

# Математическое моделирование технологического процесса пултрузии профилей из композиционных материалов

А. А. Сафонов<sup>1,a</sup>, А. Ю. Константинов<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Сколковский институт науки и технологий,

<sup>2</sup> НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,

Работа посвящена созданию методики численной оценки остаточных технологических деформаций в профилях сложного сечения из полимерных композиционных материалов на основе термореактивного связующего. Для этого в рамках ПП ABAQUS 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.

## 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) [Ушаков и др., 2009], элементы стеклопластиковых опор высоковольтных линий электропередач, силовые элементы авиаконструкций и др.

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 имеет большое значение, конструкции из композиционных материалов успешно соперничают с традиционными аналогами, однако при этом они также 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 (методом проб и ошибок) 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 конструкционных профилей из полимерных композиционных материалов является пултрузия. 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).

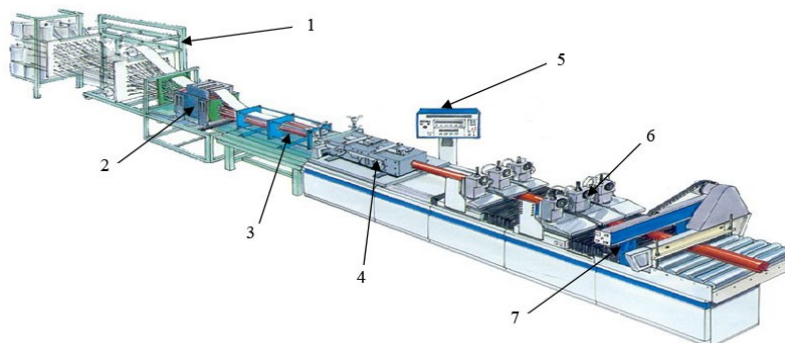


Рис. 1 - Схема пултрузионного процесса

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 [Joshi, 1999], [Сафонов, 2005, 2006, 2007], 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 [Varan и др., 2009]. Применяемые подходы были взяты из работ, посвященных изучению термомеханических аспектов некоторых процессов изготовления композитных изделий, отличных от пултрузии (отверждение в автоклаве, вакуумная инфузия и инъектирование в закрытую форму), которых, однако, объединяет сходный с процессом пултрузии основной механизм развития остаточных напряжений и деформаций [Bogetti, 1992], [Сафонов, 2014].

### 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 КМ, химическая реакция 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  $\alpha$  (меняется от 0 до 1). Скорость изменения степени полимеризации зависит от температуры и достигнутой степени полимеризации и описывается кинетическим уравнением вида:

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

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:

$$\rho \frac{\partial (c_p T)}{\partial t} = -\sum_i \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} + q, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность,  $c_p$  – удельная теплоемкость материала,  $T$  – температура,  $Q_i$  – тепловой поток,  $q$  – скорость внутреннего тепловыделения (энергия, высвобождаемая в процессе полимеризации термореактивного материала),  $i$  принимает значения  $x, y, z$ .

Термические определяющие соотношения (закон Фурье) определяются следующим выражением:

$$Q_i = -\sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}. \quad (3)$$

Здесь  $k_{ij}$  – тензор теплопроводностей материала,  $j$  принимает значения  $x, y, z$ .

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:

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

где  $\rho_m$  – 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 работе, так же, как и в [Bogetti, 1992], 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:

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

здесь  $T_{g0}$ ,  $T_{g^\infty}$ ,  $\lambda$ ,  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$ ,  $E_m^0$ ,  $E_m^\infty$  - определяемые экспериментально постоянные материала.

Предполагается, что коэффициент температурного расширения материала матрицы  $\beta$  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 следующей формуле:

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

здесь  $\Delta V^{ch} = \Delta V_{tot}^{ch} \Delta \alpha$  - уменьшение объема материала матрицы при изменении степени полимеризации на  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta V_{tot}^{ch}$  - относительное изменение объема связующего при полной полимеризации. Эффективные химические деформации композита рассчитываются на основании аналитических моделей [Bogetti, 1992].

