

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 004.942

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
ДЛЯ УПРЕЖДЕНИЯ КОРОБЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**© 2021 г. Л. П. Шабалин<sup>1,\*</sup>, Е. А. Пузырецкий<sup>1</sup>, И. Н. Сидоров<sup>1</sup>, А. М. Гирфанов<sup>1</sup><sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,  
Казань, Россия

\*e-mail: leonid.shabalin@gmail.com

Поступила в редакцию 31.07.2020 г.

Принята к публикации 18.12.2020 г.

Статья посвящена проблеме остаточных напряжений, возникающих в процессе отверждения изделий из полимерных композиционных материалов и приводящих к короблению. Предложена расчетная методика, позволяющая прогнозировать остаточные деформации и проектировать формообразующую оснастку с упреждением. Использование разработанного подхода позволяет обеспечить высокую точность изготовления изделий из ПКМ. Проведен анализ влияния параметров модели на точность результатов.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, коробление, упреждение технологической оснастки, отверждение, композитный материал, методика

DOI: 10.31857/S0235711921020127

В настоящее время широкое применение в авиакосмической отрасли нашли композиционные материалы. Они получили широкое распространение в первую очередь благодаря своей высокой удельной прочности, способности выдерживать динамические нагрузки и возможности изготовления изделий любых форм и размеров. Однако имеются и недостатки, обусловленные анизотропией материалов. В процессе изготовления изделия из ПКМ подвергаются короблению. Коробление – это искажение формы тела под действием остаточных напряжений. В связи с этим, большая часть продукта оказывается бракованной по причине того, что не соответствует заявленным требованиям по точности изготовления. Но даже если изделие проходит контроль качества, оно частично деформируется при монтаже в конструкцию, т.к. геометрические параметры не соответствуют номинальным [6–14]. Это говорит о том, что изделие будет эксплуатироваться с заведомо более высокими внутренними напряжениями, что может привести к его скорой, непредвиденной поломке [1–4].

Условно существуют два подхода для решения данной проблемы – аналитический и конечно-элементный. Аналитический подход имеет значительные ограничения по сложности геометрии рассматриваемой конструкции и не всегда дает точные результаты. Проводились эксперименты по сравнению сходимости результатов конечно-элементного (КЭ) расчета величины Spring-In эффекта (“схлопывание угла”) с использованием различных способов задания модели материала. В работе [15] приводится сравнение классической упругой модели материала и модели CHILE (cure hardening instantaneous linear elastic). Модель CHILE традиционно считается более точной, т.к. учитывает изменение характеристик композиционного материала в зависимости от температуры и степени полимеризации матрицы. Но результаты исследования, на

**Таблица 1.** Сопоставление моделей материала

Форма изделия	Эксп. значение	Упругая модель/погрешность	CHILE модель/погрешность
С-профиль	1.00°	1.00°/0.0%	1.00°/0.0%
Носовая часть крыла самолета	0.91 мм	0.96 мм/5.5%	0.98 мм/7.7%

примере двух различных геометрий, показали, что упругая модель дает большую сходимость с результатами эксперимента (табл. 1). Под деформацией, в данном случае понимается изменение угла изделия для С-профиля и максимальные перемещения для геометрии носовой части крыла самолета.

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что использование более простой упругой модели для КЭ-анализа коробления является допустимой инженерной практикой.

В некоторых работах приводится аналитический метод прогнозирования Spring-In эффекта. Экспериментальным путем получена формула, позволяющая вычислить величину схлопывания угла композитного изделия [2]. Отметим, что формула была получена для частного вида ортогонального армирования на изделии, геометрия которого не зависит от продольной координаты. В случае, если рассматривается элемент сложной геометрии или другого вида армирования, то зависимость может быть другой.

