

УДК 536.425; 539.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ
ПРИ ПУЛТРУЗИИ ПРОФИЛЕЙ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

© 2014 г.

Константинов А.Ю.¹, Сафонов А.А.²

¹*НИИ механики Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Сколковский институт науки и технологий,
Сколково Московской обл., Российская Федерация*

constantinov.al@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.09.2014

Статья посвящена созданию методики численной оценки остаточных технологических деформаций в профилях сложного сечения композиционных материалов на основе термореактивного связующего. Для этого в рамках ПП АBAQUS реализована математическая модель поведения такого материала, в которой термомеханические характеристики связующего (модули упругости, коэффициенты теплового расширения, теплоемкость и теплопроводность) зависят от температуры и степени полимеризации. Химическая реакция полимеризации (отверждения) термореактивной матрицы рассчитывается на основании кинематической модели. Эффективные характеристики армированного волокнами или тканью композиционного материала в рамках модели трансверсально-изотропной среды определяются с помощью микромеханических моделей. В качестве иллюстрации работы созданной расчетной методики приводится пример прогноза коробления стеклопластикового швеллера для мостовых конструкций в процессе пултрузии. Показано, что изменение угла между полками швеллера и его стенкой в ходе технологического процесса составляет 0,6 градуса.

Ключевые слова: пултрузия, коробление, кинетика химической реакции, отверждение, композиционный материал, термореактивное связующее.

Введение

В настоящее время весьма актуальным является применение конструкционных стеклопластиковых изделий сложного сечения в авиации, железнодорожном транспорте, строительстве и других областях техники. Примерами таких изделий являются конструкционные элементы композитных мостов (балки, швеллеры, настилы) [1], элементы стеклопластиковых опор высоковольтных линий электропередач, силовые элементы авиаконструкций и др.

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 14-19-01096).

Конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются весьма дорогостоящими по сравнению с конструкциями из традиционных материалов: дерева, бетона, металла. Однако во многих областях применения, особенно в случаях ограничения на вес конструкции и стойкость к агрессивным средам, конструкции из композиционных материалов успешно соперничают с традиционными аналогами [2]. Необходимо отметить, что при этом они должны оставаться конкурентоспособными с точки зрения стоимости. Добиться этого можно путем изготовления крупных интегральных конструкций с более низкой стоимостью производства. Эта задача является выполнимой и реализуется в различных областях, хотя она требует хорошего контроля деформаций, обусловленных технологическим процессом, поскольку они могут привести к выходу размеров готового изделия за установленные спецификацией (техническими условиями) пределы, что, в свою очередь, создает проблемы при подгонке компонентов конструкции во время сборки сложных составных конструкций. Задача получения изделия заданной формы, как правило, решается опытным путем с помощью варьирования различных параметров технологического процесса. Такая итерационная процедура может быть весьма дорогостоящей, трудоемкой и неэффективной, особенно в случае производства крупных компонентов, поэтому актуальной задачей является построение математических моделей прогноза остаточных напряжений и деформаций в процессе изготовления изделий из полимерных композиционных материалов.

Пултрузия

Наиболее экономичным способом производства конструктивных профилей из полимерных композиционных материалов является пултрузия [3]. Суть пултрузионного процесса заключается в том, что непрерывный армирующий наполнитель (стеклоровинг и лента) протягивается тянущим устройством через пропиточный узел с термореактивным связующим, затем поступает в обогреваемую фильеру, определяющую геометрию поперечного сечения изделия, в которой осуществляется полимеризация связующего (рис. 1).

