

УДК678; 541.12

DOI 10.47367/0021-3497_2023_6_236

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ
С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОЛОКНИСТОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА
ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОЙ СУПЕРПОЗИЦИИ***

**STUDY OF CREEP CHARACTERISTICS OF LONG-TERM FIBROUS
REINFORCING COMPOSITE MATERIAL
USING THE TIME-TEMPERATURE SUPERPOSITION PRINCIPLE**

И.В. ОБВЕРТКИН, К.А. ПАСЕЧНИК, С.Ю. ВОРОНИНА

I.V. OBVERTKIN, K.A. PASECHNIK, S.YU. VORONINA

(Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева)

(Reshetnev Siberian State University of Science and Technology)

E-mail: 79632609742@yandex.ru

В настоящее время все чаще в космических конструкциях, таких как солнечные батареи, крупногабаритные рефлекторы антенн, используются упруго-трансформируемые элементы, выполненные из волокнистых композиционных материалов, благодаря их высокой удельной прочности и жесткости, а также бистабильности. В работе представлены результаты прогнозирования длительной ползучести волокнистого композиционного материала. Для получения данных применялся принцип суперпозиции время-температура. Представленные данные могут быть использованы при проектировании упруго-трансформируемых конструкций и оценке длительности воздействия постоянной нагрузки до наступления отказа. Последний может вызываться накоплением критического уровня остаточной деформации при различных температурах. В работе показано, что повышение температуры приводит к существенному снижению времени накопления критического уровня деформации.

Fiber-reinforced composite materials are increasingly used in deployable space structures, such as solar panels, large-sized antenna reflectors. Due to their high specific strength and rigidity, as well as bistability. The paper presents the results of prediction the long-term creep of a fiber-reinforced composite material using the

*Работа выполнена НЛ ЦПТК в рамках программы стратегического академического лидерства "Приоритет-2030" СибГУ им. М.Ф. Решетнева.

time-temperature superposition principle, the data obtained can be used in designing transformable structures and estimating the duration of exposure to a constant load before refusal. It may be caused by the accumulation of a critical level of residual deformation at various temperatures. The paper shows that an increase in temperature leads to a significant decrease in the time of accumulation of the critical level of deformation.

Ключевые слова: ползучесть, волокнистый композиционный материал, углеродные волокна, принцип суперпозиции.

Keywords: creep, fiber-reinforced composite material, carbon fiber, time-temperature superposition principle.

Композиционные материалы с полимерной матрицей и армирующими волокнами привлекательны для многих применений в аэрокосмической промышленности, поскольку их использование позволяет улучшить характеристики упруго-трансформируемых конструкций благодаря высокой удельной жесткости и большой кривизне при складывании, а для космических миссий имеет огромное значение минимальная масса и высокая эффективность складывания в транспортном положении [1]. Развертывание упруго-трансформируемых конструкций происходит благодаря высвобождению упругой энергии, накопленной на этапе перевода в транспортное (сложенное) положение [3]. Однако в процессе длительного хранения в транспортном положении за счет вязкоупругого поведения полимера со временем накопленная упругая энергия рассеивается, и накапливается деформация, которая приводит к снижению характеристик изделия или потенциальному отказу [5, 6]. Полимеры или композиционные материалы на их основе демонстрируют различное сопротивление ползучести. Экспериментальное исследование ползучести композиционного материала при уровнях напряжений, возникающих в процессе складывания конструкции, является актуальной задачей при проектировании упруго-трансформируемых конструкций, к которым предъявляются высокие требования к сохранению геометрических параметров изделия после длительного хранения в сложенном положении. Используя принцип температурно-временной суперпозиции, в данной работе провели оценку долговременной ползучести матери-

ала в условиях постоянного уровня напряжений, поскольку длительность хранения упруго-трансформируемых крупногабаритных конструкций может достигать десятков лет. Принцип суперпозиции время-температура первоначально был разработан для прогнозирования свойств полимеров, однако применим и для композиционных материалов [7].

