

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛИМЕРАХ И СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

Турусов Р.А.^{1,2}, Разакова Р.В.¹

¹*Московский государственный строительный университет, Москва;*

²*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва*

Ключевые слова: слоистые композиты, адгезионная механика, контактный слой, межфазный слой, адгезионный контакт, температурное напряжение, метод контактного слоя, высокоэластические деформации.

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию температурных напряжений в слоистых структурах с полимерными вязкоупругими слоями. Приведены расчеты температурных напряжений, в которых применялась математическая теория, позволяющая учитывать высокоэластические деформации, возникающие в полимерных прослойках. Используемая математическая модель основана на законах молекулярной природы деформации полимерных материалов. Полученные с учетом высокоэластических деформаций температурные напряжения сравниваются с результатами расчетов по классическим методам теории упругости. В статье приводятся экспериментальные исследования температурных напряжений в образце из линейного полимера метилметакрилата. Согласно полученным результатам расчетов была доказана значимость учета реальных релаксационных температурно-временных свойств материи. Также в расчетах использовался метод контактного слоя, который позволяет учесть параметры адгезионного взаимодействия между полимерными и стальными слоями.

THERMAL STRESSES IN POLYMERS AND LAYERED COMPOSITES

Turusov R.A.^{1,2}, Razakova R.V.¹

¹*National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow;*

²*Semenov Institute of Chemical Physics of RAS, Moscow*

Keywords: layered composites, adhesive mechanics, contact layer, interfacial layer, adhesive contact, thermal stress, contact layer method, highly elastic deformations.

Abstract. This work is devoted to the research of temperature stresses in layered structures with polymer viscoelastic layers. Authors have used a mathematical theory to calculate thermal stresses that included highly elastic deformations which appears in polymer layers. The used mathematical model was based on the laws of the polymer and other materials deformation molecular nature. It has been compared the thermal stresses which included the highly elastic deformations with the results of elasticity theory classical methods calculations. Researchers presented experimental studies of thermal stresses in a sample of polymer epoxy PMMA in this article. It has been proved the importance of including the real relaxation temperature-time properties of matter which was based on the calculation results. Also, there is the contact layer method in the calculations, which allows including the parameters of adhesive interaction between layers of steel and polymer.

Введение

Слоистые композиционные материалы используются в различных отраслях промышленности, поскольку с помощью такого рода материалов можно облегчить конструкцию, не потеряв прочности, а также увеличить необходимые физико-механические характеристики с помощью добавления определенных слоев. Это открывает возможность использовать слоистые структуры во многих инженерных приложениях, например, для аэрокосмических аппаратов и устройств.

Путем соединения вязкоупругого материала с металлом можно значительно изменить и улучшить эффективные свойства и поглощение энергии материалами. В качестве примера можно привести обшивку крыла самолета, которая может состоять из нескольких слоев, что обусловлено воздействием колоссальных нагрузок. Для высокоскоростных летательных аппаратов особенно важно производить подбор материалов, устойчивых к температурным воздействиям. Температурные напряжения, которые возникают в элементах летательных аппаратов, могут привести к необратимым разрушениям, что является недопустимым. Для

предотвращения таких разрушений необходима разработка методов расчета напряжений, вызванных температурными воздействиями [1-5]. Также выполняются соответствующие физические эксперименты, но на предварительных этапах необходимо проведение аналитических и численных расчетов. Аналитические и численные расчеты должны быть подтверждены натурным экспериментом. В настоящей работе предлагается математическая модель Максвелла-Гуревича, с помощью которой производится расчет температурных напряжений слоистого стержня с учетом высокоэластических деформаций. Данная математическая модель является обобщенным случаем известной релаксационной модели Максвелла, связывающей напряжения с деформациями [6-8].

Материалы и методы исследований

Одной из особенностей механического поведения полимерных материалов является наличие у них большой доли обратимых деформаций, не совпадающих по фазе с напряжениями, так называемых высокоэластических деформаций. Таким образом, у полимеров зависимость физико-механических характеристик от скорости деформации, температуры и длительности воздействия нагрузок гораздо больше, чем у металлов. Также стоит выделить большую вероятность возникновения «холодной» ползучести и значительную роль релаксационных процессов.

