

УДК 621.01:691-419.8

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.06

Д.В. Коновал^{1,2}¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия²Кронштадт, Москва, Россия

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ОГНЯ

Было проведено большое количество исследований для определения характеристик свойств горения и снижения воспламеняемости композиционных материалов, но в то же время о структурном поведении композитов при пожаре известно гораздо меньше. Хотя в нескольких исследованиях изучалось влияние высокой температуры или пожара на несущие свойства полимерных композитных материалов. В данной работе представлены термомеханические модели для прогнозирования прочности полимерных композитных материалов, нагруженных при растяжении или сжатии, подвергнутых одностороннему лучистому нагреву огнем. Модели предсказывают повышение температуры и температурный профиль по толщине в горячем разлагающемся ламинате, подвергнутом воздействию огня. В моделях предполагается, что одна сторона многослойной балки равномерно нагревается при постоянном лучистом тепловом потоке. Расчет огнестойкости требует определения распределения температуры в поперечном сечении (модель теплового воздействия) и анализа механических характеристик конструкции, подвергающейся воздействию повышенной температуры (модель структурного отклика). Пространственное разделение температур, которое повышается при вероятном пожаре, может быть выражено через управляемый огнем поток жидкости или FDS (симулятор динамики пожара). Температурное поле ламината было рассчитано с помощью модуля теплопередачи.

Ключевые слова: полимерная матрица, огонь, пиролиз, обугленный материал, термомеханические свойства, теплопередача, модуль теплопередачи, COMSOL, FDS код, анализ прочности.

D.V. Konoval^{1,2}

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Kronshtadt, Moscow, Russian Federation

THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIAL EXPOSED TO FIRE

A large amount of research has been performed to characterize the combustion properties and reduce the flammability of composite materials, although less is known about the structural behavior of composites in fire. Although several studies have studied the effect of high temperature or fire on the load-bearing properties of polymer composite materials. This paper presents thermomechanical models for predicting the strength of polymer composite materials loaded under tension or compression, subjected to unilateral radiant heating by fire. The models predict the temperature rise and through-thickness temperature profile in a hot decomposing laminate exposed to fire. The models assume that one side of a laminate beam is evenly heated at a constant radiant heat flux. Calculation of the fire resistance demands determination of temperature distribution in the cross-section (heat-exposure model) and analysis of mechanical responses of the structure exposed to increased temperature (structural response model). Space division of temperatures, which rises in probable fire, could be expressed through of fire-driven fluid flow or FDS (Fire Dynamics Simulator). The temperature field of the laminate was calculated by using Heat Transfer Module.

Keywords: polymer matrix, fire, pyrolysis, charred material, thermomechanical properties, heat transfer, heat transfer module, COMSOL, FDS code, strength analysis.

Армированные волокном композитные конструкции в последние годы стали очень конкурентоспособными инженерными материалами и успешно заменили традиционные металлические и другие полимерные материалы во многих важных отраслях промышленности. Композиты на основе эпоксидной смолы благодаря своим благоприятным механическим, физико-химическим свойствам и высокому соотношению прочности и легкого веса используются в несущих конструкциях самолетов, военных транспортных средств, кораблей, строительных и морских

сооружений. В целях расширения проникновения на рынок и из-за действующего строгого авиационного и другого законодательства, направленного на повышение безопасности, улучшению огнестойкости было уделено значительное внимание. Компоненты органической матрицы восприимчивы к горению и повреждению огнем из-за их химической структуры [1–3]. Это приводит к опасениям по поводу структурной целостности композитных ламинатов во время и после воздействия огня. Многие композитные материалы являются слоистыми, и, следовательно, каждый последующий слой, действующий как изолятор, влияет на термодеструкцию межволоконных слоев полимерной матрицы [3–6]. В упрощенном варианте процесс деградации композита при воздействии огня можно описать таким образом: тепло, попадающее на поверхность, вызывает разрушение смолы, приводящее к ее воспламенению. Дальнейшее проникновение тепла ниже первого слоя композита вызывает разрушение лежащей под ним смолы. Продукты разложения мигрируют в зону горения сквозь межволоконные слои полимерной матрицы. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все слои смол не будут сожжены. Однако, если можно усилить образование обугливания, которое затем может действовать как тепловой барьер, это может замедлить эту миграцию, что приведет к остановке или замедлению горения. При нагревании композита исходный первичный материал (или, скорее, один или несколько компонентов исходного первичного композитного материала) пиролизуется и дает пиролизный газ, который просачивается из зоны пиролиза, и пористый остаток, который для большинства представляющих интерес материалов представляет собой углеродистый уголь, возможно, армированный огнеупорными волокнами, или ткань (рис. 1). На эту основную проблему может быть наложен ряд еще более сложных мероприятий. Пиролизные газы, просачивающиеся через уголь, могут подвергаться дальнейшим химическим реакциям между собой и вступать в реакцию с углем, либо разрушая его, либо осаждая на нем дополнительный остаток («коксование»). Сам обуглившийся материал может разрушиться или фрагментироваться от механических или термических воздействий, а огнеупорная арматура может расплавиться или получить механические повреждения. Наконец, различные составляющие структуры остатка могут химически реагировать друг с другом, изменяя природу обугливания, и различные механические силы могут удалять материал с поверхности [7].