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 [Bogetti, 1992] 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 использовался механизм пользовательских подпрограмм. Поскольку процессы полимеризации деталей из ПКМ с термореактивной матрицей носят длительный характер (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

В настоящей работе моделировался процесс изготовления швеллера, армированного по внешней границе тканью, а внутри (ровинг) - волокнами в направлении, перпендикулярном плоскости сечения (Рис. 2).

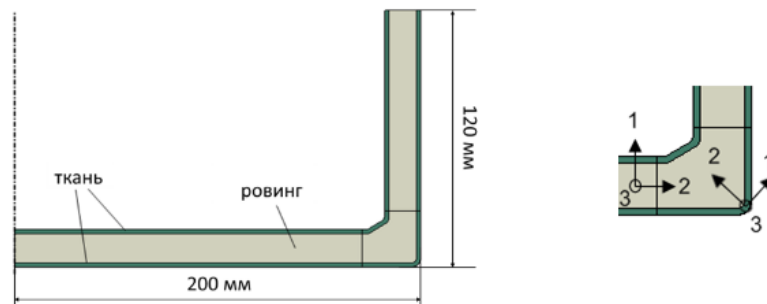


Рис. 2 - Пултрузионный швеллер. Слева - половина сечения швеллера с характерными размерами, справа - материальные направления в ровинге и ткани

В расчетах для описания поведения компонент КМ использовались параметры и константы (в том числе входящие в уравнения (1)-(7)) из работ [Сафонов, 2006] и [Ваган и др., 2009], значения которых приведены в табл. 1 - 3.

При моделировании использовались следующие параметры уравнения (6) для температуры стеклования [Ваган и др., 2009]:  $\lambda=0,4$ ,  $T_{g0}=0$  °C,  $T_{g^\infty}=195$  °C.

Распределение температуры по длине фильеры задавалось в соответствии с измеренными экспериментально значениями [Сафонов, 2006] (Рис.3).

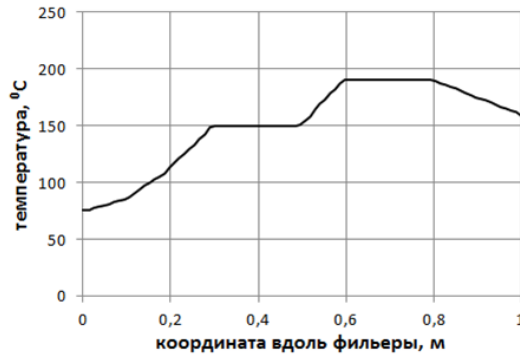


Рис. 3 - Распределение температуры по длине фильеры

Таблица 1

Название	Значение
Плотность композита, кг/м <sup>3</sup>	2080
Длина фильеры, м	1
Скорость вытяжки, см/мин	5
Температура материала при входе в фильеру, °C	50
Температура окружающей среды, °C	25
Коэффициенты теплопроводности однонаправленного КМ (направление армирования 3), Вт/(м·°C)	$k_3=0,9053, k_1=k_2=0,5592$
Коэффициенты теплопроводности армированного в плоскости КМ (направление нормали к тканной основе 2), Вт/(м·°C)	$k_2=0,5592, k_1=k_3=0,73225$
Полный тепловой эффект реакции полимеризации связующего, Дж/м <sup>3</sup>	$1,57 \cdot 10^8$
Теплоемкость, Дж/(кг·°C)	976
Суммарный порядок реакции по реагирующим компонентам	$n=1.80$
$K_0$	$4,33 \cdot 10^{13}$
Энергия активации, кДж/моль	127.2
Коэффициент теплопередачи между стеклопластиком и окружающей средой (после выхода из фильеры), Вт/(°C м <sup>2</sup> )	14
Объемное содержание фазы, %	65

В табл. 2 и 3 приводятся механические характеристики материала матрицы и армирующего волокна.