Для получения используемой в данной статье модели Максвелла-Гуревича была задействована физическая теория, в основе которой лежат законы молекулярной природы деформации полимерных и иных материалов. Вязкоупругие жесткие полимеры описываются обобщенным нелинейным уравнением Максвелла-Гуревича в работах [6-9]. Для напряжений и деформации изотропного полимера в одномерном случае указанное уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_{x1}^*}{\partial t} = \frac{\sigma_{x1} - E_{\infty} \cdot \varepsilon_{x1}^*}{\eta_{0s}^*} \exp \left| \frac{\sigma_{x1} - E_{\infty} \cdot \varepsilon_{x1}^*}{m_s^*} \right|, \quad (1)$$

где σ_{x1} и ε_{x1}^* – напряжения и высокоэластические деформации; η_{0s}^* – коэффициент начальной релаксационной вязкости s -ой составляющей спектра высокоэластической деформации пропорционального начальному времени релаксации; E_{∞} – модуль высокоэластической деформации; m_s^* – модуль скорости, отражающий влияние скорости деформации от напряжения при фиксированной деформации.

Модуль высокоэластической деформации 1-ой составляющей спектра высокоэластической деформации $E_{1,\infty}$ и коэффициент начальной релаксационной вязкости 1-ой составляющей спектра высокоэластической деформации η_{01}^* , определялись эмпирическими формулами, зависящими от температуры T :

$$E_{1,\infty} = \frac{2,4 \cdot 10^6}{T} - 6120, \text{ МПа}, \quad (2)$$

$$\eta_{01}^* = 36000 \exp \left(\frac{9500}{T} - 21 \right), \text{ МПа}, \quad (3)$$

где T – температура.

Для получения температурных напряжений, было рассмотрено уравнение нормальных усилий N_1 слоистой структуры, а также уравнение для определения высокоэластической деформации:

$$\frac{\partial^2 N_1}{dx^2} = 2gr \left[\left(\frac{1-\mu_1}{E_1 h_1} + \frac{1-\mu_0}{2E_0 h_0} \right) N_1 + \left(\frac{\mu_0}{E_0} - \frac{\mu_1}{E_1} \right) q + \varepsilon_{t,1} - \varepsilon_{t,0} + \varepsilon_{x,1}^* \right], \quad (4)$$

где $q = A_1 N_1 + A_{t,0} \cdot \varepsilon_{t,0} + A_{t,1} \cdot \varepsilon_{t,1} + A^* \varepsilon_{z1}^*$; $A_1 = \frac{2\mu_1 E_0 - 2\mu_0 E_1}{h_1 E_0 + 2h_0 E_1}$; $A_{t,0} = -\frac{2h_0 E_0 E_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}$;

$A_{t,1} = -\frac{E_0 E_1 h_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}$; $A^* = -\frac{2E_0 E_1 h_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}$.

Уравнение (4) было получено с помощью метода контактного слоя (метод Турусова Р.А.) [9]. Данный метод был протестирован при решении ряда важных контактных задач [9-10].

где индексами 0 обозначена сталь, а 1 полимер; E_0, E_1 , МПа, – модули Юнга; μ_0, μ_1 – коэффициенты Пуассона; h_0, h_1 – величины толщины слоев; gr – жесткость контактного слоя; $\varepsilon_{t,0}$ и $\varepsilon_{t,1}$ – температурные напряжения.

Принимая во внимание также, что:

$$N_1(x, t) = h_1 \cdot \sigma_{x,1}(x, t).$$

Если в каждый момент времени t_i известны правая часть уравнения (4), то распределение функции $N_1(x, t)$ из (4) находится методом прогонки. Все начальные условия для искомых функций однородные, т.е. нулевые при $t=0$:

$$N_1 = h_1 \sigma_{x,1} = 0; \quad \varepsilon_{x,1}^* = 0; \quad T = T_0. \quad (5)$$

Граничные условия для $N_1(\pm l/2)$, равны нулю.

