

УДК 539.374:519.8

Ю. С. ПЕРВУШИН

## ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМОСТРУКТУРНО-НЕСТАБИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Представлены результаты экспериментальных исследований кинетики температурных напряжений в моделях теплозащитных покрытий и термодформационных свойств термоструктурно-нестабильных композиционных материалов при высокоинтенсивных тепловых воздействиях. Предложена математическая модель связи между напряжением, деформацией и временем для теплозащитного материала при нестационарных температурах. *Композиционные материалы; теплозащитные материалы; кинетика температурных напряжений*

Композиционные волокнистые полимерные материалы (стеклопластики, углепластики и др.) во многих случаях являются единственно возможными в настоящее время материалами, способными выдерживать интенсивные тепловые воздействия, характерные для элементов теплозащиты летательных аппаратов. Низкая теплопроводность, высокое поглощение тепла при физико-химических превращениях матричного материала способствуют замедлению проникновения тепла к защищаемому объекту.

Традиционные исследования физико-механических свойств композиционных материалов проводят в стационарных условиях температурного и силового нагружения. Получаемые характеристики дают нам необходимую информацию об исследуемых материалах. Однако они применимы для анализа работы только в изотермических условиях и условиях медленного нагрева, при которых сохраняется структурная стабильность. Физико-химические процессы, протекающие в теплозащите, их зависимость от всей предыстории теплового воздействия (температуры, скорости, времени нагрева и др.) предопределили использование экспериментальных методов, позволяющих изучить основные деформационные характеристики термоструктурно-нестабильных композиционных материалов, для оценки изменения характеристик прочности. Тепловое воздействие представляет один из основных факторов, определяющих несущую способность композиционных материалов [1].

В условиях нестационарных тепловых воздействий, вызывающих физико-химические процессы и структурные изменения в композиционных материалах, температурно-временные деформационные закономерности изучены недостаточно.

В статье приводятся результаты исследования и выявленные закономерности деформативных свойств теплозащитных гибридных стекло-капроновых композиционных материалов при высокоинтенсивных тепловых воздействиях. Объекты исследования — композиционные материалы:

КТАН — на основе кремнеземно-капронового трикотажа (50% кремнезема, 50% капрона) и фенолформальдегидного связующего;

КВТАН — на основе кварцево-капронового трикотажа (50% кварцевой нити, 50% капрона) и фенолформальдегидного связующего;

ПКТ — прошивное кремнеземно-капроновое полотно.

Кинетика тепловых усилий и, соответственно, температурных напряжений в элементах конструкций теплозащиты существенно образом зависит не только от температуры, скорости тепловых воздействий, величины тепловых деформаций, но и от реологических свойств материала теплозащиты.

Все процессы в теплозащите протекают при нестационарных температурах в условиях деструкции, карбонизации и фазовых превращений. Естественно, представляет интерес исследование влияния реологических свойств на величину напряжений в указанных условиях. Эти исследования позволяют



определить интервалы температур и времени (при известном режиме нагрева и охлаждения), когда появляются температурные напряжения, и влияние на них деструкции, реологических процессов, усадки и карбонизации связующего.

Таким образом, мы имеем возможность проследить за кинетикой температурных напряжений во всем диапазоне заданного режима нагрева и охлаждения.

Указанные опыты проводились на плоских образцах из материала ПКТ, вырезанных в направлении основы. Образец, помещенный в нагревательное устройство, устанавливался в испытательную машину Е-100, позволяющую проводить измерение усилий при постоянной деформации. Нагрев осуществлялся со скоростью 1 К/с, обеспечивая при этом однородное поле как по толщине, так и по длине рабочей части образца [2].

На рис. 1 представлена термомеханическая кривая, характеризующая кинетику температурных напряжений при нестационарном нагреве. В диапазоне температур, при которых не наблюдаются деструкции и фазовые переходы, имеют место сжимающие напряжения. Далее происходит удаление из материала влаги, появление дополнительных поперечных сшивок и деструкция. Указанные процессы вызывают изменение объема и деформацию «усадки». На кривой эти явления вызывают уменьшение сжимающих напряжений и появление растягивающих напряжений.