Ввиду того, что при повышении температуры ползучесть полимеров значительно повышается, нельзя пренебрегать возможным увеличением температуры во время хранения или транспортировки в сложенном состоянии, а также влиянием температуры на сохраняемость геометрических параметров изделия после длительного хранения в сложенном состоянии.

Целью настоящей работы является прогнозирование длительной ползучести волокнистого композиционного материала и влияния температуры хранения на время накопления критического уровня деформации.

При построении кривых ползучести в работе использована податливость $S(t)$, которая определяется как отношение деформации $\varepsilon(t)$ к напряжению σ [2]:

$$S(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}. \quad (1)$$

В данной работе изучалась длительная ползучесть полимерного композиционного материала на основе SPREAD углеродных волокон при помощи принципа температурно-временной суперпозиции. Проведена оценка увеличения податливости композиционного материала в процессе хранения в сложенном состоянии, а также величины

остаточной деформации после снятия нагрузки в зависимости от уровня напряжения и температуры.

В качестве армирующего материала в работе использовалась однонаправленная углеродная лента Т30 с поверхностной плотностью 30 ± 3 г/м², изготовленная на основе волокна Т700SC 12 К с модулем упругости 235 ± 15 ГПа и прочностью при растяжении ≥ 4500 МПа. В качестве полимерной матрицы композиционного материала использовалось эпоксидное связующее Т-26 компании АО «ИНУМиТ».

Для определения температуры стеклования использовался динамический механический анализатор DMAQ800 производства TA Instrument. Испытание проводилось с частотами нагружения, равными 1, 2, 3, 5, 7 и 10 Гц, при относительной деформации 0,1 %, в диапазоне температур от 30 до 250 °С при постоянной скорости нагрева 2 °С/мин в среде воздуха с использованием оснастки для трехточечного изгиба. Для создания кривых ползучести использовались два режима постоянного напряжения с постоянной силой, равной 1,6863 и 8,8648 Н. Образец нагружался в течение одного часа и затем восстанавливался в течение такого же времени. Данный шаг режима измерения выполнялся в изотермическом режиме с последующим нагревом на 5 °С и повторением цикла нагружения/восстановления. Измерения проводились в диапазоне от 35 до 120 °С.

Образец был изготовлен методом вакуумной инфузии. Режим отверждения – нагрев до 180 °С со скоростью 2 °С в минуту с последующей выдержкой в течение 3 часов. Постотверждение проводили при 180 °С в течение 6 часов.

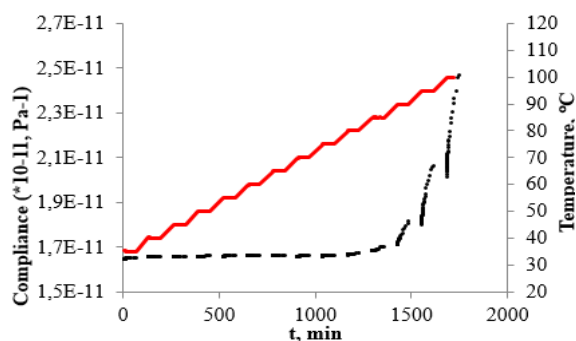


Рис. 1

На рис. 1 представлены кривые ползучести композиционного материала в диапазоне температур от 35 до 120 °С при постоянной силе нагружения, равной 1,6863 Н. Разрывы на графике отображают режим восстановления.

