа и законе нагрева № 3 ($T_3 = T_3(t)$), представленном на рис. 16. Зависимости деформации от температуры $\epsilon = \epsilon(T)$, полученные при этих условиях, представлены точками на рис. 16.

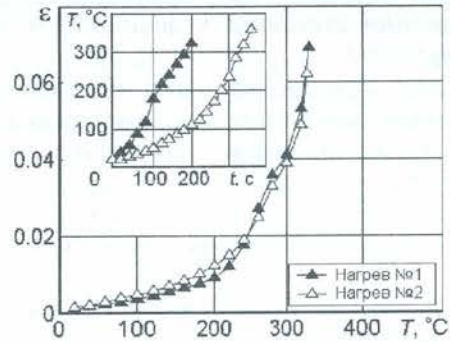


Рис. 15. Температурные зависимости $\epsilon = \epsilon(T)$ деформации стеклопластика КТ-11-К-Ф при двух законах изменения температуры $T = T(t)$ и постоянном напряжении $\sigma = 5$ МПа

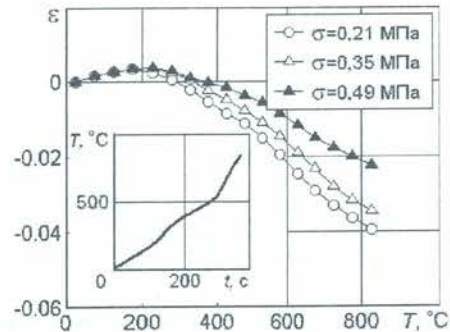


Рис. 16. Температурные зависимости деформации $\epsilon = \epsilon(T)$ стеклопластика КТ-11-К-Ф при заданном законе нагрева $T = T(t)$ и постоянных напряжениях: $\sigma = 0, 21; 0, 35; 0, 49$ МПа

Температурные зависимости податливости при законах нагрева № 1 и № 2 и напряжениях 5 и 10 МПа

Для математического описания результатов экспериментов на ползучесть рассмотрим полную деформацию ϵ как сумму двух компонент

$$\epsilon = \epsilon_\sigma + \epsilon_T, \tag{33}$$

где ϵ_σ — деформация, вызываемая действием напряжения σ , ϵ_T — температурная составляющая деформации.

На основе математической модели теплового деформирования стеклопластика КТ-11-К-Ф, сформулированной выше, были

рассчитаны температурные зависимости тепловой деформации $\varepsilon_T = \varepsilon_T(T)$ для законов нагрева № 1 и № 2.

Затем, вычитая из полной деформации ε тепловую деформацию ε_T :

$$\varepsilon_\sigma(T) = \varepsilon(T) - \varepsilon_T(T), \quad (34)$$

определили зависимость деформации ε_σ от температуры.

Далее, при рассмотрении материала как линейного определяли зависимости податливости D от температуры для законов нагрева № 1 и № 2

$$D(T) = \varepsilon_\sigma(T)/\sigma_0, \quad \text{при } \sigma_0 = \text{const}, \quad (35)$$

где σ_0 — постоянное напряжение при испытаниях на ползучесть.

Полученные таким образом температурные зависимости податливости для экспериментов, представленных на рис. 14, 15, показаны на рис. 17.

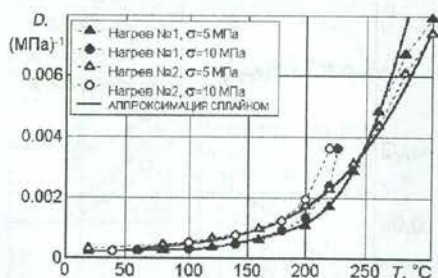


Рис. 17. Температурные зависимости податливости $D = D(T)$ стеклопластика КТ-11-К-Ф при температуре, изменяющейся согласно рис. 15 и 16, и постоянных напряжениях $\sigma = 5$ и 10 МПа

Из рис. 17 видно, что при нагреве до температуры порядка 220°C податливости практически не зависят от напряжений, но несколько отличаются для различных законов нагрева (заштрихованные точки для режима 1 и незаштрихованные для режима 2).

Это позволяет сделать вывод, что при $T \leq 220^\circ\text{C}$ материал с достаточной точностью может рассматриваться как линейный по напряжению. Зависимость же податливости от закона нагрева свидетельствует о некотором его влиянии на процесс ползучести.