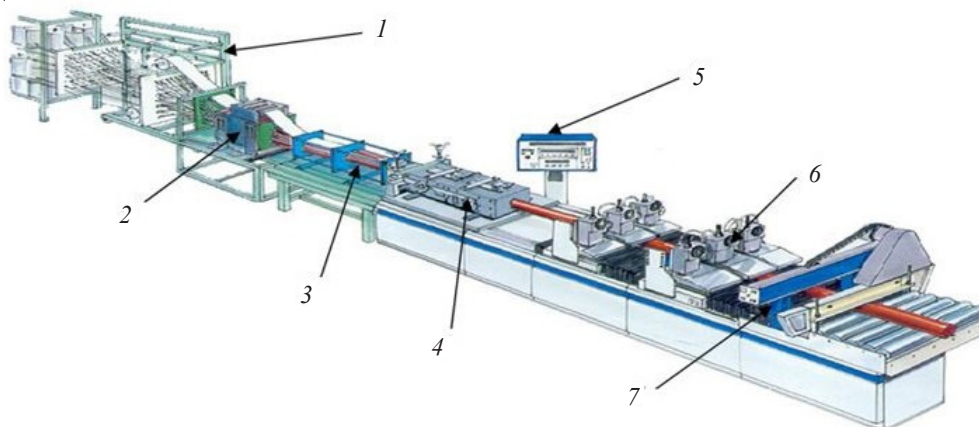


Рис. 1. Схема пултрузионного процесса

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – шпулярники с армирующим наполнителем, 2 – пропиточный узел, 3 – фолдер, 4 – фильера, 5 – пульт управления, 6 – тянущее устройство, 7 – отрезное устройство.

Численные и экспериментальные методы термохимического анализа процесса пултрузии описаны в различных исследованиях [4–9], главной целью которых было определение распределения температур и профилей степени отверждения внутри нагреваемой формообразующей фильеры.

Попытка изучения термомеханических аспектов процесса пултрузии, таких как изменение механических свойств, напряжений и деформаций, возникающих в процессе производства композитных профилей, предпринималась в работе [10]. Применяемые подходы были взяты из работ, посвященных изучению термомеханических аспектов некоторых процессов изготовления композитных изделий, отличных от пултрузии (отверждение в автоклаве, вакуумная инфузия и инжектирование в закрытую форму), которых, однако, объединяет сходный с процессом пултрузии основной механизм развития остаточных напряжений и деформаций [11, 12].

Схема моделирования процесса

Для адекватного описания изменений, происходящих с заготовкой в ходе технологического процесса (при прохождении через разогретую фильеру), необходимо учитывать следующие явления: перенос тепла в композиционном материале (КМ), химическую реакцию полимеризации, внутреннее выделение энергии в ходе химической реакции, возникновение в заготовке температурных и химических деформаций, тепловой и механический контакт с фильерой, изменение тепловых и механических характеристик КМ в результате фазовых превращений связующего. Основной отличительной особенностью моделирования поведения КМ с термореактивной матрицей является необходимость определения фазового состояния связующего во времени. Для этого используют такую характеристику, как степень полимеризации α (меняется от 0 до 1). Скорость изменения степени полимеризации зависит от температуры и достигнутой степени полимеризации и описывается кинетическим уравнением вида [4]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = K_0(1 - \alpha)^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где K_0 – константа материала, E – энергия активации, n – порядок реакции, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Распределение температуры в объеме заготовки определяется из решения уравнений теплопереноса [5]:

$$\rho \frac{\partial (c_p T)}{\partial t} = -\sum_{i=1}^3 \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} + q, \quad (2)$$

где ρ – плотность, c_p – удельная теплоемкость материала, T – температура, Q_i – тепловой поток, q – скорость внутреннего тепловыделения (энергия, высвобождаемая в процессе полимеризации термореактивного материала), x_i – декартовы координаты.

Термические определяющие соотношения (закон Фурье) определяются следующим выражением:

$$Q_i = -\sum_{j=1}^3 k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Здесь k_{ij} – тензор теплопроводностей материала, i принимает значения 1, 2, 3.

При этом тепловые характеристики (удельная теплоемкость и коэффициенты теплопроводности) зависят от температуры и достигнутой степени полимеризации.

Скорость внутреннего тепловыделения пропорциональна скорости реакции полимеризации и записывается в виде [4]:

$$q = \rho_m H_{\text{tot}} \frac{d\alpha}{dt} (1 - V_f), \quad (4)$$

где ρ_m – плотность термореактивной матрицы, H_{tot} – удельная (на единицу массы) теплота, выделяющаяся при полной полимеризации, $d\alpha/dt$ – скорость реакции полимеризации, V_f – объемная доля армирующего наполнителя в композите.