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{ТКС}} + \Delta\theta_{\text{Х}} = \theta \left( \frac{(\alpha_{\text{П}} - \alpha_{\text{С}})\Delta T}{1 + \alpha_{\text{С}}\Delta T} \right) + \theta \left( \frac{\varphi_{\text{П}} - \varphi_{\text{С}}}{1 + \varphi_{\text{С}}} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta\theta_{\text{ТКС}}$  – термический компонент схлопывания;  $\Delta\theta_{\text{Х}}$  – компонент химической усадки;  $\theta$  – начальный угол;  $\alpha_{\text{П}}$  – КЛТР вдоль армирования композита;  $\alpha_{\text{С}}$  – КЛТР по толщине ламината (либо КЛТР связующего);  $\Delta T$  – перепад температур режима полимеризации;  $\varphi_{\text{П}}$  – химическая усадка вдоль армирования композита;  $\varphi_{\text{С}}$  – химическая усадка по толщине ламината (либо усадка связующего).

В некоторых случаях сходимость с экспериментальными данными составляет до 50%.

В работе [16] предлагается модифицированная версия уравнения (1). Было учтено изменение свойств материала в зависимости от температуры, степени полимеризации и фазы связующего. Удалось добиться удовлетворительной сходимости с результатами экспериментов.

Рассмотренные подходы обладают различной степенью сходимости с экспериментом. Наиболее точными результатами обладают исследования на основе конечно-элементного моделирования.

**Описание методики расчета.** Предлагаемая методика расчета остаточных напряжений и упреждения оснастки основана на конечно-элементном подходе с использованием CAE/CAD программных комплексов ANSYS, GOM Inspect, Geomagic Design X.

Расчеты проведены на примере модели разделителя потоков турбореактивного двигателя, изготавливаемого из препрег HEXCEL M56 (рис. 1а). Данная модель выбрана ввиду ее простоты и малых габаритов.

Конечно-элементное моделирование процесса отверждения детали включает последовательность решения задачи нестационарного теплообмена и определения напряженно-деформированного состояния в квазистатической постановке.

Исходными данными являются физико-механические характеристики (ФМХ) препрега, тепловой режим полимеризации, параметры уравнения автокаталитической реакции отверждения. При этом, ФМХ препрега зависят от состояния материала (“жидкое”, гелеобразное, отвержденное).

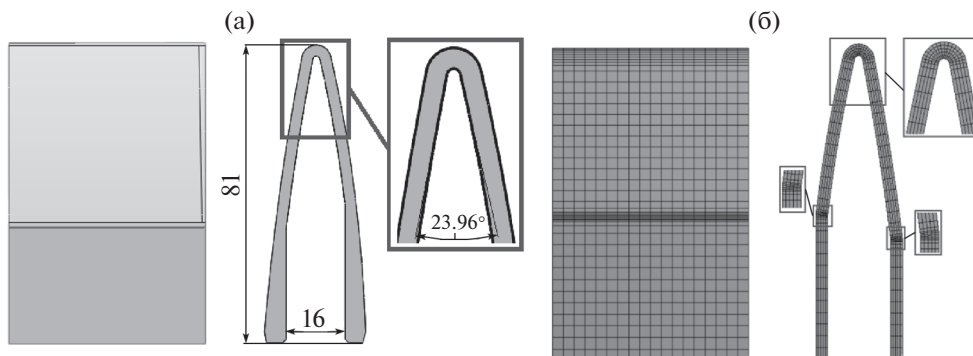


Рис.1. Исходная модель изделия: (а) – геометрическая; (б) – конечно-элементная.

**Геометрия и конечно-элементная модель образца.** Для КЭ-анализа необходимо построение структурированной КЭ-модели (рис. 1б).

Сетка строилась с использованием гексаэдрических элементов с уточнением в местах скруглений для лучшего описания углов.

**Используемые материалы.** В табл. 2, 3 представлены характеристики материала Hex-PLY M56/40%/193PW/AS4-3K, использованного при изготовлении натуральных образцов и изделий.

Модель материала, использованную в расчетах, можно представить комбинацией упругих, теплофизических и физико-химических параметров. В основе лежит упругая ортотропная модель, дополненная ортотропными характеристиками линейного температурного расширения и теплопроводности, теплоемкости, а также моделью отверждения ACCS (ANSYS Composite Cure Simulation). Модель материала описывает его поведение в трех фазах – жидкой, гелеобразной и твердой.