Несмотря на эти сложности, обнаруживается «простая физика»:

Первичный пластик → уголь + газ.

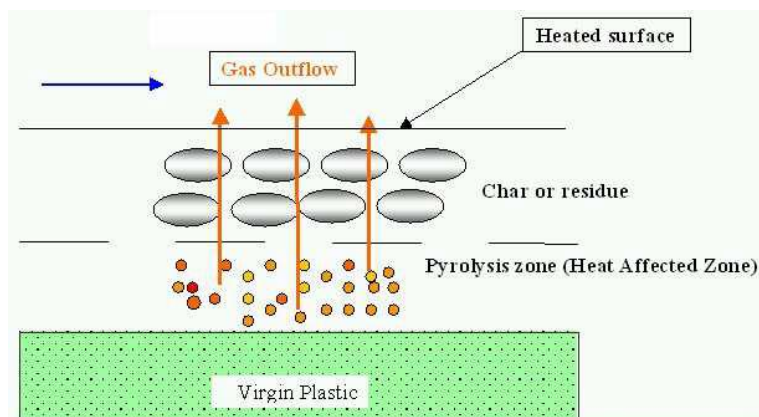


Рис. 1. Процесс разложения композита

Эта реакция лежит в основе широкого круга проблем, представляющих технический интерес. Такие явления, как приготовление пищи, механическая эрозия, плавление и подповерхностные реакции (кроме пиролиза), встречаются реже и в целом характеризуют конкретные проблемы. Поэтому при любых попытках вычислить углубленную реакцию пиролизующихся материалов необходимо охарактеризовать теплопроводность и первичную реакцию пиролиза,

которые имеют полезную общность. Конкретные детали специальных химических систем обугливания затем могут быть наложены на эту общую вычислительную схему по мере необходимости. Настоящая работа была в основном посвящена общей проблеме кондуктивного пиролиза [7].

Предлагаемый подход к параллельному структурному моделированию пожара (CFS)

В этом подходе к моделированию анализ конструкций при комбинированных механических и огневых нагрузках выполняется с использованием FDS и эмпирических кодов. Код FDS сначала используется для определения температуры или теплового потока на поверхностях в зависимости от времени. Нелинейный структурный анализ последовательно выполняется после того, как получены распределения температуры в зависимости от времени во всех точках конструкции. Предлагаемый подход можно разделить на три части моделирования. Первая часть – это моделирование пожара, в котором используется модель FDS. Модель FDS генерирует решение нескольких переменных состояний, таких как давление, температура, теплота, вектор скорости. Температура и тепловой поток профилей внутренних конструктивных поверхностей используются и применяются к последующим моделируемым деталям. Во второй части использовался модуль теплопередачи COMSOL для вычисления температурных профилей композита по их толщине с использованием результатов теплового потока или температуры поверхности из модели FDS. В третьей части были оценены механические свойства композита.

Динамический симулятор пожара (FDS)

Динамический симулятор пожара (FDS) был разработан в Лаборатории исследований зданий и пожаров (BFRL) Национального института стандартов и технологий (NIST) [8]. Программа вычисляет температуру, плотность, давление, скорость и химический состав в каждой ячейке числовой сетки на каждом дискретном временном шаге. Он вычисляет температуру, тепловой поток и скорость потери массы закрытых твердых поверхностей. Код FDS сформулирован на основе вычислительной гидродинамики (CFD) потока жидкости, управляемого огнем. Численное решение FDS может быть выполнено с использованием метода прямого численного моделирования (DNS) или моделирования больших вихрей (LES). Последний имеет относительно низкие числа Рейнольдса и не имеет серьезных ограничений по размеру сетки и временному шагу, в отличие от метода DNS. В дополнение к классическим уравнениям сохранения, рассматриваемым в FDS, включая массу, импульс и энергию, используется основанное на термодинамике уравнение состояния идеального газа наряду с химической реакцией горения для библиотеки различных источников топлива. Последний используется в том случае, когда скорость тепловыделения при пожаре неизвестна. FDS также имеет программу визуального моделирования изображений с последующей обработкой под названием «smoke-view». В этом исследовании разрабатывается различное программное обеспечение для последующей обработки результатов FDS и генерации временных и пространственных числовых данных, необходимых для предлагаемых функций аппроксимации температуры.

