

электронагреватели (с использованием контроллера температурного регулирования).

Заключение. Анализ российских разработок СОТР малых космических аппаратов показал, что газожидкостные системы теплового режима с применением тепловых труб используются при внутреннем максимальном тепловыделении аппаратуры до 450 Вт. Возможно применение пассивных средств терморегулирования с контурными тепловыми трубами и системой электронагревателей.

В частности, для Российского опытно-технологического малого космического аппарата «АИСТ-2Д» система СОТР построена на использовании сотовых панелей с тепловыми трубами, отводящими тепловые потоки от бортовой аппаратуры, и контурными тепловыми трубами, выравнивающими температуру между отдельными сотовыми панелями, а также на использовании плёночных электронагревателей, управляемых контроллером теплового режима (КТР).

Список использованных источников

1. Куренков, В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика: учебное пособие. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. – 461 с.
2. Колесников А.В., Палешкин А.В. Тепловое проектирование космических аппаратов: учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 96 с.

УДК 539.3

К.Т. Аунг, А.М. Думанский

РАСЧЕТ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

Введение. Углепластики находят широкое применение в авиационной и космической промышленности, благодаря высокой прочности, жёсткости и низкой массе. Ориентация слоёв однонаправленных углепластиков, задаваемая углами армирования, определяет эксплуатационные характеристики материала: жёсткость, прочность и ресурс долговечности.

Однако прогнозирование долгосрочной надёжности таких материалов требует детального анализа временных эффектов, среди которых доминирует ползучесть.

Постановка задачи и метод решения. При выраженной анизотропии углепластиков, особенно при нагружении под углами, отклоняющимися от направления армирования, могут быть использованы соотношения теории вязкоупругости или наследственной механики твёрдых тел [1].

В работе [2] предложены модели ползучести для термопластичных углепластиков *AS4/PEEK* с использованием однопараметрического потенциала, аппроксимирующего анизотропное поведение через мастер-кривые. Экспериментальные исследования по ползучести при растяжении образцов из углепластика *T800H/3631* с различными ориентациями слоёв приведены в [3], однако авторы не рассматривали зависимость деформаций от угла приложения нагрузки. В исследовании [4] на основе вязкопластичных моделей изучена ползучесть углепластика *T800H/3631* при отклонении направления нагружения от оси армирования.

Следует отметить, что поведение углепластиков при ползучести существенно зависит от уровня приложенных напряжений. Как демонстрируют исследования, анализ кривых напряжение-деформация, полученных при квазистатическом нагружении, позволяет выделить линейную область и нелинейную область. В данной работе были использованы экспериментальные данные, полученные из кривых ползучести и релаксации образцов однонаправленного углепластика *T800H/3631*, представленных в работе [4].

В данной работе выполнен расчёт для оценки механических свойств однонаправленного углепластика *T800H/3601-6* при нагружении под углом к направлению армирования.

Построение определяющего соотношения. Уравнение зависимости модуля ортотропного тела от угла (θ) между направлением армирования и направлением действия нагрузки из теории анизотропной упругости выглядит следующим образом [5]:

$$E_{\theta} = \frac{E_1}{c^4 + [(E_1/G_{12}) - 2\nu_{12}]c^2s^2 + (E_1/E_2)s^4}, \quad (1)$$

где $c = \cos \theta$, $s = \sin \theta$; E_1, E_2 – модули упругости в направлении армирования и поперёк соответственно; G_{12} – модуль сдвига.

Предыдущие исследования показывают, что в направлении армирования временные эффекты пренебрежимо малы.

В соответствии с принципом Вольтерра, операторное выражение для модуля упругости с свойствами, изменяющимися во времени, можно записать в следующем виде [1]:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E^0} (1 + kI_\alpha^*), \quad (2)$$

где E^0 – мгновенный модуль, I_α^* – наследственный оператор, k – параметр.

С использованием условия подобия наследственных операторов, операторное выражение для модуля, учитывающего изменение свойств анизотропии во времени, можно записать так:

$$E_\theta^* = \frac{E_1}{c^4 + \left[\frac{E_1}{G_{12}^0} (1 + k_{12} I_\alpha^*) - 2\nu_{12} \right] c^2 s^2 + \frac{E_1}{E_2^0} (1 + k_2 I_\alpha^*) s^4}, \quad (3)$$

После преобразований получено уравнение:

$$E_\theta^* = \frac{E_1}{1 + (B_\theta / A_\theta) I_\alpha^*}, \quad (4)$$

где
$$A_\theta = c^4 + \left[(E_1 / G_{12}^0) - 2\nu_{12} \right] c^2 s^2 + (E_1 / E_2^0) s^4;$$

$$B_\theta = (E_1 / G_{12}^0) c^2 s^2 \alpha_{12} + (E_1 / E_2^0) s^4 \alpha_2.$$

Определяющее соотношение наследственной упругости в направлении, перпендикулярном армированию, можно написать следующим образом [1]:

$$\varepsilon_2 = 1 / E_2^0 (1 + k_2 I_\alpha^*) \sigma_2,$$

где ε_2 – деформация; σ_2 – напряжение; E_2^0 – мгновенный модуль; I_α^* –

оператор Абеля:
$$I_\alpha^* \sigma = \frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^\alpha \sigma(\tau) d\tau.$$

При ползучести ($\sigma_t = \sigma_0$), тогда определяющее соотношение при направлении под углом 90° можно записать в виде:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2^0} \left(1 + \frac{k_2 t^{1+\alpha}}{\Gamma(2+\alpha)} \right) \sigma_0. \quad (6)$$