В дальнейшем (рис. 17) при $T > 220^\circ\text{C}$ начинает заметно проявляться влияние напряжения.

Объяснить это явление можно тем, что напряжения в образце превышают предел пропорциональности данного материала и материал работает в зоне нелинейности.

На основе экспериментальных результатов, взятых из рис. 14 и 15, были построены и представлены на рис. 17 температурные зависимости податливости для законов нагрева № 1 и № 2. Там же нанесены соответствующие экспериментальные точки. Наблюдается (рис. 17) хорошее совпадение аппроксимирующей кривой с экспериментальными точками для обоих законов изменения температуры.

Подобным же образом была определена температурная зависимость податливости $D = D(T)$ на основе результатов экспериментов, полученных при температурах от 200 до 800°C и представленных на рис. 16.

Полученная зависимость $D = D(T)$ для различных напряжений показана точками на рис. 18. Там же сплошной линией показана усредненная кривая податливости.

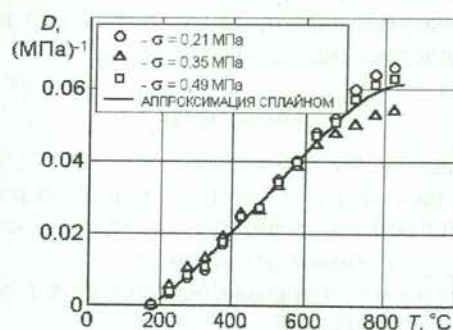


Рис. 18. Температурные зависимости податливости $D = D(T)$ для КТ-11-К-Ф при температуре, изменяющейся согласно рис. 16, и постоянных напряжениях $\sigma = 0,21; 0,35; 0,49$ МПа

Видно (рис. 18), что в диапазоне напряжений от $\sigma = 0,21$ до $\sigma = 0,49$ МПа податливость практически не зависит от напряжения, что свидетельствует о линейности материала в исследованном диапазоне напряжений во всем рассмотренном интервале температур.

Релаксация

При рассмотрении релаксационных явлений стеклопластика КТ-11-К-Ф использованы экспериментальные результаты из работы [3] по изучению релаксации стеклопластика КТ-11-К-Ф при постоянных температурах от 20 до 600°C.

Экспериментальные результаты работы [3] представлены на рис. 19, 20.

Видно (рис. 19, 20), что при всех температурах наблюдается существенная релаксация напряжения, которую необходимо учитывать при расчете напряженного деформированного состояния конструкции из композита при высоких температурах.

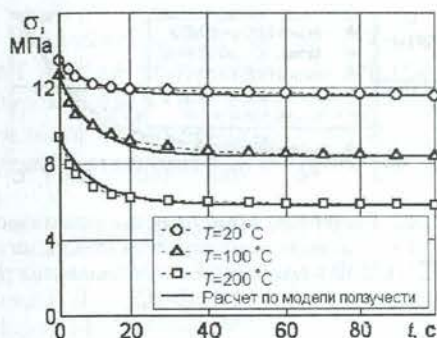


Рис. 19. Релаксационные кривые стеклопластика КТ-11-К-Ф при постоянных температурах $T = 20; 100; 200^\circ\text{C}$. Точки — эксперимент. Сплошная линия — расчет по модели ползучести

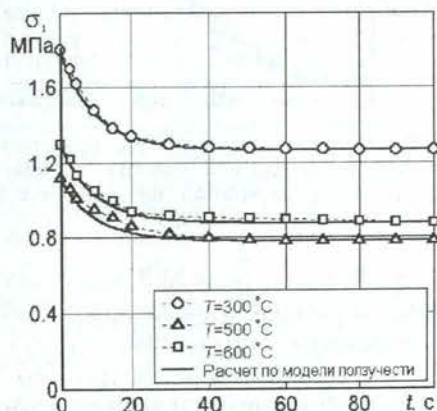


Рис. 20. Релаксационные кривые стеклопластика КТ-11-К-Ф при постоянных температурах $T = 300; 500; 600^\circ\text{C}$. Точки — эксперимент. Сплошная линия — расчет по модели ползучести

5. МЕТОД ОПИСАНИЯ ТЕРМОПОЛЗУЧЕСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Математическая модель термоползучести при высокой нестационарной температуре

До настоящего времени фактически не создана достаточно точная математическая модель ползучести стеклопластика при высоких переменных во времени температурах.