Компьютерное моделирование процесса

В этой работе мы предположили, что композит разлагается на газ и уголь. Показана схема реакции:



Во время реакции пиролиза расходуется масса полимера, в результате чего образуется фракция α газа и оставшийся уголь. Скорость реакции первого порядка для композита составляет

$$\frac{dr_p}{dt} = -k_0 r_p, \quad (2)$$

где r_p – толщина полимера в [м], t – время в [с] и k_0 – постоянная скорости реакции пиролиза в [1/с].

Константа скорости в реакции пиролиза k_0 является функцией температуры и лучше описывается соотношением Аррениуса:

$$k_0 = A_0 \cdot \exp\left[-\frac{E_{A_0}}{R \cdot T}\right], \quad (3)$$

где A_0 – предэкспоненциальный коэффициент реакции пиролиза [1/с], E_{A_0} – энергия активации реакции пиролиза [кДж/кмоль], R – газовая постоянная [Дж/моль/К] и T – температура в [К]. Предэкспоненциальный коэффициент и энергию активации можно определить с помощью термogravиметрического анализа.

1D – уравнение теплопроводности для составной температуры $T_s(x, t)$ применяется в направлении x , указывающем на твердое тело (точка $x = 0$ представляет поверхность) [8]:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}. \quad (4)$$

Термин источника, \dot{q}_s , состоит из химических реакций, поглощения излучения и конвективной теплопередачи:

$$\dot{q}_s = \dot{q}_{s,c} + \dot{q}_c. \quad (5)$$

Конвективный тепловой поток рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$\dot{q}_c = h(T_g - T_w). \quad (6)$$

При расчете методом моделирования больших вихрей (LES) конвективный тепловой поток к поверхности получается из комбинации корреляций естественной и принудительной конвекции:

$$h = \max \left[\frac{C |T_g - T_w|^{\frac{1}{3}}}{L}, \frac{\lambda_g}{L} 0,037 \text{Re}^{\frac{4}{5}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \right] w / m^2 / K, \quad (7)$$

где C – коэффициент естественной конвекции (1,52 для горизонтальной поверхности и 1,31 для вертикальной поверхности), L – характерная длина, связанная с размером физического препятствия, λ_g – теплопроводность, а числа Re Рейнольдса и Pr Прандтля основаны на газе, проходящем мимо препятствия. Химический исходный член уравнения теплопроводности состоит из теплоты реакции

$$\dot{q}_{s,c} = -\rho_s k_0 \Delta H_r, \quad (8)$$

где ΔH_r – это теплота реакции. Теплофизические свойства (теплопроводность, теплоемкость и плотность) и константы скорости композита, используемые при расчете FDS и COMSOL, приведены в таблице.

Теплофизические и термохимические показатели
и свойства композита, используемого в расчетах

Параметр	Значение	Единицы измерения
ρ_s	1,140	кг/м ³
$c_{p,s}$	760	Дж/кгК
λ_s	0,43	Вт/м·К
E_{AO}	$2,13E + 05$	кДж/кмоль
A_0	$5,59E + 13$	1/с

На рис. 2 показана прогнозируемая остаточная толщина композита в зависимости от времени: видно, что композиты полностью разрушались через 2000 с. Результаты рецессии, полученные с помощью программного обеспечения FDS, были перенесены в модель COMSOL. В модели спад композитной внешней поверхности задается с помощью граничного условия движущейся сетки, включенного через «Режим применения движущейся сетки». Программа имеет предварительно упакованную функцию, описанную как метод произвольного Лагранжиана – Эйлера (ALE); она позволяет перемещать границы без необходимости перемещения сетки в соответствии с материалом [9].

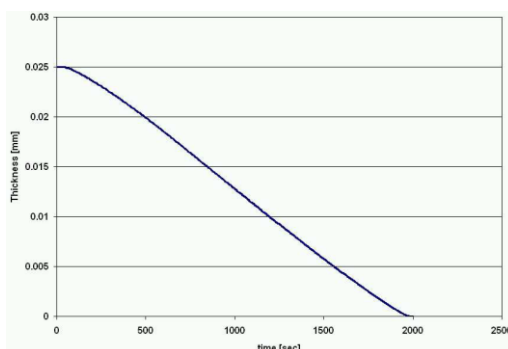


Рис. 2. Прогнозируемая толщина композита в зависимости от времени

На рис. 3 показано температурное поле композита через 900 с от начала возгорания.