Уравнение (1) решалось с использованием численного метода Рунге-Кутты 4 порядка в программной среде matlab. В таблице 1 приведены исходные данные для численного эксперимента.

Табл. 1. Исходные данные для расчета температурных напряжений

Начальная температура, T_0 , К	295
Скорость изменения температуры, ω , градус/мин	0,4
Размер стороны квадратного сечения стержня, l , мм	10
Коэффициент Пуассона стали, μ_0	0,33
Коэффициент Пуассона стали, μ_1	0,4
Толщина слоя стали, h_0 , мм	0,4
Толщина слоя полимера, h_1 , мм	0,25
Модуль упругости стали, E_0 , МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Модуль упругости полимера, E_1 , МПа	$-18,2 \cdot T + 8200$
Коэффициент линейного температурного расширения полимера, α_1 , K^{-1}	$10^{-4}(0,46 \cdot T - 58)$
Коэффициент линейного температурного расширения стали, α_0 , K^{-1}	$0,11 \cdot 10^{-4}$
Жесткость контактного слоя, gr , МПа/мм	29600 МПа
Температура (от времени и скорости), T	$n \cdot \omega + T_0$

Результаты

На рисунке 1 представлены зависимости температурных напряжений от температуры для трех разнородных образцов, характеристики которых представлены в таблице 1.

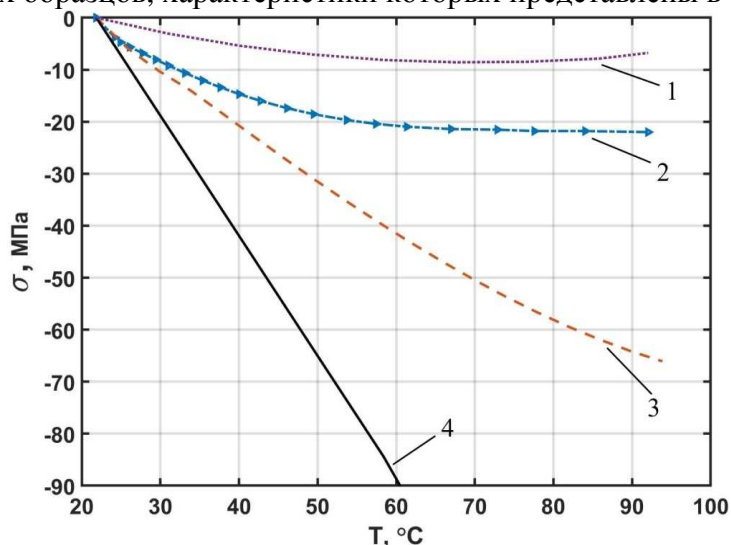


Рис. 1. Кривые зависимости температурных напряжений от температуры

На графике изображены 4 кривые: кривая 1 описывает зависимость температурных напряжений от температуры в чистом полимерном стержне. В слоистом образце описывают напряжения кривые 2 и 3, а прямая 4 – в стальном. Исходя из полученных данных видно, что во всех образцах при повышении температуры напряжения возрастают по абсолютной величине. Температурные напряжения, полученные при анализе стального объекта самые высокие, а температурные напряжения в полимерном стержне небольшие в сравнении с напряжениями в слоистом композите. Такие высокие напряжения в стальном образце объясняются наличием самого высокого модуля упругости и коэффициента линейного теплового расширения. Температурные напряжения в полимерном образце возрастают приблизительно по линейному закону от 21 до 60°C, а в дальнейшем выходят на плато стабилизации и начинают медленно падать. Кривая, отмеченная номером 2, была получена с помощью математической модели, учитывающей релаксационные явления. Она показывает, что при повышении температуры от 21 до 50°C происходит стремительный рост напряжения, а после 50°C процесс становится более плавным и постепенно выходит на плато и практически не изменяется вплоть до 90°C. Кривая 3, полученная из «упругого решения», демонстрирует напряжения в 3 раза выше, чем полученные данные, учитывающие упругую релаксацию. Это явление и обуславливает такую значительную разницу этих двух кривых (кривая 2 и 3).