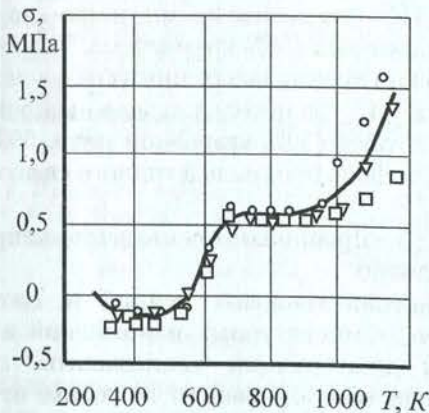


Рис. 1. Зависимость напряжений в плоском образце при нестационарном нагреве с  $V = 1$  К/с и постоянной деформации

В интервале 573–673 К интенсивность растягивающих напряжений возрастает. При 673–773 К поведение кривой существенно изменяется. Наблюдается почти горизонтальная площадка, которая говорит о том, что скорость роста напряжений за счет тепловых

«усадочных» деформаций равна скорости падения за счет релаксации. При температурах выше 773 К рост напряжений увеличивается. Зависимость имеет ярко выраженный экспоненциальный характер и говорит о значительном превалировании «усадочных» напряжений над релаксацией.

Полученные результаты были дополнены опытами на релаксацию при постоянных температурах (рис. 2). В этом случае исследуемый объект рассматривается как материал с переменными во времени свойствами. Испытания проводились при постоянных температурах 293, 373, 473, 573, 673, 773, 873, 1073 К. Скорость нагружения образцов составляла 45 мм/мин, обеспечивая достаточно малый период нагружения по сравнению со скоростью процесса релаксации. Время наблюдения составило 300 с.

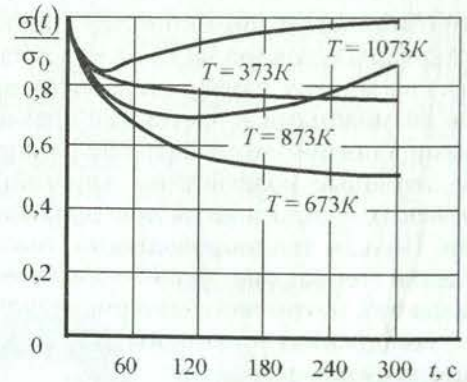


Рис. 2. Зависимость напряжений от времени при постоянной деформации и различных постоянных температурах

Характер графиков показывает, что при температурах, при которых в материале отсутствуют структурные превращения, реологические свойства изменяются плавно, усиливаясь с повышением температуры. В диапазоне температур 573 К процесс релаксации существенно замедляется и наблюдается относительное увеличение напряжений. Причинами являются появление «усадочных» напряжений, вызванных удалением влаги из композита, дополнительная сшивка поперечных связей и начало деструкции. При переходе к температуре 673 К наблюдается значительное превалирование процессов релаксации над напряжениями, вызванными «усадочными» деформациями. При температурах 773 и 873 К снова начинают появляться «усадочные» напряжения. Процессы, обусловленные деструкцией, значительно активизируются при температурах 1073 К и, несмотря на



значительную начальную скорость релаксации, кривая изменения напряжений после 30 секунд наблюдения характеризует значительный рост напряжений.

#### Влияние напряжений на деформативные свойства композиционных материалов при нестационарных тепловых воздействиях

Деформации деструктурирующихся композиционных материалов при одноосном нагружении и нестационарном тепловом воздействии в каждый момент времени определяются не только значениями напряжений, времени, накопленной деформацией, температурой и ее скоростью, но и структурно-фазовым состоянием материала в данный момент.

Понятие о структурно-фазовом состоянии связано с физико-химическими превращениями, протекающими в материале тепловозащиты при тепловых воздействиях. К ним относятся деструкция и происходящее одновременно структурирование, образование новых соединений, карбонизация, фазовые превращения, которые в свою очередь зависят от всей предыстории теплового воздействия, среды испытания. В качестве параметров, характеризующих структурное состояние, могут быть степень незавершенности структурно-фазовых превращений, степень теплового повреждения, изменение плотности, данные рентгеноструктурного анализа и др. Естественно записать сделанное утверждение в виде

$$\varepsilon = F(E, \nu, G, \theta, \sigma, T, t, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — деформация;  $E, \nu, G$  — упругие характеристики (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига соответственно);  $\theta$  — тепловая деформация, включающая деформации, вызванные коэффициентом линейного расширения и структурно-фазовыми превращениями;  $\sigma, T, t$  — напряжение, температура и время;  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — структурные параметры, которым можно приписать определенный физический смысл.

Все физические характеристики являются функциями второй группы параметров. К уравнению (1) следует добавить кинетические дифференциальные уравнения, описывающие изменение структурных параметров  $q_s$ ,

$$\dot{q}_s = \varphi_i(T, t, q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (2)$$

Явная зависимость от времени функции  $\varphi_i$  отражает наличие структурно-фазовых пре-

вращений, которые происходят во времени независимо от процесса деформирования.