Таблица 2

$v_m$	$T_{C1}, K$	$T_{C2}, K$	$E_{m0}, MPa$	$E_{m\infty}, MPa$	$\beta_{m0}, 1/K$	$\beta_{m\infty}, 1/K$	$\Delta V_{tot}^{ch}, \%$
0.35	-45,7	-12	3,447	$3,447 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot \beta_{m\infty}$	$5,76 \cdot 10^{-5}$	6

Таблица 3

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

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

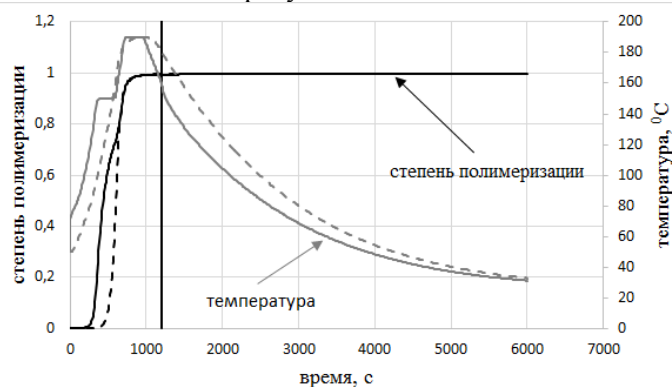


Рис. 4 - Зависимости от времени степени полимеризации и температуры в точках ткани и ровинга

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

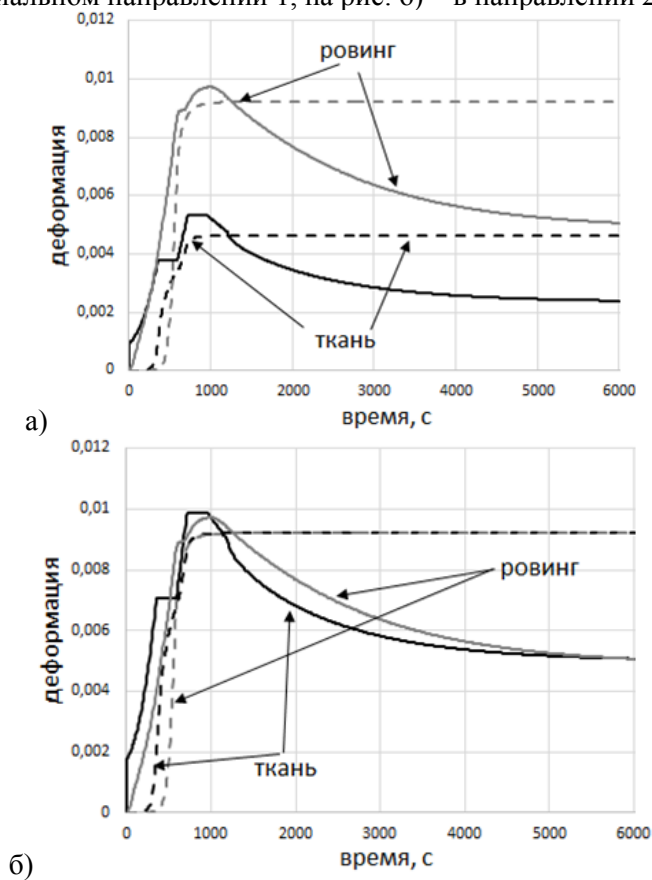


Рис. 5 - Деформации в точках швеллера

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.

На рис. 6 слева 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 градуса. На рис. 6 справа показана форма швеллера после остывания. Для наглядности реальные перемещения увеличены в 20 раз.

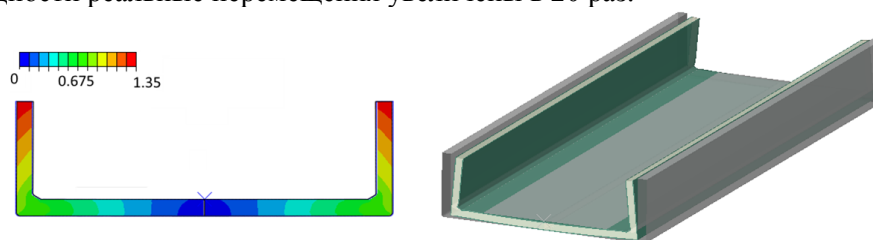


Рис. 6 - Коробление профиля после изготовления

Как видно из рисунка рис. 7 в процессе вытяжки швеллера в силу его температурной деформации и химической усадки в области внутреннего угла образуется достаточно большой зазор между швеллером и фильерой.