На рисунке 2 представлено сопоставление экспериментальной и теоретической кривых зависимости температурных напряжений в стержне из полиметилметакрилата (ПММА) [9]. Данные кривые были получены при скорости нагревания $\omega = 0,4$ град/мин. Очевидно, что теоретическая кривая хорошо согласуется с экспериментальной.

Качественная интерпретация данных, отображенных на рисунке 2, сводится к анализу двух противоположных друг другу процессов – релаксации напряжений и теплового расширения, т.е. стремление молекулярной структуры полимера перестроиться под внешнее возмущение.

Увеличение температуры сопровождается повышением подвижности молекул, сопровождающееся увеличением коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР), а также понижением модуля упругости материалов. Важно подчеркнуть, что вблизи температуры стеклования полимера (T_g), коэффициент линейного температурного напряжения (КЛТР) увеличивается приблизительно в 3 раза, а в диапазоне, который превышает температуру стеклования, КЛТР остается примерно постоянным. Также важно выделить факт, что от строения полимера (сетчатое, линейное) характер изменения температурных напряжений является одинаковым, поэтому предлагаемую в настоящей статье математическую модель можно использовать для любого типа полимера. Учитываемый модуль высокоэластичности (E_∞) сравнительно мал и незначительно возрастает вместе с повышением температуры по линейному закону. Это явление объясняет замедление возрастания температурных напряжений при температурах превосходящих температуру стеклования (T_g).

Выводы

Предлагаемая в настоящей работе методика расчета полимерных и слоистых композиционных структур, позволяет производить учет реальных релаксационных температурно-временных свойств материи.

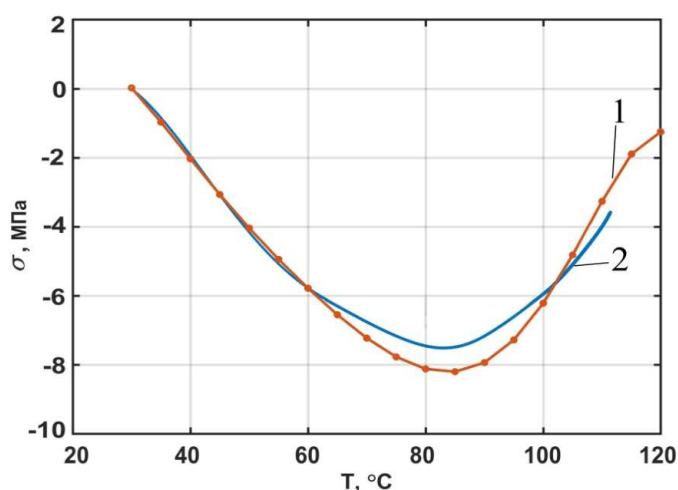


Рис. 2. Температурная зависимость напряжений в полимерном стержне: кривая 1 – эксперимент, сплошная линия 2 – теоретическая

Предлагаемая теория позволяет получить более точные значения температурных напряжений, которые имеют хорошую сходимость с экспериментом в достаточно широком диапазоне температур. Исходя из данных, можно однозначно сказать, что учет упруго-релаксационных явлений крайне важен и необходим, поскольку данные упругого решения дают значительно завышенный результат.