Определение функций, входящих в уравнение (1), и построение функциональной зависимости при нестационарных тепловых воздействиях и структурно-фазовых превращениях оказывается чрезвычайно сложным делом, требующим применения статистических методов и большого числа экспериментов. Это приводит к громоздким математическим выражениям, практически неподдающимся на современном уровне анализу и расчету. Поэтому наиболее реальным путем является полуэмпирический метод, заключающийся в том, что установление зависимости (1) для рассматриваемого слоя производится для режима, который он испытывает в реальных условиях. В этом случае учитываются влияние структурно-фазовых превращений, нестационарность и предыстория тепловых воздействий на физические параметры, входящие в уравнение.

Полная деформация  $\varepsilon$  состоит из трех составляющих

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n + \theta, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_y, \varepsilon_n$  — соответственно упругая деформация и деформация ползучести;  $\theta$  — тепловая деформация, состоящая из теплового расширения и «усадки», вызванной деструкцией, карбонизацией и фазовыми превращениями.

Естественно, что деформация  $\varepsilon - \theta = \varepsilon_\sigma$  может быть представлена в виде

$$\dot{\varepsilon}_\sigma = f(E, \nu, G, \sigma, \varepsilon_\sigma, T, t, q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (4)$$

Установление зависимости (4) от указанных параметров при сложных законах теплового нагружения и физико-химических превращениях представляет задачу труднореализуемую. Предлагается следующий путь учета предыстории теплового воздействия и фазовых превращений. Устанавливается зависимость (4) для заданного режима изменения температуры от времени. В этом случае относительная деформация будет функцией только напряжения, времени и накопленной деформации

$$\dot{\varepsilon}_\sigma = \psi(\sigma, \varepsilon_\sigma, t). \quad (5)$$

Здесь учитывается вся предыстория теплового воздействия, деструкция, карбонизация, фазовые превращения, которые протекают в материале.



Выбор модели и зависимости при сложном тепловом нагружении зависит от степени проявления нелинейных свойств [3].

Ниже приводятся результаты исследования на ползучесть материала КТАН при нестационарном тепловом воздействии по режиму  $I$ , представленному на рис. 3, материала КВТАН при скоростях нагрева  $V = 1$  К/с.

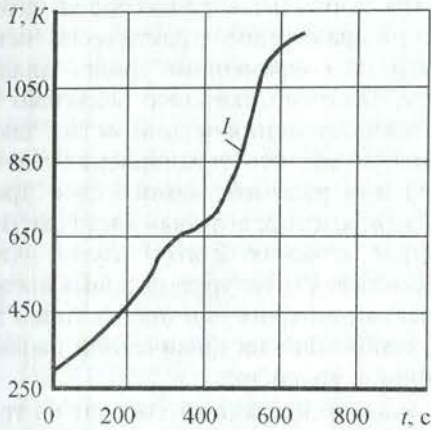


Рис. 3. Режим нагрева образцов из материала КТАН

Испытания проводились на плоских образцах с размерами  $250 \times 15 \times 2$  мм, вырезанных вдоль основы ( $\varphi = 0$ ).

На рис. 4 представлены временные термо-механические зависимости деформаций материала КТАН при режиме нагрева  $I$  и напряжениях 0,1; 0,075; 0,05 МПа. На том же рисунке приведена кривая тепловой деформации при том же режиме.

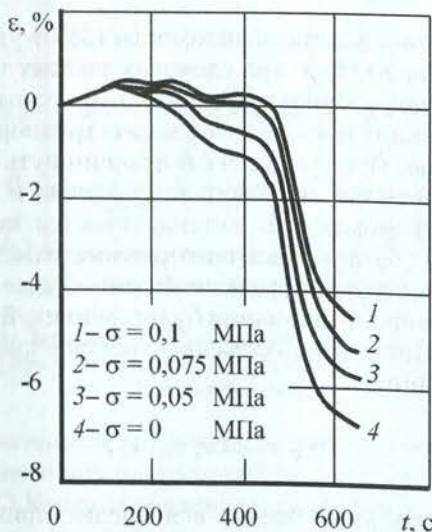


Рис. 4. Зависимости деформаций материала КТАН при режиме нагрева  $I$  и различных напряжениях ( $\varphi = 0$ )

Как показали результаты испытаний, растягивающие напряжения существенно влияют на величину общей деформации, которая обуславливается как тепловой деформацией, так и деформацией ползучести, вызванной действием напряжений. Растягивающие напряжения уменьшают действие усадочных деформаций, а при определенных напряжениях, величина которых зависит от материала теплозащиты и режима нагрева, термо-механические кривые располагаются выше оси абсцисс в течение всего времени теплового воздействия.