В связи с этим предлагается [4] вариант математической модели, описывающей механическое деформирование стеклопластиков с учетом ползучести при произвольных законах изменения во времени напряжения и высокой температуры.

Разработанная математическая модель характеризуется следующими особенностями:

- математическая модель наследует свойства модели идеально термоупругого материала, т. е. выражения, описывающие упругое деформирование, должны вытекать из нее как частный случай;

- математическая модель описывает ползучесть как при постоянных, так и переменных высоких температурах;

- математическая модель описывает релаксационные явления при высоких постоянных и переменных температурах;

- математическая модель описывает упругие характеристики материала при высоких температурах.

Предлагаемая математическая модель ползучести предназначена для описания деформирования полимерных композитов в условиях переменных высоких температур и разнообразных режимов изменения напряжений и деформаций. Она имеет форму дифференциального уравнения следующего вида:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + a(T)\varepsilon = b(T)\frac{d\sigma}{dt} + c(T)\sigma + f(T)\frac{dT}{dt}\sigma, \quad (36)$$

где $\varepsilon = \text{var}$, $\sigma = \text{var}$, $T = \text{var}$.

Температурные зависимости коэффициентов a , b , c , f для стеклопластика КТ-11-К-Ф были определены на основе результатов экспериментальных исследований, изложенных выше. При этом за основу были приняты:

- результаты испытаний на ползучесть при переменных во времени температурах $T = T(t)$;

- результаты испытаний на релаксацию при постоянных температурах $T = \text{const}$;

- диаграммы деформирования $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, полученные при постоянных температурах ($T = \text{const}$) и постоянных скоростях изменения деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const}$).

Полученные температурные зависимости коэффициентов $a = a(T)$, $b = b(T)$, $c = c(T)$ и $f = f(T)$ дифференциального уравнения (36) аппроксимированы сплайнами третьей степени. Графики зависимостей $a = a(T)$, $b = b(T)$, $c = c(T)$ и $f = f(T)$ представлены в форме графиков на рис. 21–24.

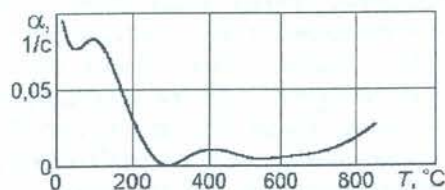


Рис. 21. Зависимость коэффициента a от температуры T

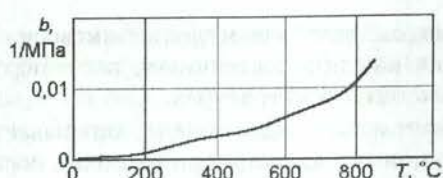


Рис. 22. Зависимость коэффициента b от температуры T

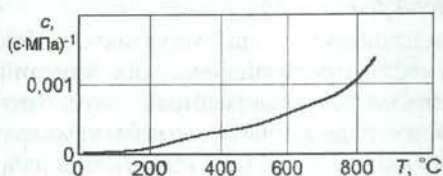


Рис. 23. Зависимость коэффициента c от температуры T

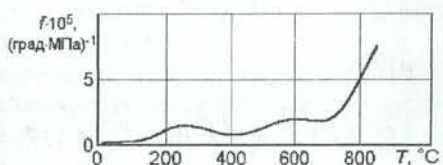


Рис. 24. Зависимость коэффициента f от температуры T

Оценка точности математической модели ползучести стеклопластика КТ-11-К-Ф

Проверка по модулю упругости

Для оценки точности математической модели ползучести (36) по полученным зависимостям $a = a(T)$, $b = b(T)$, $c = c(T)$ и $f = f(T)$ были выполнены расчеты сжимающих модулей упругости, кривых ползучести и релаксации.

Расчетная температурная зависимость сжимающего модуля упругости $E = E(T)$ представлена сплошной линией на рис. 13.

Там же точками представлена экспериментальная зависимость $E = E(T)$. Наблюдается (рис. 13) хорошее совпадение экспериментальных результатов с расчетной кривой.

Проверка по кривым податливости

Для законов нагрева № 1, 2, представленных на рис. 14, 15, были рассчитаны кривые податливости. Они изображены сплошными линиями на рис. 25. Видно (рис. 25), что расчетные кривые податливости для режимов нагрева № 1 и № 2 практически совпадают. Это свидетельствует о том, что с точки зрения ползучести режимы нагрева весьма близки между собой. Там же на рис. 25 точками представлены результаты соответствующих экспериментов. Наблюдается (рис. 25) вполне удовлетворительное совпадение результатов экспериментов и расчетов.



