

УДК 539.5

МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫМ ПЛАСТИКОМ

Каледин В.О.¹, д.т.н., профессор, академик МАН ВШ, заведующий

научно-исследовательской лабораторией математического моделирования (vkaled@mail.ru)

Тагильцев-Галета К.В.², к.т.н., старший преподаватель кафедры автоматизации
и информационных систем (magister463@gmail.com)

Ульянов А.Д.¹, аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории
математического моделирования (zbrg@mail.ru)

¹Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

(654041, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

²Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассматривается зависимость предела прочности при растяжении углепластика со схемой армирования волокнами 45°/0/-45° от максимальной температуры нагрева. Зависимость строится согласно данным натурального эксперимента. Установлена связь между превышением температуры стеклования и пределом прочности образца. Сделан вывод о возможности построения определяющих уравнений для численного моделирования конструкций из полимерных композиционных материалов при совместных силовых и многократных температурных воздействиях, при температурах, незначительно превышающих температуру стеклования.

Ключевые слова: углепластик, предел прочности, растяжение, нагрев, температура стеклования, натуральный эксперимент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-824-826

Волокнистые пластики, армированные высокопрочными и высокомодульными стекло-, базальто- и углеволокнами, находят широкое применение в крупногабаритных конструкциях, в машиностроении, строительстве и металлургии [1 – 3]. Однако высокотемпературные воздействия в процессе эксплуатации требуют оценки изменения физико-механических свойств вследствие температурной деградации материала.

В качестве структуры модели примем обобщенный закон Дюамеля-Неймана [4], параметры которого подаются прямому измерению:

$$\sigma = E(T, \xi) [\varepsilon - \alpha(T, \xi)(T - T_0)], \quad (1)$$

где σ – механическое напряжение; E – текущий модуль упругости; T – текущая температура; ξ – степень деформации; ε – текущая деформация; α – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР).

Разрушение наступает, когда напряжение растяжения (сжатия) вдоль армирующих волокон превышает предел прочности при растяжении $\sigma_{\text{в}}$ или при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$. Условие прочности может быть записано в виде:

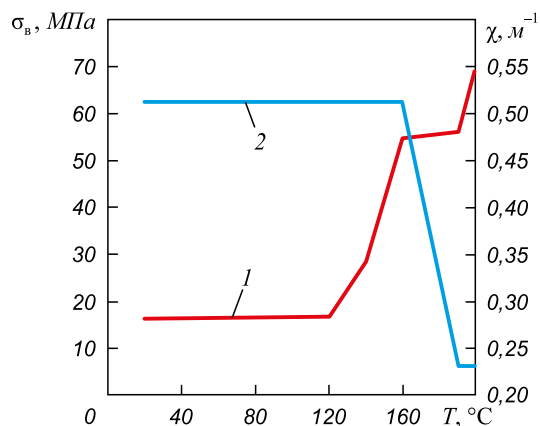
$$-\sigma_{\text{сж}}(T, \xi) \leq E(T, \xi) [\varepsilon - \alpha(T, \xi)(T - T_0)] \leq \sigma_{\text{в}}(T, \xi). \quad (2)$$

Предельные напряжения также являются функциями двух параметров T и ξ .

Особенностью волокнистых пластиков на основе терморезактивных связующих является наличие температуры T_c стеклования, при превышении которой модуль упругости и предел прочности материала КМУ-1 со схемой армирования углеродными волокнами 45°/0/-45° значительно изменяются в узком температурном диапазоне. Таким образом, для построения модели требуются экспериментальные данные о фактическом снижении модуля упругости и предела прочности после нагрева и последующего охлаждения.

Образцы подвергали нагреву до температуры от 100 до 200 °С, который приводит к появлению остаточных деформаций, увеличивающих крутку образца [5, 6]. На рисунке приведена зависимость остаточной деформации кручения и предела прочности от температуры.

Из рисунка видно, что остаточная деформация, представленная кривой 1, остается стабильной вплоть до температуры 120 °С и возрастает в 1,7 раза при достижении величины $T_c = 160$ °С. Измеренные разрушающие напряжения имеют высокий (до 40 %) разброс, что характерно для волокнистых пластиков [7]. Зависимость предела прочности от температуры нагрева представлена на рисунке кривой 2. Существенное снижение (в 10 раз) предела прочности имело место в образцах, температура нагрева которых превышала температуру стеклования.