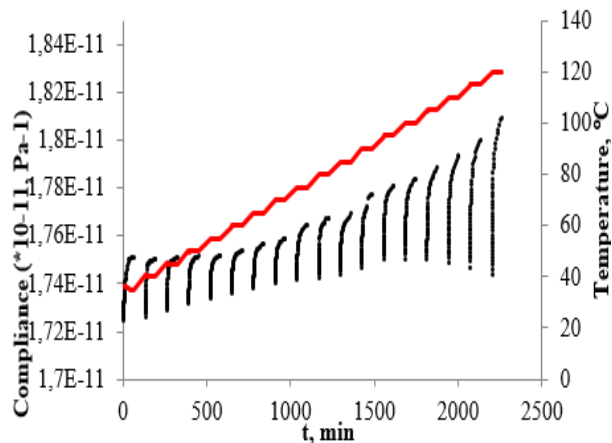


Рис. 2

Для оценки долговременной ползучести построена смещенная кривая ползучести (рис. 2). В работе для этого использован принцип температурно-временной суперпозиции, согласно которому повышение температуры эквивалентно увеличению времени нагружения на коэффициент сдвига. С помощью указанного метода кратковременные испытания на ползучесть в диапазоне температур могут использоваться для получения данных по долговременной ползучести композиционного материала. При использовании этого метода кривые ползучести, полученные при изотермических испытаниях, смещаются на коэффициент сдвига $\log(a_T)$ для прогнозирования кривой ползучести при эталонной температуре. Для оценки коэффициента сдвига использовалась энергия активации, определенная исходя из зависимости максимума сигнала тангенса δ композиционного материала от частоты нагружения.

На рис. 3 представлены зависимости тангенса δ композиционного материала от температуры при различных частотах (1, 3 и 5 Гц) в диапазоне температур от 70 до 210 °С (данные представлены в табл. 1).

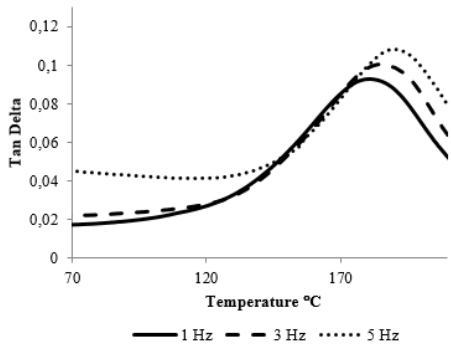


Рис. 3

Результаты свидетельствуют о том, что с увеличением частоты стеклование происходит при более высоких температурах. Далее, используя полученные закономерности, определяют зависимость натурального логарифма частоты от обратной температуры пика тангенса δ , изображенной на графике Аррениуса (рис. 4).

Т а б л и ц а 1

Частота f , Гц	$\ln(f)$	T_g , К	$1000/T_g$
1	0	453,94	2,2029
2	0,6931	459,30	2,1772
3	1,0986	458,10	2,1829
5	1,6094	463,04	2,1596
7	1,9459	463,69	2,1566
10	2,3045	467,10	2,1409

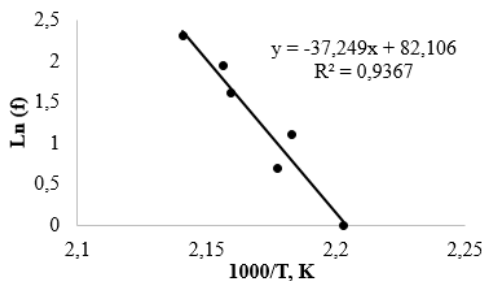


Рис. 4

Энергию активации рассчитывали по уравнению (2) согласно наклону графика зависимости натурального логарифма частоты нагружения $\ln(f)$ от обратной температуры стеклования $1/T_g$ [4]:

$$\Delta H = -R \frac{d(\ln(f))}{d\left(\frac{1}{T_g}\right)}, \quad (2)$$

где R – газовая постоянная.

Используя допущение о постоянстве энергии активации в исследуемом температурном диапазоне, рассчитали коэффициент сдвига согласно уравнению [2]:

$$\log(a_T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \log e, \quad (3)$$

где T_{ref} и T – эталонная температура и температура исследования.