В процессе затвердевания меняются механические характеристики матрицы. В настоящей статье, так же, как и в [10], считается, что коэффициент Пуассона материала матрицы остается постоянным, а модуль Юнга E_m рассчитывается по формуле:

$$E_m(T^*) = \begin{cases} E_m^0, & T^* < T_{C1}, \\ E_m^0 + \frac{T^* - T_{C1}}{T_{C2} - T_{C1}} (E_m^\infty - E_m^0), & T_{C1} \leq T^* \leq T_{C2}, \\ E_m^\infty, & T^* > T_{C2}, \end{cases} \quad (5)$$

где $T^* = T_g - T$, T_g – температура стеклования, которая зависит от степени полимеризации и определяется из соотношения [10]:

$$T_g(\alpha) = T_{g0} + (T_{g\infty} - T_{g0}) \frac{\lambda\alpha}{1 - (1 - \lambda)\alpha}, \quad (6)$$

T_{g0} , $T_{g\infty}$, λ , T_{C1} , T_{C2} , E_m^0 , E_m^∞ – определяемые экспериментально постоянные материала.

Предполагается, что коэффициент температурного расширения материала матрицы β в эластичном состоянии (при $T > T_g$) в 2,5 раза больше, чем в твердом. Кроме тепловой деформации в расчете учитывалась так называемая химическая деформация (усадка), которая появляется в композите в результате фазового перехода связующего из эластичного состояния в твердое. Химическая деформация матрицы определяется по формуле:

$$\Delta\varepsilon_m^{\text{ch}} = \sqrt[3]{1 + \Delta V^{\text{ch}}} - 1, \quad (7)$$

здесь $\Delta V^{\text{ch}} = \Delta V_{\text{tot}}^{\text{ch}} \Delta\alpha$ – уменьшение объема материала матрицы при изменении степени полимеризации на $\Delta\alpha$, $\Delta V_{\text{tot}}^{\text{ch}}$ – относительное изменение объема связующего при полной полимеризации. Эффективные химические деформации композита рассчитываются на основании аналитических моделей [13].

Для определения напряжений используется модель трансверсально-изотропного материала, в которой тензор жесткости зависит от состояния связующего (эластичное, твердое) и меняется в процессе полимеризации КМ. Тензор жесткости КМ в каждый момент времени определяется следующим образом: вначале в соответствии с уравнением (3) рассчитывается модуль Юнга связующего, затем на основании микромеханической модели [13] определяются эффективные характеристики КМ. Считается, что механические и тепловые свойства армирующего волокна во времени остаются постоянными.

Описанная выше модель была реализована в ПП ABAQUS. Для этого исполь-

зовался механизм пользовательских подпрограмм. Поскольку процессы полимеризации деталей из ПКМ с термореактивной матрицей длятся несколько часов, для их моделирования был выбран неявный решатель ABAQUS Standard. Уравнения теплопроводности и равновесия решались стандартными средствами ПП. Для интегрирования уравнения кинетики полимеризации (1) применялся двухшаговый неявный метод Эйлера – Коши.

Расчет напряженно-деформированного состояния при вытяжке мостового швеллера

Моделировался процесс изготовления швеллера, армированного по внешней границе тканью, а внутри (ровинг) – волокнами в направлении, перпендикулярном плоскости сечения (рис. 2).

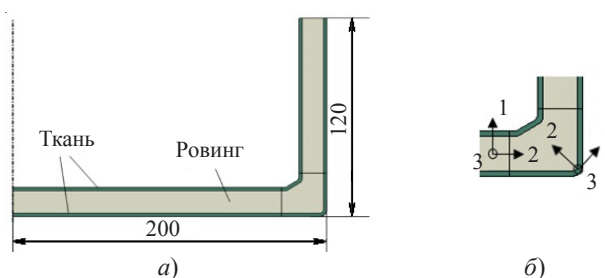


Рис. 2. Модель швеллера (а – половина сечения с характерными размерами, б – материальные направления в ровинге и ткани)

В расчетах для описания поведения компонент КМ использовались параметры и константы (в том числе входящие в уравнения (1)–(7)) из работ [4] и [10], значения которых приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Параметры для моделирования [4]