Рис. 25. Расчетная зависимость податливости $D = D(T)$ по модели ползучести стеклопластика КТ-11-К-Ф в сравнении с экспериментом при $20 \leq T \leq 250^\circ\text{C}$



Рис. 26. Расчетная зависимость податливости $D = D(T)$ по модели ползучести стеклопластика КТ-11-К-Ф в сравнении с экспериментом при $200 \leq T \leq 850^\circ\text{C}$

На рис. 26 для нагрева № 3, представленного на рис. 16, линией показана расчетная кривая податливости, а символами — результаты экспериментов. Наблюдается (рис. 26) хорошее совпадение расчетов и экспериментов.

Проверка по кривым релаксации

На основе модели ползучести (36) были рассчитаны релаксационные кривые для температур и напряжений, соответствующих результатам экспериментов, представленных на рис. 19, 20.

Расчетные релаксационные кривые представлены сплошными линиями на рис. 19, 20, где точками нанесены соответствующие экспериментальные кривые релаксации. Наблюдается (рис. 19, 20) хорошее совпадение экспериментальных и расчетных результатов.

ВЫВОДЫ

1. Предложен экспериментальный метод и создано экспериментальное оборудование, позволяющие изучить тепловое деформирование стеклопластиков в условиях переменной во времени высокой температуры, изменяющейся по закону, имеющему место при реальной эксплуатации.

2. Построена дифференциальная математическая модель теплового деформирования, позволяющая производить расчет тепловой деформации при произвольном законе изменения высокой температуры, и предложена методика определения ее коэффициентов.

3. Предложен метод построения математической модели ползучести стеклопластиков при переменной во времени высокой температуре и разработан метод экспериментального определения параметров этой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунаков В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.П. и др. Армированные пластики. М.: Изд-во МАИ, 1997. 404 с.
2. Звонарев В.Д., Первушин Ю.С., Павлов В.П. Исследование теплового деформирования полимерных композиционных материалов на основе фенол-формальдегидного связующего / МВССО РСФСР. Уфимск. авиац. ин-т им. Орджоникидзе. Уфа, 1982. 9 с.; ил. Библиогр.: 2 назв. Деп. в ВИНТИ 05.04.82, № 2781-82 Деп.
3. Звонарев В.Д., Смирнов М.А. Релаксация напряжений в полимерном композиционном материале при повышенных температурах // Концентрация напряжений в элементах авиационных двигателей: Межвуз. науч. сб. / Уфимск. авиац. ин-т им. Орджоникидзе. 1986. Вып. 4. С. 35-39.
4. Павлов В.П. Математическая модель механического состояния стеклопластиков при высоких температурах // Механика и прочность авиационных конструкций: Сб. док. конф. Уфа: УГАТУ, 2001. С. 195-200.
5. Павлов В.П. Метод сплайнов и другие численные методы решения одномерных задач механики деформируемых твердых тел. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2003. 197 с.
6. Павлов В.П. Ползучесть полимерных композиционных материалов при переменных по-

вышенным температурах // Экспериментальные исследования и математическое моделирование. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2004. 154 с.

7. Павлов В.П., Первушин Ю.С., Звонарев В.Д. Математическая модель теплового деформирования теплозащитного материала // Механика деформируемых тел и конструкций: Межвуз. науч. сб. Уфа, 1998. С. 9-15.
8. Первушин Ю.С., Звонарев В.Д., Приймак О.В. Ползучесть термоструктурно-нестабильных композиционных материалов при нестационарных температурных воздействиях // Прочность элементов авиационных конструкций: Межвуз. науч. сб. / Уфимск. авиац. ин-т им. Орджоникидзе. Уфа, 1987. Вып. 1. С. 98-104.
9. Первушин Ю.С., Павлов В.П., Звонарев В.Д. и др. Установка для механических испытаний неметаллических материалов при интенсивном высокотемпературном нагреве // Заводская лаборатория. 1979. № 7. С. 673-675.

ОБ АВТОРЕ

Павлов Виктор Павлович, доцент каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям. (УАИ, 1973). Канд. техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (ЧГТУ, 1979). Иссл. в обл. механики полимерных композиционных материалов.