На величину коробления оказывает существенное влияние несколько факторов, таких как химическая усадка, кинетика отверждения связующего, коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР). Следует заметить, что химическая усадка происходит только в связующем. Поэтому необходимо, также, учитывать объемное содержание в нем волокон (коэффициент наполнения,  $k$ ) [19].

Таблица 2. Физико-механические характеристики материала

Характеристика	Величина	
	В “жидком” и гелеобразном состоянии	В твердом состоянии
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1580	
$E_x, E_y$ , МПа	59310	65900
$E_z$ , МПа	6210	6900
$\mu_{xy}$	0.044	0.04
$\mu_{yz}, \mu_{xz}$	0.33	0.3
$G_{xy}$ , МПа	3150	3500
$G_{yz}, G_{xz}$ , МПа	2430	2700

**Таблица 3.** Характеристики материала расчета теплообмена и отверждения

Коэффициент линейного теплового расширения X и Y, $\alpha_{Lx}, \alpha_{Ly}, C^{-1}$	$1.45 \times 10^{-6}$
Коэффициент линейного теплового расширения Z, $\alpha_{Lz}, C^{-1}$	$3.75 \times 10^{-5}$
Теплопроводность в направлениях X, Y, $\kappa_X, \kappa_Y, Вт/м/С^{-1}$	3
Теплопроводность в направлении Z, $\kappa_Z, Вт/м/С^{-1}$	0.658
Теплоемкость, С, Дж/кг/С <sup>-1</sup>	1300
Энергия активации, $E_A, Дж$	69500
Предэкспоненциальный фактор, $A, с^{-1}$	63000
Коэффициент $m$ , уравнения автокаталитической реакции	0.5
Коэффициент $n$ , уравнения автокаталитической реакции	1.5
Коэффициент наполнения, $k$	0.5742
Начальная степень отверждения связующего, $\alpha_0$	0.0001
Максимальная степень отверждения связующего, $\alpha_k$	0.9999
Степень отверждения гелеобразования, $\alpha_r$	0.33
Начальное значение температуры стеклования, $T_0, С$	2.67
Конечное значение температуры стеклования, $T_k, С$	218.27
Параметр $\lambda$	0.4708
Химическая усадка в направлениях X, Y, $\varphi_X, \varphi_Y, мм/мм$	0.001
Химическая усадка в направлении Z, $\varphi_Z, мм/мм$	0.01

**Схема армирования.** В исследовании использована укладка со схемой армирования  $[0; 90]_s$ . Общее количество слоев – 14; толщина монослоя – 0.214 мм. Такая укладка обеспечит минимальное коробление изделия, т.к. преобладающим для данной геометрии является “Spring-In”-эффект, который приводит к схлопыванию углов изделия.

**Граничные условия.** Граничными условиями расчета процесса формования изделия являются: изменение температуры поверхности стекателя в процессе печного формования, внешнее давление, оказываемое вакуумным мешком, ограничение перемещения изделия по внутренней поверхности, имитирующее оснастку и ограничение смещения модели как единого целого.

Для расчета полимеризации изделия был задан режим формования согласно паспорту материала (табл. 4).

В расчетах использована автокаталитическая модель кинетики отверждения

$$f(T, a) = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{T}\right) a^m (1 - a)^n, \quad (2)$$

где  $A_1$  – предэкспоненциальный множитель. Физический смысл  $A_1$  – количество соударений молекул взаимодействующих веществ в секунду. Единица измерения  $[1/с]$ ;  $E_1$  – энергия активации. Физический смысл – энергия, которой необходимо обладать системе взаимодействующих молекул, чтобы произошла реакция. Единица измерения [Дж];  $T$  – абсолютная температура. Единица измерения [К];  $a$  – степень полимеризации связующего;  $m, n$  – коэффициенты, определяющиеся эмпирическим путем.