Название	Значение
1	2
Плотность композита, кг/м ³	2080
Длина фильеры, м	1
Скорость вытяжки, см/мин	5
Температура материала при входе в фильеру, °С	50
Температура окружающей среды, °С	25
Коэффициенты теплопроводности однонаправленного КМ (направление армирования 3), Вт/(м·°С)	$k_3 = 0,9053, k_1 = k_2 = 0,5592$
Коэффициенты теплопроводности армированного в плоскости КМ (направление нормали к тканной основе 2), Вт/(м·°С)	$k_2 = 0,5592, k_1 = k_3 = 0,73225$
Полный тепловой эффект реакции полимеризации связующего, Дж/м ³	$1,57 \cdot 10^8$
Теплоемкость, Дж/(кг·°С) (Т в °С)	$976 + 1,68T - 178\alpha + 0,769\alpha T$
Суммарный порядок реакции по реагирующим компонентам <i>n</i>	1,80
K_0	$4,33 \cdot 10^{13}$
Энергия активации, кДж/моль	127,2

Таблица 1 (продолжение)

1	2
Коэффициент теплопередачи между стеклопластиком и окружающей средой (после выхода из фильеры), Вт/(°С·м ²)	14
Объемное содержание фазы, %	65

Таблица 2

Механические характеристики матрицы (уравнения (5)–(7))

ν_m	T_{C1}, K	T_{C2}, K	E_m^0, MPa	E_m^∞, MPa	$\beta_m^0, 1/K$	$\beta_m^\infty, 1/K$	$\Delta V_{tot}^{ch}, \%$
0,35	-45,7	-12	3,447	$3,447 \cdot 10^3$	2,5	$5,76 \cdot 10^{-5}$	6

Таблица 3

Механические характеристики армирующего волокна

E_f, MPa	ν_f	G_f, MPa	$\beta_f, 1/K$
73080	0,22	29920	$5,04 \cdot 10^{-6}$

При моделировании использовались следующие параметры уравнения (6) для температуры стеклования [10]: $\lambda = 0,4$, $T_{g0} = 0$ °С, $T_{g\infty} = 195$ °С.

Распределение температуры по длине фильеры задавалось в соответствии с измеренными экспериментально значениями [4] (рис. 3).

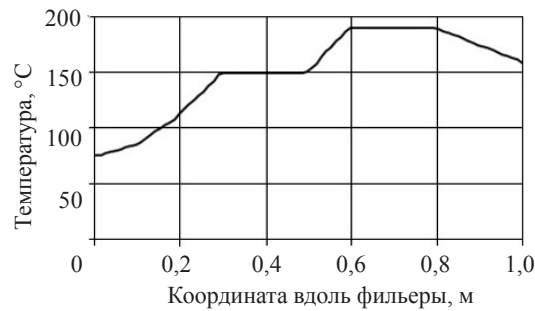


Рис. 3. Распределение температуры по длине фильеры

На рис. 4 показаны временные зависимости степени полимеризации (левая вертикальная ось) и температуры (правая вертикальная ось) в точках ткани (сплошная линия) и ровинга (штриховая линия).

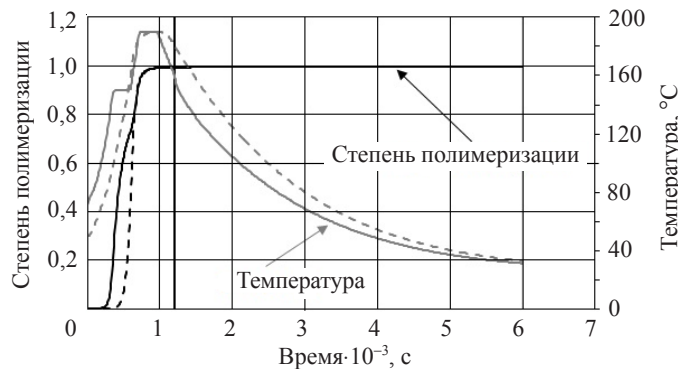


Рис. 4. Зависимости от времени степени полимеризации и температуры в точках ткани и ровинга

Вертикальной линией отмечен момент выхода сечения из фильеры. Видно, что на момент выхода из фильеры матрица композита полностью полимеризуется.