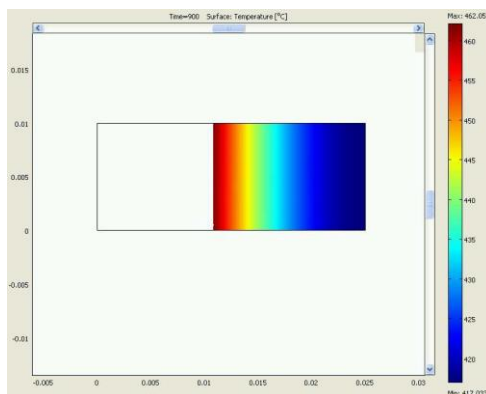


Рис. 3. Температурное поле композита через 900 с

Ухудшение механических свойств

Температурная зависимость механических свойств может быть выражена в виде гиперболической касательной функции температуры. Для модуля Юнга закон деградации записывается в виде [10]:

$$E(T) = \frac{E_1 + E_2}{2} + \frac{E_1 - E_2}{2} \tanh[\Phi(T - T_k)], \quad (9)$$

где E_1 – модуль Юнга при начальной температуре в [МПа], E_2 – остаточный модуль в [МПа], $\Phi = 0,026$ [1/K], и $T_k = 88$ °С.

На рис. 4 показан модуль Юнга в зависимости от температуры при $t = 50, 100, 150, 200$ и 300 с.

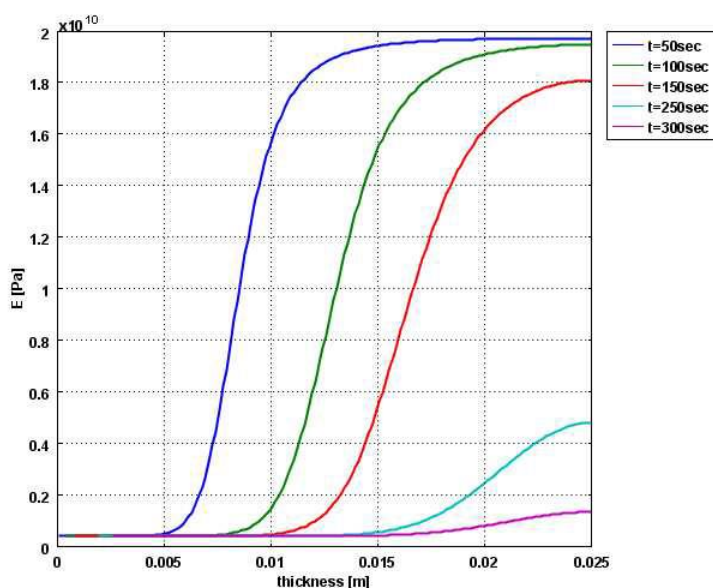


Рис. 4. Модуль Юнга композита при различных температурах

Из рис. 4 видно, что модуль Юнга уменьшается при более высоких температурах.

Выводы

Были представлены термомеханические модели для прогнозирования прочности полимерных слоистых материалов, нагруженных при растяжении или сжатии, подвергнутых одностороннему лучистому нагреву огнем. Модели предсказывают повышение температуры и температурный профиль сквозной толщины в горячем разлагающемся ламинате, подвергнутом воздействию огня. В моделях предполагается, что одна сторона многослойной балки равномерно нагревается при постоянном лучистом тепловом потоке. Предлагаемый подход можно разделить на три части моделирования. Первая часть – это моделирование пожара, в котором используется модель FDS. Модель FDS генерирует решение нескольких переменных состояния, таких как давление, температура, теплота, вектор скорости. Однако наша структура заинтересована в части теплового и температурного решения, которые связаны с производительностью структуры и ее откликом. Температура и тепловой поток профилей внутренних конструктивных поверхностей используются и применяются к последующим моделируемым деталям. Во второй части использовался модуль теплопередачи для вычисления температурных профилей композита по их толщине с использованием результатов теплового потока или температуры поверхности из модели FDS. В третьей части были оценены механические свойства композита. Было показано, что модуль Юнга уменьшается при более высоких температурах.