**Анализ результатов.** Результатом анализа являются эпюры перемещений узлов расчетной модели (рис. 2а).

**Таблица 4.** Температурный режим отверждения препрега

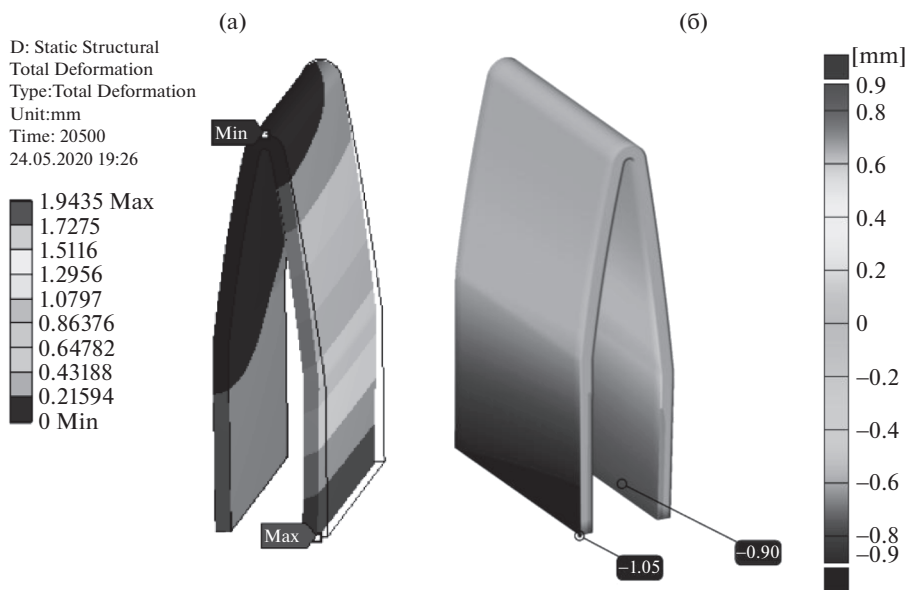
Этап	T, °C	Время, мин	Основная функция
0	20	0.0	нагрев
1	110	45.0	нагрев
2	110	105.0	полимеризация
3	180	140.0	нагрев
4	180	260.0	полимеризация
5	90	290.0	охлаждение
6	40	300.0	охлаждение

Для более точного анализа коробления использован программный комплекс GOM Inspect, который позволяет работать с облаком точек и сеточными моделями. С его помощью узлы деформированной сеточной модели и соответствующие им точки номинальной CAD-модели были совмещены по наилучшему совпадению. Далее были получены эпюры отклонений (рис. 2б).

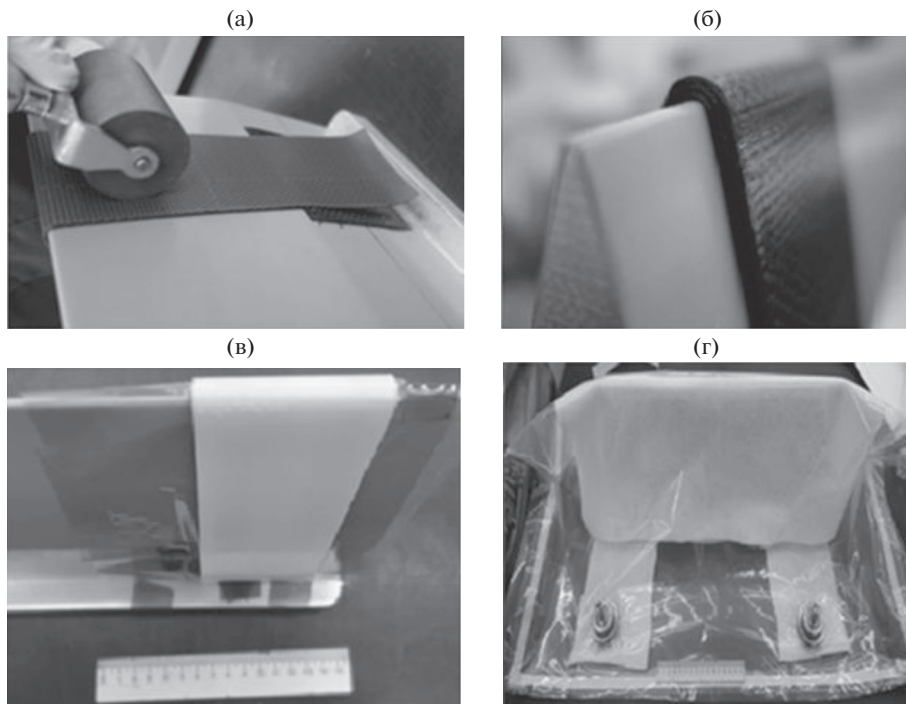
Таким образом, величина схлопывания нижних кромок составляет 1.95 мм или  $0.6971^\circ$ .