На рис. 5 приводятся поля температур (в °С) и степени полимеризации в сечении швеллера в различные моменты времени. В связи с симметрией геометрии и внешних воздействий относительно вертикальной оси на рисунке приведена половина поперечного сечения швеллера.

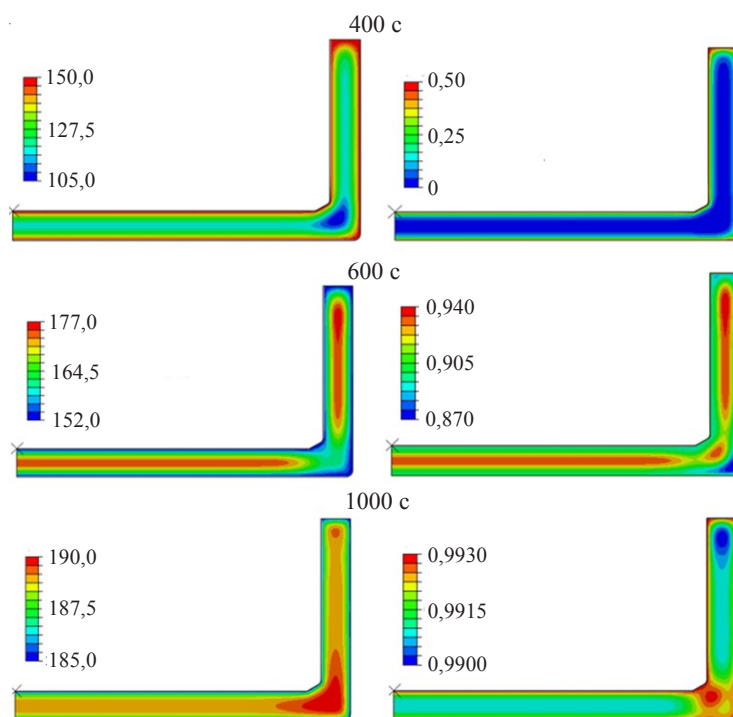


Рис. 5. Температурные поля (слева) и поля степени полимеризации (справа) в сечении швеллера в разные моменты времени

Видно, что вначале прогрев профиля происходит от границы (контакт с фильерой). Начиная с некоторого момента времени, в силу протекания химической реакции полимеризации и соответствующего выделения теплоты зоны максимальной температуры смещаются внутрь профиля, что, в свою очередь, влияет на распределение полей степени затвердевания термореактивной матрицы в объеме заготовки.

На рис. 6 представлены зависимости от времени деформаций в точках ткани и ровинга. Штриховыми линиями показаны химические деформации, сплошными линиями – температурные. На рис. 6а показаны деформации в материальном направлении 1, на рис. 6б – в направлении 2 (см. рис. 2б).

Из рисунков видно, что уровень химических деформаций сопоставим с температурными деформациями. Деформирование материала в направлении армирования в два раза меньше, чем в перпендикулярном направлении. В силу изменения коэффициента температурного расширения в процессе фазового превращения матрицы температурная деформация не исчезает полностью при остывании материала.

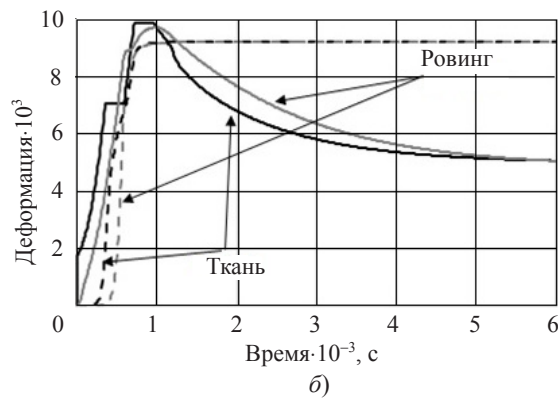
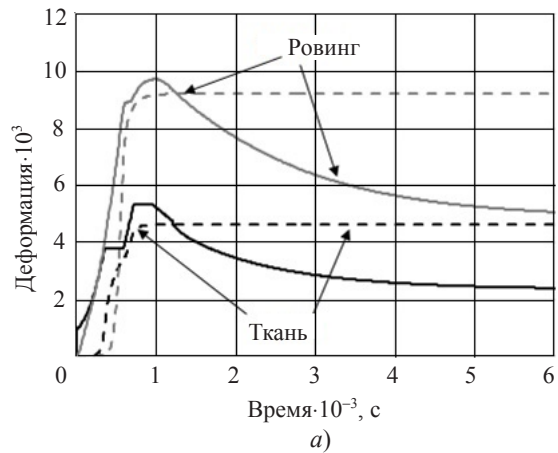