Таким образом, чтобы построить кривые ползучести при заданных режимах нагрева, необходимо из общей деформации вычесть тепловую, определенную при тех же режимах теплового воздействия.

На рис. 5 представлены кривые ползучести при указанных напряжениях. На основании полученных зависимостей рассчитывались значения податливостей  $\varepsilon_{\sigma}/\sigma$  для всех трех уровней напряжений. Результаты расчета показаны на рис. 6.

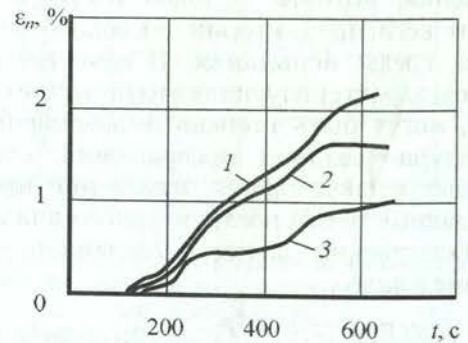


Рис. 5. Кривые неизоотермической ползучести материала КТАН при режиме нагрева  $I$  и различных напряжениях: 1 —  $\sigma = 0,1$  МПа; 2 —  $\sigma = 0,075$  МПа; 3 —  $\sigma = 0,05$  МПа

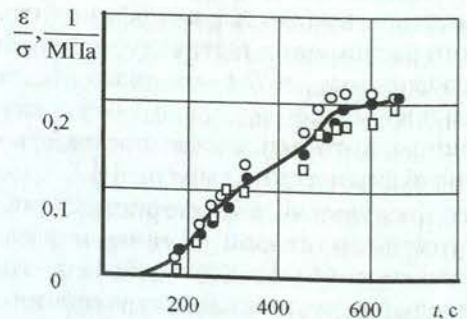


Рис. 6. Кривая податливости материала КТАН при режиме нагрева  $I$

Как видно из рисунка, значения податливостей достаточно плотно ложатся около некоторой средней кривой. Следовательно,



полученные кривые ползучести в исследованном диапазоне напряжений и времени с достаточной для инженерных расчетов точностью можно описать одной обобщенной кривой податливости.

Дополнительно к вышеприведенному были проведены эксперименты по ступенчатому нагружению и разгрузке, которые подтвердили сделанные выше выводы. Результаты ступенчатых нагружений и разгрузок при заданном выше режиме нагрева показаны на рис. 7.

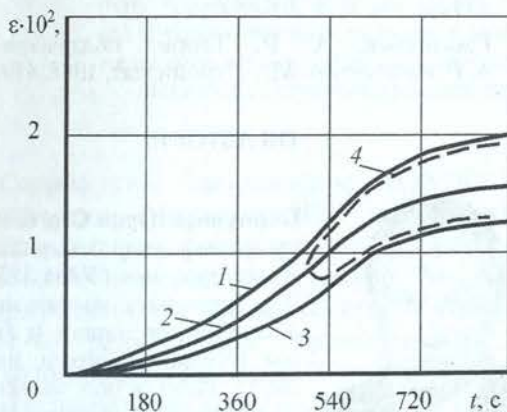


Рис. 7. Кривые ползучести при ступенчатом нагружении материала КТАН при заданном режиме теплового воздействия: 1 —  $\sigma = 0,1$  МПа; 2 —  $\sigma = 0,08$  МПа; 3 —  $\sigma = 0,06$  МПа; 4 (пунктирная линия) — ступенчатые нагружения по режимам:  $\sigma = 0,08 \leftrightarrow 0,1$  МПа

Аналогичные исследования были проведены для материала КВТАН, результаты которых приведены на рис. 8–10.

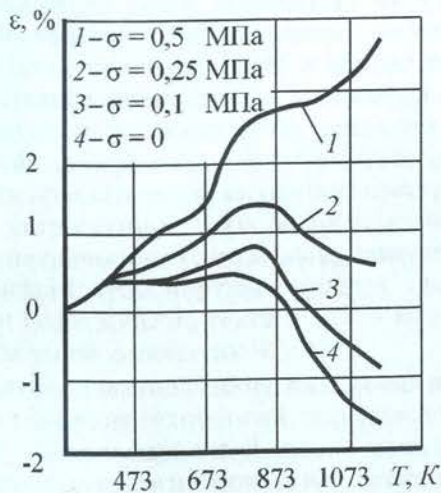


Рис. 8. Зависимости деформаций материала КВТАН при различных растягивающих напряжениях