**Изготовление образцов.** Для оценки сходимости результатов КЭ-анализа с экспериментом, были изготовлены натурные образцы (рис. 3).

**Метрологический контроль геометрических параметров образцов.** Готовый образец был измерен при помощи электронного штангельциркуля. Производилось измерение расстояния между нижними кромками для трех образцов. Результаты в сравнении с расчетными данными представлены в табл. 5.



**Рис. 2.** Эпюры отклонения изделия после снятия с оснастки: (а) – расчетное перемещение узлов, (б) – отклонение геометрии от номинальной.



**Рис. 3.** Этапы формования изделия: (а) – выкладка и прикатка заготовок валиком; (б) – выложенный пакет слоев в зоне сгиба; (в) – укладка перфорированной пленки и силиконовой цуаги Penta; (г) – выкладка дренажной ткани и формирование вакуумного мешка.

**Сопоставление результатов конечно-элементного анализа и аналитического.** Фактическое значение составляет 14 мм. Следовательно, согласно эксперименту, схлопывание угла составляет  $0.7174^\circ$ . Таким образом, погрешность результатов КЭ-расчета с экспериментальными данными составляет

$$\delta_{\text{МКЭ}} = \frac{0.7174 - 0.6971}{0.7174} \times 100\% = 2.83\%.$$

Полученный результат говорит о хорошей сходимости КЭ-анализа с экспериментальными данными.

Аналитический метод расчета схлопывания угла, предложенный в [2] показал что

$$\Delta\theta = 23.96^\circ \left( \frac{(1.45 - 37.5) \times 160 \times 10^{-6}}{1 + 37.5 \times 160 \times 10^{-6}} \right) + 23.96^\circ \left( \frac{0.001 - 0.01}{1 + 0.01} \right) = -0.3506^\circ.$$

**Таблица 5.** Сопоставление расчетного и фактического схлопывания

№	Фактическое значение, мм	Номинальное значение, мм	Расчетное значение, мм
1	14.01	16	14.0565
2	13.98		
3	14.01		

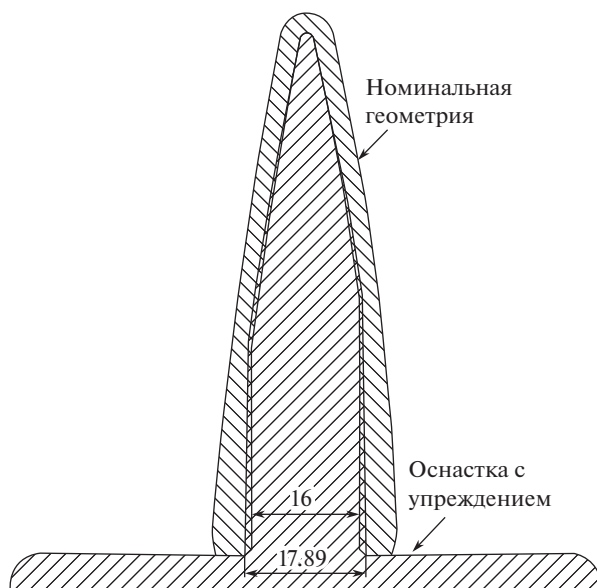


Рис. 4. Номинальная геометрия изделия и геометрия оснастки с упреждением. Размеры в мм.