Из уравнения (3) получен коэффициент сдвига. Для построения кривой долговременной ползучести (рис. 5) использованы данные, полученные в диапазоне температур от 35 до 120°C для нагрузки, равной 1,6863 Н, и данные в диапазоне от 35 до 100°C при нагружении 8,8648 Н.

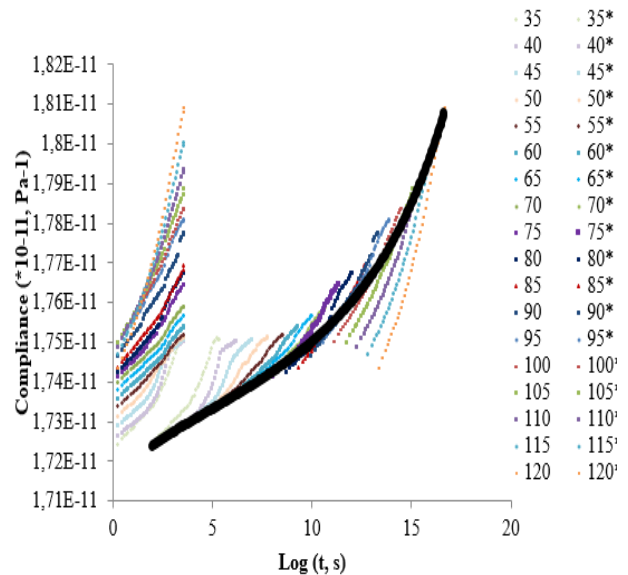


Рис. 5

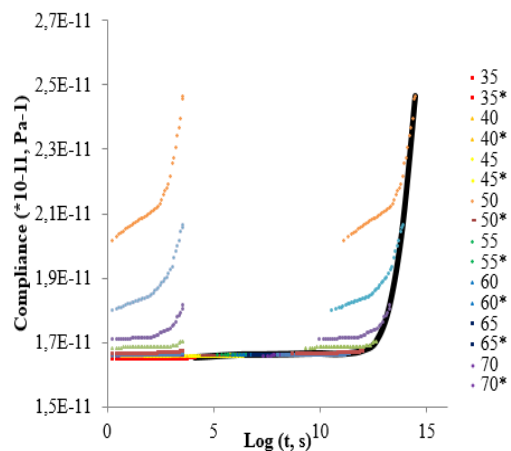


Рис. 6

После снятия нагрузки для каждого шага режима измерения оценено восстановление деформации путем отношения деформации, восстановленной после снятия нагрузки, к перемещению под действием постоянной силы в течение срока нагружения (рис. 6). На основании данных можно прогнозировать допустимый срок хранения изделия из композиционного материала под постоянной нагрузкой, задав допустимый предел остаточной деформации. Используя метод температурно-временной суперпозиции, можно также спрогнозировать, насколько уменьшится срок сохранности изделия при изменении температуры. Для наглядности зададим критерий отказа равным накопленному остаточной деформации 3 %.

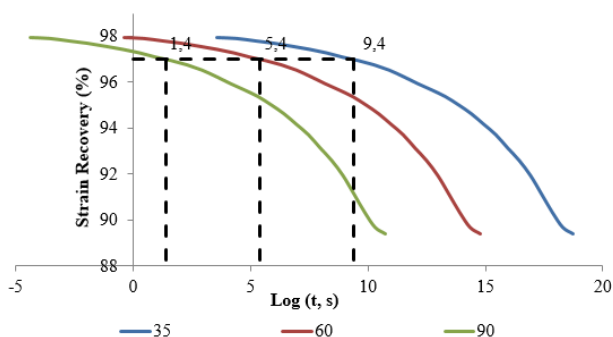


Рис. 7

Как видно на рис. 7, повышение температуры приводит к существенному снижению времени накопления критического уровня деформации. Если при температуре 35 °C время накопления 3 % деформации составляет около 80 лет, то при увеличении до 60 °C этот период сокращается до 3 дней, а при 90 °C составляет около 25 секунд.