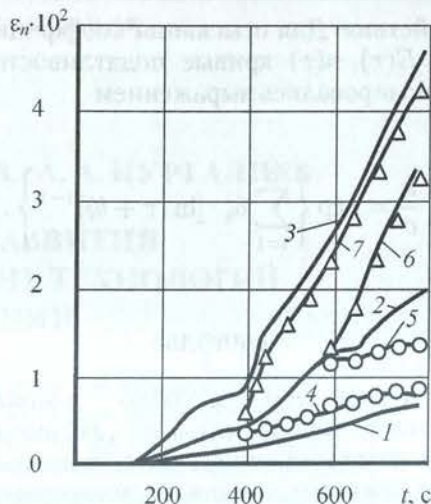


Рис. 9. Кривые ползучести материала КВТАН при  $V = 1$  К/с: 1 —  $\sigma = 0,1$  МПа; 2 —  $\sigma = 0,25$  МПа; 3 —  $\sigma = 0,5$  МПа. При температурах 673 и 873 К производилась ступенчатая разгрузка с  $\sigma = 0,25$  МПа до 0,1 МПа (кривые 4, 5) и нагружение с  $\sigma = 0,25$  МПа до 0,5 МПа (кривые 6, 7). Точки — расчет

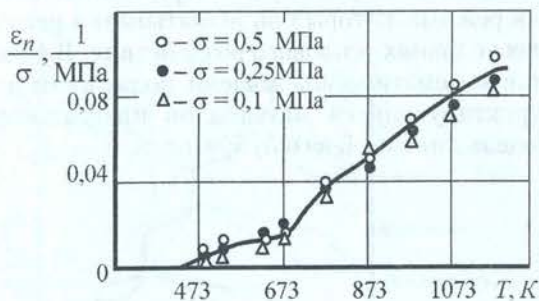


Рис. 10. Кривая податливости материала КВТАН при скорости нагрева  $V = 1$  К/с

Таким образом, в качестве математической модели, описывающей связь между напряжением, деформацией и временем теплозащитного материала при нестационарных температурах, может быть принята модель линейной вязкоупругости для структурно-нестабильного материала в виде [4]

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E(t)} \left[ \sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) K(t, \tau) d\tau \right],$$

где

$$K(t, \tau) = \frac{E(\tau) - H(\tau) + n(\tau) \cdot E(\tau)}{n(\tau) \cdot E^2(\tau)} E(t) \times \exp \left\{ - \int_{\tau}^t \frac{H(\tau) d\tau}{E(\tau) n(\tau)} \right\}.$$

Коэффициенты  $H(\tau)$ ,  $E(\tau)$ ,  $n(\tau)$  являются функциями только времени теплового

воздействия. Для отыскания коэффициентов  $H(\tau)$ ,  $E(\tau)$ ,  $n(\tau)$  кривые податливостей аппроксимировались выражением

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = \exp \left\{ \sum_{i=1}^N a_i \cdot [\ln(\tau + b)]^{i-1} \right\}.$$

### ВЫВОДЫ

Кинетика температурных напряжений в элементе конструкции из деструктурирующихся композиционных материалов определяется режимом нагрева, физико-химическими процессами в композите и его реологическими свойствами.

Одним из путей учета влияния физико-химических процессов на деформативные свойства деструктурирующихся материалов предлагается путь, заключающийся в установлении зависимости (1) для рассматриваемого слоя для режима, который он испытывает в реальных условиях теплового воздействия. В качестве математической модели ползучести деструктурирующихся материалов предлагается модель линейной вязкоупругости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Третьяченко, Г. Н.** Термическое деформирование неметаллических деструктурирующих материалов / Г. Н. Третьяченко, Л. И. Грачева. Киев: Наук. думка, 1983. 248 с.
2. **Первушин, Ю. С.** Усталовка для механических испытаний неметаллических материалов при интенсивном нагреве / Ю. С. Первушин, Г. Г. Бондарь [и др.] // Заводская лаборатория. 1979. Т. 45, № 7. С. 673–675.
3. **Арутюнян, Н. Х.** Механика растущих вязкоупругоэластических тел / Н. Х. Арутюнян, А. Д. Дроздов, В. Э. Наумов. М.: Наука, 1987. 472 с.
4. **Ржаницын, А. Р.** Теория ползучести / А. Р. Ржаницын. М.: Стройиздат, 1968. 419 с.

### ОБ АВТОРЕ



**Первушин Юрий Сергеевич**, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по динамике и прочности машин и аппаратов (Челяб. политехн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. мех-ки и термомех-ки композиц. материалов, термопластичных композитов.