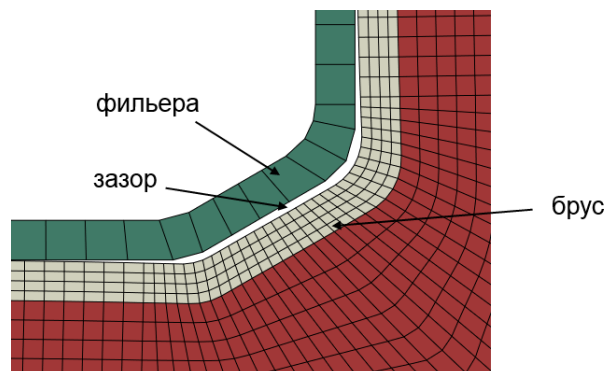


Рис. 7 - Образование зазора между фильерой и швеллером в процессе нагрева

Поэтому для оценки влияния указанного эффекта на напряженно-деформированное состояние бруса в процессе пултрузии проведен дополнительный расчет в следующей постановке:

- фильера моделировалась плоскими элементами сплошной среды;
- на фильере задавалась временная зависимость температуры в соответствии с законом, полученным из эксперимента;
- на между фильерой и швеллером задавался механический и тепловой контакт;
- коэффициент теплообмена между фильерой и швеллером считался зависящим от зазора и рассчитывался в соответствии с моделью:

$$h_c = \frac{k_{air}}{d}, \quad (8)$$

здесь  $k_{air}$  – коэффициент теплопроводности воздуха (0.03 Вт/(м К)),  $d$  – величина воздушного зазора.

- на внешней границе задавалось условие свободного конвективного теплообмена с окружающей средой:

Сравнение временных зависимостей температуры и степени полимеризации показало, что в области внутреннего угла швеллера имеет место существенное отличие. Это отличие хорошо заметно на графиках степени полимеризации (рис. 8).

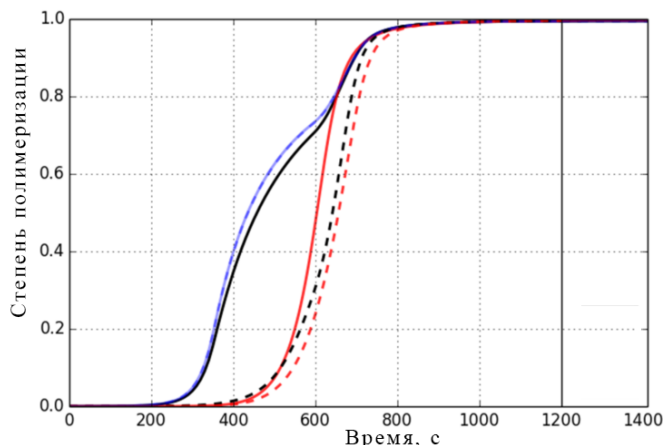


Рис. 8 - Степень полимеризации в области угла швеллера. Сплошная линия – расчет без учета влияния теплового зазора, пунктир – с учетом зависимости теплообмена между фильерой и брусом от величины зазора

## Выводы

1. В рамках ПП ABAQUS реализована термо-механо-химическая модель КМ с термореактивной матрицей для однонаправленного армирования и армирования тканью.
2. Выполнено численное моделирование процесса вытяжки мостового швеллера, сечение которого имеет комбинированную схему армирования.
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

- Сафонов А.А.* Математическое описание процесса полимеризации при пултрузионной вытяжке // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. №2. С. 103-106.
- Сафонов А.А.* Математическое моделирование механики технологического процесса пултрузии стеклопластиковых изделий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2006.
- Сафонов А.А.* Оптимизация режимов пултрузионного процесса вытяжки цилиндрических стержней // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2007. №2. С. 124-128.
- Сафонов А.А., Константинов А.Ю., Сергеичев 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.
- 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.
- Baran I., Tutum C. C., Nielsen M. W., Hattel J. H.* Process induced residual stresses and distortions in pultrusion // Composites B. 2013. Vol. 51. P. 148-161.
- Bogetti T.A., J.W. Gillespie Jr.* Process-Induced Stress and Deformation in Thick-Section Thermoset Composite Laminates // Journal of Composite Materials 26 (5), 1992. P. 626-660.
- 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.