Зависимость остаточной деформации кручения χ (1) и предела прочности σ_b (2) от температуры

Dependence of residual torsional deformation χ (1) and tensile strength σ_b (2) on temperature

Выводы. При нагреве до температуры стеклования в углепластике на эпоксидном связующем происходят необратимые изменения: увеличиваются остаточные деформации и снижается предел прочности на растяжение. Критерием снижения предела прочности может служить рост остаточной деформации, что может быть использовано при оценке остаточной прочности конструкций после сверхпределных (аварийных) температурных воздействий, в том числе при оценке огнесохранности конструкций из полимерных композиционных материалов. Предлагаемая модель термомеханического поведения позволяет построить определяющие уравнения для численного моделирования конструкций из полимерных композиционных

материалов при совместных силовых и многократных температурных воздействиях [8], при температурах, значительно превышающих температуру стеклования. Дальнейшее увеличение температуры требует дополнительных экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альшиблави К.А., Ярцев В.П. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств композитной пластиковой и металлической арматуры // *Инновации в науке*. 2017. № 6 (67). С. 78 – 81.
2. Страданченко С.Г., Масленников С.А., Прокопов А.Ю., Маштакова К.В., Махонько Я.Ю., Яковлева К.С. К вопросу об использовании полимерных материалов в строительстве подземных сооружений // *Инженерный вестник Дона*. 2015. Т. 37. № 3. С. 95.
3. Karal M. *AST Composite Wing Program – Executive Summary*. NASA/CR-20001-210650, March 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010033249.pdf> (Дата обращения: 25.05.2017 г.).
4. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела: Учеб. пособие для вузов*. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
5. *Термомеханика полимерных материалов в условиях релаксационного перехода* / В.П. Матвеев, О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков. – М.: Физматлит, 2009. – 175 с.
6. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклюющихся телах // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2008. Т. 1. № 1. С. 92 – 108.
7. Мурашов В.В., Мишуев К.С., Сорокин К.В. Оценка прочности углепластиков в монолитных конструкциях при сдвиге и сжатии методами неразрушающего контроля // *Контроль. Диагностика*. 2011. № 10. С. 29 – 34.
8. Каледин В.О., Ульянов А.Д., Каледин Вл.О. Конечный элемент сдвиговой балки Тимошенко с учетом температурных деформаций и выгорания материала // *Научн.-техн. вестник Поволжья*. 2017. № 5. С. 141 – 144.

Поступила 3 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, PP. 824–826.

MODEL OF THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURES REINFORCED BY FIBROUS PLASTIC

V.O. Kaledin¹, K.V. Tagil'tsev-Galeta², A.D. Ul'yannov¹

REFERENCES

¹ Novokuznetsk branch of Kemerovo State University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Dependence of tensile strength of CFR with fiber reinforcement circuit 45°/0/–45° on maximum heating temperature is considered. This dependence is constructed according to the results of field experiment. The relation between excess of glass transition temperature and ultimate strength of the sample was established. It was concluded that it is possible to make equilibrium equations for numerical modeling of structures made of polymer composite materials under joint force and multiple temperature effects, at temperatures slightly higher than glass transition temperature.

Keywords: carbon fiber, tensile strength, stretching, heating, glass transition temperature, full-scale experiment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-824-826

1. Al'shiblavi K.A., Yartsev V.P. Comparative analysis of operational properties of composite plastic and metal reinforcement. *Innovatsii v nauke*. 2017, no. 6 (67), pp. 78–81. (In Russ.).
2. Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Prokopov A.Yu., Mashtakova K.V., Makhon'ko Ya.Yu., Yakovleva K.S. On application of polymeric materials in construction of underground structures. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015, vol. 37, no. 3, pp. 95. (In Russ.).
3. Karal M. *AST Composite Wing Program – Executive Summary*. NASA/CR-20001-210650, March 2001. Electronic resource. Available at URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010033249.pdf> (Accessed: 25.05.2017).
4. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Mechanics of deformable solid: Manual for universities]. Moscow: Nauka, 1988, 712 p. (In Russ.).
5. Matveenko V.P., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A., Sharda-kov I.N. *Termomekhanika polimernykh materialov v usloviyakh*

relaksatsionnogo perekhoda [Thermomechanics of polymeric materials under conditions of relaxation transition]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 175 p. (In Russ.).

6. Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of technological and residual stresses in glass forming bodies. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred.* 2008, vol. 1, no. 1, pp. 92–108. (In Russ.).
7. Murashov V.V., Mishurov K.S., Sorokin K.V. Evaluation of strength of carbon plastics in monolith structures under shear and compression by means of non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika.* 2011, no. 10, pp. 29–34. (In Russ.).
8. Kaledin V.O., Ul'yanov A.D., Kaledin V.I.O. Final element of the Timoshenko shear beam, with regard on temperature distortions and

material burnout. *Nauchn.-tekhn. vestnik Povolzh'ya.* 2017, no. 5, pp. 141–144. (In Russ.).

Information about the authors:

V.O. Kaledin, Dr. Sci (Eng), Professor, Academician of International Academy of Higher Education, Head of the Research Laboratory of Mathematical Modeling (vkaled@mail.ru)

K.V. Tagil'tsev-Galet, Cand. Sci. (Eng), Senior Lecturer of the Chair "Automation and Information Systems" (magister463@gmail.com)

A.D. Ul'yannov, Postgraduate, Engineer of the Research Laboratory of Mathematical Modeling (zbrg@mail.ru)

Received May 3, 2018