Список литературы

1. Bulut O. Reaktör gövdesinde kullanılan kompozit levhalardaki kusurlar civarında termal gerilme analizi // Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University. 2019, vol. 34, no. 2, pp. 1078-1086. doi.org/10.17341/gazimmfd.460504.
2. Qian Y., Wu N., Hou J., Hao X., Cai D. Thermal Stress Analysis of the Adhesive Layer in Composite Laminates // Coatings. 2022, vol. 12, no. 4, p. 0472. doi.org/10.3390/coatings12040472.
3. Andreev V.I. Axisymmetric Thermo-elastic Deformation of the Cylinder with Two-dimensional Inhomogeneity of Material // Procedia Engineering. 2016, vol. 153, pp. 32-36. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.076.
4. Hulin T., Hodický K., Schmidt J., Stang H. Experimental investigations of sandwich panels using high performance concrete thin plates exposed to fire // Materials and Structures. 2015, vol. 49, pp. 3879-3891. doi.org/10.1617/s11527-015-0760-x.
5. Kobayashi S., Shimpo T., Goto K. Microscopic damage behavior in carbon fiber reinforced plastic laminates for a high accuracy antenna in a satellite under cyclic thermal loading // Advanced Composite Materials. 2019, vol. 28, no. 3, pp. 259-269. doi.org/10.1080/09243046.2018.1551745.
6. Гуревич Г.И. Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. – М.: Наука, 1974. – 483 с.
7. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. – М.: Наука, 1970. – 482 с.
8. Турусов Р.А. Температурные напряжения и релаксационные явления в осесимметричных задачах механики жестких полимеров: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: Науч.-исслед. физ.-хим. ин-те им. Л.Я. Карпова, 1970. – 160 с.
9. Турусов Р.А. Адгезионная механика. – М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2016. – 228 с.
10. Цыбин Н.Ю. Разрешающие уравнения многослойной пластины с применением трехмерной модели контактного слоя // Развитие фундаментальных основ науки и образования в строительстве: Сборник тезисов XIV Международной научно-практической конференции. – М.: НИУ МГСУ, 2017. – С. 89-91.

References

1. Bulut O. Reaktör gövdesinde kullanılan kompozit levhalardaki kusurlar civarında termal gerilme analizi // Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University. 2019, vol. 34, no. 2, pp. 1078-1086. doi.org/10.17341/gazimmfd.460504.
2. Qian Y., Wu N., Hou J., Hao X., Cai D. Thermal Stress Analysis of the Adhesive Layer in Composite Laminates // Coatings. 2022, vol. 12, no. 4, p. 0472. doi.org/10.3390/coatings12040472.
3. Andreev V.I. Axisymmetric Thermo-elastic Deformation of the Cylinder with Two-dimensional Inhomogeneity of Material // Procedia Engineering. 2016, vol. 153, pp. 32-36. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.076.
4. Hulin T., Hodický K., Schmidt J., Stang H. Experimental investigations of sandwich panels using high performance concrete thin plates exposed to fire // Materials and Structures. 2015, vol. 49, pp. 3879-3891. doi.org/10.1617/s11527-015-0760-x.
5. Kobayashi S., Shimpo T., Goto K. Microscopic damage behavior in carbon fiber reinforced plastic laminates for a high accuracy antenna in a satellite under cyclic thermal loading // Advanced Composite Materials. 2019, vol. 28, no. 3, pp. 259-269. doi.org/10.1080/09243046.2018.1551745.
6. Gurevich G.I. Deformability of media and propagation of seismic waves. – М.: Science, 1974. – 483 p.
7. Rabinovich A.L. Introduction to the mechanics of reinforced polymers. – М.: Science, 1970. – 482 p.
8. Turusov R.A. Thermal stresses and relaxation phenomena in axisymmetric problems in the mechanics of rigid polymers: diss. ... cand. of phys.-math. sc. – М.: Scientific Research Phys.-Chem. Institute n.a. L.Ya. Karpov, 1970. – 160 p.
9. Turusov R.A. Adhesion mechanics. – М.: Publ. house NRU MSU of Civil Engineering, 2016. – 228 p.
10. Tsybin N.Yu. Resolving equations of a multilayer plate using a three-dimensional model of the contact layer // Development of the fundamental principles of science and education in construction: Collection of abstracts of the XIV International Scientific and Practical Conference. – М.: NRU MSU of Civil Engineering, 2017. – P. 89-91.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Турусов Роберт Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор	Turusov Robert Alekseevich – doctor of physical and mathematical sciences, professor
Разакова Рио-Рита Вадимовна – аспирант	Razakova Rio-Rita Vadimovna – postgraduate student
chernova_riorita@mail.ru	

Получена 02.10.2023