Погрешность результатов аналитического расчета с экспериментальными данными составляет

$$\delta_{AP} = \frac{0.7174 - 0.3506}{0.7174} \times 100\% = 51.13\%. \quad (3)$$

Соотношение (3) не обладает достаточной степенью точности.

**Верификация расчетной методики.** Заключительным этапом методики является проектирование оснастки с упреждением и расчет коробления.

**Упреждение оснастки.** После анализа данных о деформации изделия, полученных из расчетов, угол был увеличен на  $0.6971^\circ$ . Предположим, что на готовом изделии величина схлопывания угла будет аналогичной и по результатам обмера будет получено изделие требуемой точности. То есть, формообразующая поверхность оснастки проектируется из внутренней поверхности изделия, где угол увеличен на  $0.6971^\circ$ . В результате угол на оснастке должен составлять  $24.6571^\circ$ , что на  $0.6971^\circ$  больше, чем в номинальной геометрии (рис. 4). Допускаемые значения отклонения рабочей поверхности готового изделия от номинальной геометрии  $\pm 0.3$  мм. Далее проводится повторный КЭ-анализ коробления геометрии с упреждением.

**Конечно-элементный анализ с учетом упреждения.** Результаты КЭ-анализа геометрии с упреждением и дальнейшее наложение деформированной сеточной модели на номинальную геометрию показали отклонение не более 0.1 мм, что соответствует требуемой точности. На основе скорректированной геометрии проектируется технологическая оснастка и изготавливается изделие.

**Метрологический контроль готового изделия с упреждением** производился с помощью 3D сканера Atos II Triple Scan (рис. 5).

Максимальное отклонение не превышает 0.16 мм. Оснастка без упреждения позволяет получить изделие с отклонением порядка 2 мм, что недопустимо.

Изделие с номинальной геометрией, полученное в ходе исследования, представлено на рис. 6.

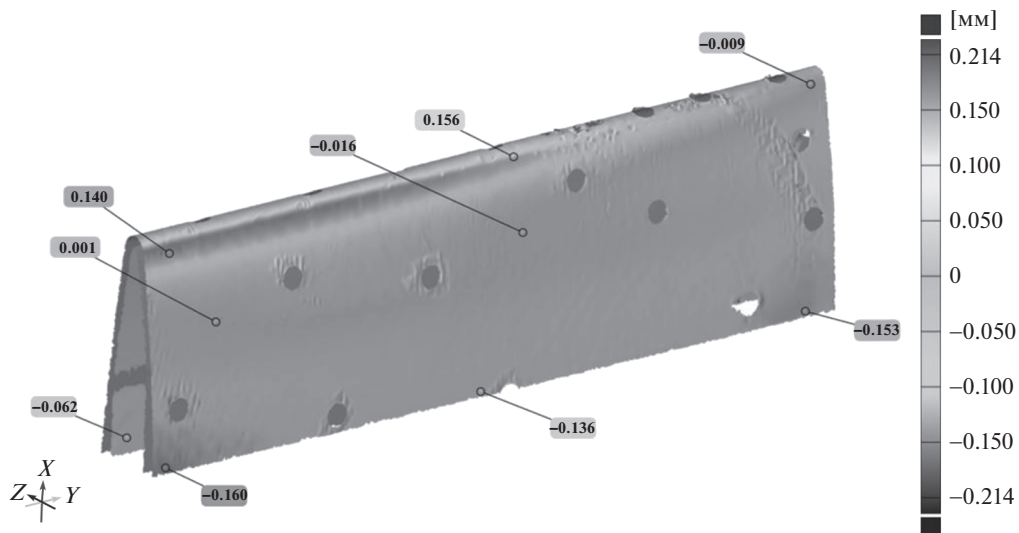


Рис. 5. Эпюра отклонений модели с упреждением относительно номинальной.