Библиографический список

1. Scudamore M.J. Fire performance studies on glass-reinforced plastic laminates // *Fire Mater.* – 1994. – № 18. – P. 313.
2. Sorathia U., Rollhauser M., Hughes W.A. Improved fire safety of composites for naval applications // *Fire Mater.* – 1992. – № 16. – P. 119.
3. Mouritz A.P., Mathys Z. Post-fire mechanical properties of marine, polymer composites // *Compos Struct.* – 1999. – № 47. – P. 643.
4. Dao M., Asaro R.J. // *Composites Part A.* – 1999. – № 30. – P. 123.
5. Mouritz A.P., Mathys Z. Mechanical properties of fire-damaged glass reinforced phenolic composites // *Fire Mater.* – 2000. – № 24. – P. 67–75.
6. Fire behaviour of composite laminates / N. Dodds, A.G. Gibson, D. Dewhurst, J.M. Davies // *Composites Part A.* – 2000. – № 31. – P. 689.
7. Moyer C.B., & Rindal R.A. An Analysis of the Coupled Chemically Reacting Boundary Layer and Charring Ablator, Part II, Finite Difference Solution for the In-Depth Response of Charring Materials Considering Surface Chemical and Energy Balances, 1-3, Aerotherm Report No. 66-7, Part II, Itek Corporation, Vidya Divisio Palo Alto, California, 1968.
8. Fire Dynamics Simulator (Version5) – User's Guide, NIST 1019-5 / McGrattan K., Forney G. P., Floyd J. F., Hostikka S. and Prasad K. National Institute of Standards and Technology (NIST), 2010.
9. Anonymous, COMSOL Multiphysics – Modeling Guide. Version 4.0a, August 2010.
10. Gu P., Chen W. Influence of thermal distortion to compression failure of polymer matrix panels in fire // *Composite Structures.* – 2012. – № 94. – P. 2174–2180.

References

1. Scudamore M.J., Fire performance studies on glass-reinforced plastic laminates. *Fire Mater*, 1994, vol. 18, Is.5, pp. 313-325
2. Sorathia U., Rollhauser M., Hughes W.A. Improved fire safety of composites for naval applications. *Fire Mater*, 1992, vol. 16, Is.3, pp. 119-125
3. Mouritz AP, Mathys Z. Post-fire mechanical properties of marine, polymer composites. *Composite Structures*, 1999, Vol.47, pp. 643-653.
4. Dao M, Asaro R.J. A study on failure prediction and design criteria for fiber composites under fire degradation. *Composites Part A*, 1999, Vol. 30, pp. 123-131.
5. Mouritz A.P., Mathys Z., Mechanical properties of fire-damaged glass reinforced phenolic composites. *Fire Mater*, 2000, Vol. 24, Is. 2, pp. 67-75.
6. Dodds N, Gibson AG, Dewhurst D, Davies J.M. Fire behaviour of composite laminates. *Composites Part A*, 2000, Vol. 31, pp. 689-702.
7. Moyer, C.B. & Rindal R.A., An Analysis of the Coupled Chemically Reacting Boundary Layer and Charring Ablator, Part II, Finite Difference Solution for the In-Depth Response of Charring Materials Considering Surface Chemical and Energy Balances, 1-3, Aerotherm Report No. 66-7, Part II, Itek Corporation, Vidya Divisio Palo Alto, California (1968), 56 p.
8. McGrattan, K., Forney, G. P., Floyd, J. F., Hostikka, S., and Prasad, K., Fire Dynamics Simulator (Version5) - User's Guide, NIST 1019-5, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2010, 206 p.
9. Anonymous, COMSOL Multiphysics - Modeling Guide. Version 4.0a, August 2010, 1622 p.
10. Gu, P & Chen, W., Influence of thermal distortion to compression failure of polymer matrix panels in fire. *Composite Structures*, 2012, Vol. 94, Is. 7, pp. 2174-2180.

Об авторе

Коновал Дарина Викторовна (Москва, Россия) – магистрант кафедры «Авиационная техника», Московский авиационный институт (Москва, 125993, Волоколамское шоссе, 4); инженер-конструктор отдела «Проектирование сборочной оснастки», АО «Кронштадт» (Москва, 123060, 1-й Волоколамский проезд, 10с1, e-mail: knvar@yandex.ru).

Darina V. Konoval (Moscow, Russian Federation) – Master's student of the Department «Aircraft engineering», Moscow Aviation Institute (4, Volokolamskoe shosse, 125993, Moscow); design engineer of the

department «Design of assembly equipment», JSC «Kronstadt» (10c1, 1st Volokolamsk passage, 123060, Moscow, e-mail: knvar@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад 100 %.

Поступила: 22.07.2022

Одобрена: 29.08.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Коновал, Д.В. Термомеханический анализ композиционного материала, подвергшегося воздействию огня / Д.В. Коновал // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 53–60. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.06

Please cite this article in English as: Konoval D.V. Thermomechanical analysis of composite material exposed to fire. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2022, no. 71, pp. 53-60. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.06