ВЫВОДЫ

Количественное исследование ползучести композиционного материала предоставляет необходимые данные при проектировании упруго-трансформируемых конструкций в вопросе допустимого срока хранения. В работе проведено экспериментальное исследование ползучести композиционного материала при уровнях напряжений, возникающих в процессе складывания конструкции. С использованием полученных эксперимен-

тальных данных с помощью принципа температурно-временной суперпозиции оценена ползучесть материала в условиях постоянного уровня напряжений. Произведена оценка зависимости накопленной деформации от времени выдержки при постоянном уровне напряжений. С помощью принципа температурно-временной суперпозиции показано влияние температуры, при которой осуществляется воздействие нагрузки, на ползучесть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kang J.H., Hinkley J.A., Gordon K.L. and etc. Viscoelastic characterization of polymers for deployable composite booms. *Advances in Space Research*. Vol. 67, Is. 9, 2021, P. 2727...2735.
2. Fulmali A.O., Nayak B.A., Dasari S and etc. Effect of 1D carbon nano-tube and fiber reinforcement on the long-term creep performance of glass fiber/epoxy composite using the time-temperature superposition principle. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 47, Part 11, 2021, P. 3263...3268.
3. Hamillage M.Y., Leung C., Kwok K. Viscoelastic modeling and characterization of thin-ply composite laminates. *Composite Structures*. Vol. 280, 2022, 114901.
4. Goertzen W.K., Kessler M.R. Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 421, Issues 1–2, 2006, P. 217...225.
5. Ning A., Jia Q., Jin H. and etc. Multiscale modeling of viscoelastic behavior of unidirectional composite laminates and deployable structures. *Materials & Design*. 2022. Vol. 219. — <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110754>.
6. Алиева З.Х., Джаббарова Г.З., Аллахвердиева И.Ф. Влияние заданных нагрузок на компоненты полной деформации растяжения текстурированной нити типа эластик // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 3(399). С. 76...80.
7. Scott D.W., Lai J.S., Zureick A.H. Creep Behavior of Fiber-Reinforced Polymeric Composites: A Review of the Technical Literature. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1995. 14(6). P. 588...617.

REFERENCES

1. Kang J.H., Hinkley J.A., Gordon K.L. and etc. Viscoelastic characterization of polymers for deployable composite booms. *Advances in Space Research*. Vol. 67, Issue 9, 2021, P. 2727...2735.
2. Fulmali A.O., Nayak B.A., Dasari S and etc. Effect of 1D carbon nano-tube and fiber reinforcement on the long-term creep performance of glass fiber/epoxy composite using the time-temperature superposition prin-

ciple. *Materials Today: Proceedings*. 2021, Vol. 47, Part 11, P. 3263...3268.

3. *Hamillage M.Y., Leung C., Kwok K.* Viscoelastic modeling and characterization of thin-ply composite laminates. *Composite Structures*. 2022, Vol. 280, 114901.

4. *Goertzen W.K., Kessler M.R.* Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2006, Vol. 421, Is. 1–2, P. 217...225.

5. *Ning A., Jia Q., Jin H. and etc.* Multiscale modeling of viscoelastic behavior of unidirectional composite laminates and deployable structures. *Materials & Design*. 2022. Vol. 219. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110754>.

6. *Aliyeva Z.Kh., Dzhabbarova G.Z., Allahverdiyeva I.F.* The influence of given loads on the components of total tension deformation of elastic type textured threads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. No. 3 (399). P. 76...80.

7. *Scott D.W., Lai J.S., Zureick A.H.* Creep Behavior of Fiber-Reinforced Polymeric Composites: A Review of the Technical Literature. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1995. 14 (6). P. 588...617.

Рекомендована научной лабораторией «Интеллектуальные материалы и структуры» СибГУ им. М.В. Решетнева. Поступила 31.03.23.