Рис. 6. Деформации в точках швеллера

На рис. 7а показаны поля полных перемещений точек сечения после остывания (шкала в мм). Максимальное перемещение составило 1,35 мм, что соответствует уменьшению угла между стенкой и основанием швеллера примерно на $0,6^\circ$. На рис. 7б показана форма швеллера после остывания. Для наглядности реальные перемещения увеличены в 20 раз.

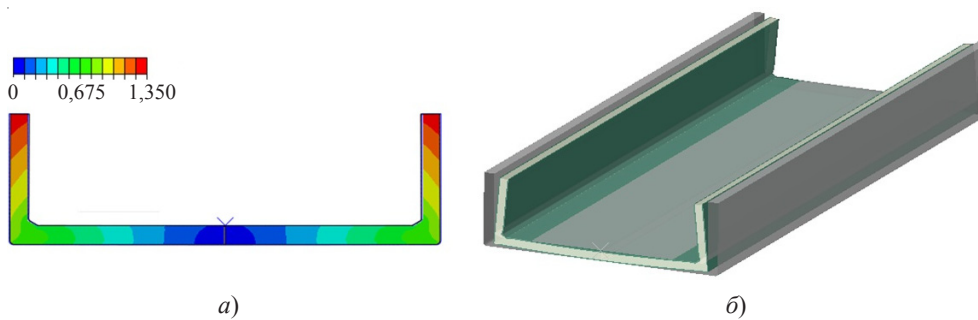


Рис. 7. Коробление профиля после изготовления

Выводы

1. В рамках ПП АВАQUS реализована модель поведения КМ с термореактивной матрицей.

2. Проведено численное моделирование технологического процесса пултрузии профиля, имеющего сечение швеллера.

3. Получены оценки деформаций, возникающих в заготовке в процессе протяжки через фильеру, а также искажения формы полученного изделия.

Реализованная схема численного моделирования поведения композиционного материала на основе термореактивного связующего в условиях теплового воздействия позволяет на ранней стадии проектирования технологического процесса получить оценку качества получаемого на выходе изделия и в случае необходимости внести соответствующие корректировки.

Список литературы

1. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С. 25–37.
2. Антонов Ф.К. О возможности улучшения защитных свойств многослойных преград при использовании связующего нового типа // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т, 2010. Вып. 72. С. 184–189.
3. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: Учеб.-справ. пособие. СПб.: Профессия, 2003. 240 с.
4. Сафонов А.А. Математическое моделирование механики технологического процесса пултрузии стеклопластиковых изделий: Дис... канд. техн. наук. М., 2006. 155 с.
5. Сафонов А.А. Математическое описание процесса полимеризации при пултрузионной вытяжке // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. №2. С. 103–106.
6. Moschiar S.M., Reboredo M.M., Kenny J.M. Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibers // Polymer Composites. 1996. 17. P. 478–485.
7. Kim D.H., Han P.G., Jin G.H., Lee W.I. A model for thermosetting composite pultrusion process // J. of Composite Materials. 1997. 31. P. 2115–2122.
8. Joshi S.C., Liu X.L., Lam Y.S. A numerical approach for modeling of polymer curing in fiber reinforced composites // Composites Science and Technology. 1999. 60(6). P. 845–855.
9. Сафонов А.А. Оптимизация режимов пултрузионного процесса вытяжки цилиндрических стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2007. №2. С. 124–128.
10. Baran I., Tutum C.C., Nielsen M.W., Hattel J.H. Process induced residual stresses and distortions in pultrusion // Composites. Part B: Engineering. 2013. Vol. 51. P. 148–161.
11. Svanberg J., Holmberg J. Prediction of shape distortions. Part I. FE implementation of a path dependent constitutive model // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2004. P. 711–721.
12. Сафонов А.А., Константинов А.Ю., Сергеевич И.В., Антонов Ф.К., Ушаков А.Е. Моделирование технологических деформаций конструктивных элементов из композитных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. №1. С. 46–52.
13. Bogetti T.A., Gillespie Jr. J.W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates // J. of Composite Materials. 1992. 26(5). P. 626–660.