Аналогично, определяющие соотношение при направлении под углом 45° можно записать как:

$$\varepsilon_{45} = \frac{1}{E_{45}^0} \left(1 + \frac{k_{45} t^{1+\alpha}}{\Gamma(2+\alpha)} \right) \sigma_0. \quad (7)$$

Результаты. Параметры определяющих соотношений можно определить с помощью метода наименьших квадратов [6]:

$$\min \rightarrow \sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_i^{\text{экс}} - \varepsilon_i^{\text{рас}} \right)^2.$$

Получены параметры: $E_2^0 = 9,7 \text{ ГПа}$, $E_{45}^0 = 12,1 \text{ ГПа}$, $\alpha = -0,85$, $k_2 = 0,75 \text{ час}^{-(1+\alpha)}$, $k_{45} = 0,93 \text{ час}^{-(1+\alpha)}$. С использованием этих параметров были построены расчётные кривые ползучести образцов однонаправленного углепластика под углами $\theta = 90^\circ$ (рис. 1) и $\theta = 45^\circ$ (рис. 2).

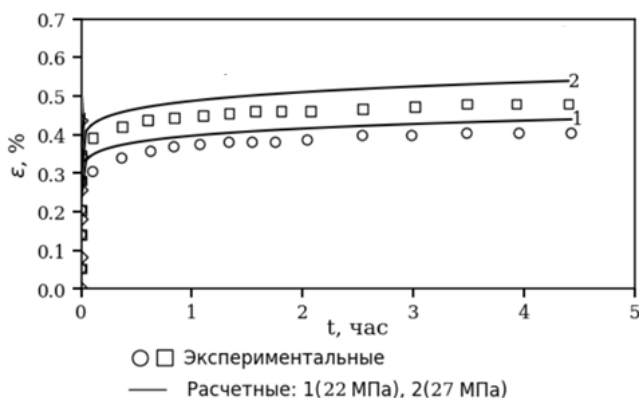


Рис. 1. Кривые ползучести T800N/3631 при $\theta = 90^\circ$

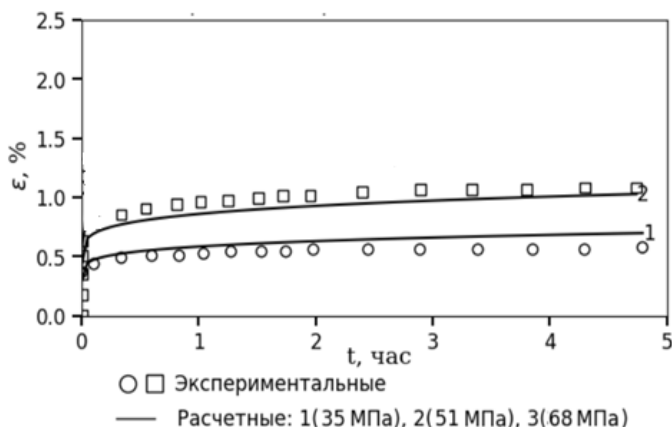


Рис. 2. Кривые ползучести T800H/3631 при $\theta=45^\circ$

С использованием выражений A_0 и B_0 определены G_{12}^0 и k_{12} :

$$\frac{1}{G_{12}^0} = \left[\frac{4}{E_{45}^0} - \frac{1-2\nu}{E_1} - \frac{1}{E_2^0} \right], k_{12} = \frac{G_{12}^0}{E_1} \left[4B_{45} - \frac{E_1}{E_2^0} k_2 \right].$$

Получен мгновенный модуль $G_{12}^0 = 4,43 \text{ ГПа}$ и параметр $k_{12} = 1,02 \text{ час}^{-(1+\alpha)}$ для однонаправленного углепластика T800H/3631.

Закключение. На основе наследственной механики построены определяющие соотношения, описывающие процессы ползучести образцов однонаправленного углепластика, с последующей верификацией их корректности. Параметры модели определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным. Построены кривые ползучести при углах нагружения 45° и 90° относительно направления армирования. Установлено хорошее соответствие между теоретическими расчётами и экспериментальными результатами в линейной области. Проведённые расчёты позволяют оценить механические свойства углепластика T800H/3631.

Список использованных источников

1. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука. 1977, 384 с.

2. Chung I, Sun C.T., Chang I.Y. Modeling creep in thermoplastic composites. J Compos Mater 1993; 27(10). p. 1009-1029.

3. Katouzian M, Bruller OS, Horoschenkoff A. On the effect of temperature on the creep behavior of neat and carbon fiber reinforced PEEK and epoxy resin. J Compos Mater 1995; 29(3):372-387.

4. Kawai M. Off-axis creep behavior of unidirectional polymer matrix composites at high temperature. In: Proceedings of the UTAM Symposium on Creep in Structures; 2001. p. 469-478.

5. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука. 1977, 416 с.

6. Каханер, Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М.: Мир. 1998, 575 с.

УДК 629.7.024

Вай Ян У, К.В. Михайловский

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕГКОГО САМОЛЕТА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТ СТОЛКНОВЕНИЯ С ПТИЦЕЙ

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в авиационной промышленности с середины XX века благодаря высокой удельной прочности, жёсткости и низкой массе. В условиях эксплуатации лёгкие спортивные самолёты подвергаются воздействию различных внешних факторов, включая столкновения с птицами на высоких скоростях. Такие удары представляют серьёзную угрозу целостности конструктивных элементов, особенно выполненных из тонкостенных панелей из ПКМ. Как правило, удар птицы носит импульсный характер и длится доли миллисекунды, однако создаёт высокие локальные нагрузки, способные вызвать внутренние разрушения материала и привести к потере несущей способности.

Постановка задачи и метод решения. Объектом исследования в данной работе являются панели из ПКМ. Геометрические размеры панели составляют: длина – 750 мм, ширина – 750 мм [5].