References

1. Ushakov A.E., Klenin Yu.G., Sorina T.G., Khayretdinov A.Kh., Safonov A.A. Mostovye konstruksii iz kompozitov // Kompozity i nanostrukturny. 2009. No 3. S. 25–37.
2. Antonov F.K. O vozmozhnosti uluchsheniya zashchitnykh svoystv mnogoslonykh pregrad pri ispol'zovanii svyazuyushchego novogo tipa // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhvuz. sb. / Nizhegorod. un-t, 2010. Vyp. 72. S. 184–189.
3. Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V. Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov: Uch.-sprav. pos. SPb.: Professiya, 2003. 240 s.
4. Safonov A.A. Matematicheskoe modelirovanie mekhaniki tekhnologicheskogo protsessa pultruzii stekloplastikovyykh izdeliy. Dis... kand. tekhn. nauk. M., 2006. 155 s.

5. *Safonov A.A.* Matematicheskoe opisanie protsessa polimerizatsii pri pultruzionnoy vytyazhke // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. 2005. №2. S. 103–106.
6. *Moschiar S.M., Reboredo M.M., Kenny J.M.* Analysis of pultrusion processing of composites of unsaturated polyester resin with glass fibers // Polymer Composites. 1996. 17. P. 478–485.
7. *Kim D.H., Han P.G., Jin G.H., Lee W.I.* A model for thermosetting composite pultrusion process // J. of Composite Materials. 1997. 31. P. 2115–2122.
8. *Joshi S.C., Liu X.L., Lam Y.S.* A numerical approach for modeling of polymer curing in fiber reinforced composites // Composites Science and Technology. 1999. 60(6). P. 845–855.
9. *Safonov A.A.* Optimizatsiya rezhimov pultruzionnogo protsessa vytyazhki tsilindricheskikh sterzhney // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. 2007. №2. S. 124–128.
10. *Baran I., Tutum C.C., Nielsen M.W., Hattel J.H.* Process induced residual stresses and distortions in pultrusion // Composites. Part B: Engineering. 2013. Vol. 51. P. 148–161.
11. *Svanberg J., Holmberg J.* Prediction of shape distortions. Part I. FE implementation of a path dependent constitutive model // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2004. P. 711–721.
12. *Safonov A.A., Konstantinov A.Yu., Sergeichev I.V., Antonov F.K., Ushakov A.E.* Modelirovanie tekhnologicheskikh deformatsiy konstruksionnykh elementov iz kompozitnykh materialov // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2014. №1. S. 46–52.
13. *Bogetti T.A., Gillespie Jr. J.W.* Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates // J. of Composite Materials. 1992. 26(5). P. 626–660.

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL TECHNOLOGICAL DEFORMATION OF COMPLEX CROSS-SECTION PROFILES DURING PULTRUSION OF THE POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

Konstantinov A.Yu., Safonov A.A.

Work is devoted to the creation of methods of numerical evaluation of the residual strain in the technological profiles of complex cross section of composite materials based on thermosetting binder. In commercial code ABAQUS implemented mathematical model in which the thermomechanical characteristics of the binder (elastic modulus, thermal expansion coefficient, specific heat and thermal conductivity) depend on the temperature and degree of polymerization. Chemical polymerization reaction (curing) of thermosetting matrix is calculated based on the kinematic model. Effective characteristics of fiber or tissue reinforced composite material are determined using a micromechanical model. An example is given buckling prediction of fiberglass channel bar for bridge structures in pultrusion. It was found that the change in the angle due to buckling during the manufacturing process is 0.6 degrees.

Keywords: pultrusion, warping, the kinetics of chemical reactions, curing, composite material, thermosetting binder.