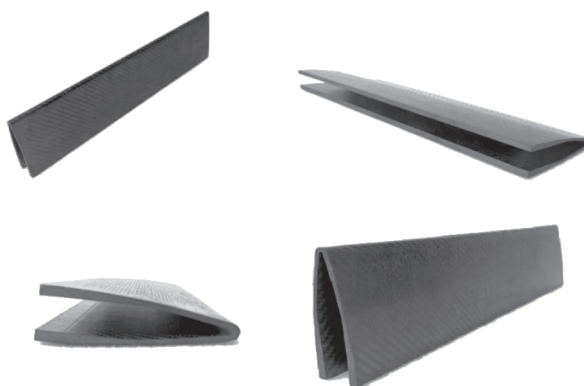


Рис. 6. Готовое изделие.

Расчетная модель виртуального процесса отверждения строится на основе характеристик материала, полученных в ходе механических и химических экспериментов. Были выделены следующие характеристики, влияющие на коробление: КЛТР, химическая усадка и кинетические параметры уравнения отверждения связующего.

**Определение параметров уравнения полимеризации.** Параметрами уравнения отверждения являются предэкспоненциальный множитель  $A_1$ , энергия активации  $E_A$  и коэффициенты  $m$  и  $n$ , отвечающие за порядок реакции. Эти характеристики определяются с помощью методики дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Сущность методики заключается в том, что испытуемый образец выдерживается при постоянной температуре в процессе протекания экзотермической реакции. По результатам анализа получают суммарную теплоту реакции. Для получения кинетических параметров используют данные по тепловому потоку и суммарной теплоте реакции с применением различных моделей (автокаталитических реакций  $n$ -го порядка Шестака–Берггрена или Аврами), либо модели независимого анализа [17]. Опираясь



**Таблица 6.** Сводные данные по оценке влияния входных параметров

Параметр	Диапазон выборки	Коэф. детерминации $R^2$	Коэф. корреляции $r_s$
Коэффициенты линейного температурного расширения			
$\alpha_{Lx}, \alpha_{Ly}, \text{C}^{-1}$	$1.305 \times 10^{-6} - 1.595 \times 10^{-6}$	0.001	0.08
$\alpha_{Lz}, \text{C}^{-1}$	$3.375 \times 10^{-5} - 4.125 \times 10^{-5}$	0.99	0.99
Химическая усадка			
$\Phi_x, \Phi_y, \text{мм/мм}$	0.0008–0.0012	0.0006	0.12
$\Phi_z, \text{мм/мм}$	0.008–0.012	0.99	0.99
Параметры автокаталитического уравнения			
$A_1, \text{c}^{-1}$	62750–76750	0.011	–0.04
$E_A, \text{Дж}$	58500–71500	0.9	–0.97
Коэффициент $m$	0.45–0.55	0.005	–0.13
Коэффициент $n$	1.35–1.65	0.043	–0.22

на ключевые параметры эксперимента, подбирают параметры уравнения таким образом, чтобы результаты машинного вычисления степени полимеризации и суммарной теплоты реакции образца совпали с экспериментальными. Точность методики ДСК определяется, в основном, точностью измерения температуры образца термометрами и точностью используемой модели автокаталитической реакции.

Химическая усадка определяется путем измерения плотности материала в “жидком” и отвержденном состояниях. Измерения проводятся с помощью гелиевого пикнометра, позволяющего с высокой точностью определять плотность материала в различных направлениях. Таким образом, можно определить химическую усадку, которая будет являться отношением плотностей. Химическую усадку в различных направлениях можно экспериментально измерить с помощью кварцевого dilatометра и катетометра [18]. Кварцевый dilatометр позволяет с высокой точностью определять изменение длины образцов при изотермической выдержке.

В рассмотренных испытаниях возникает некоторая погрешность, связанная с методикой их проведения, что приводит к искажению результатов моделирования.

**Влияние точности определения параметров.** Проведена оценка степени влияния точности определения отдельных параметров на величину схлопывания угла (эффект Spring-in).

Параметры расчетной модели разделены на три группы: 1) химическая усадка в осях ортотропии; 2) коэффициенты линейного температурного расширения в осях ортотропии; 3) параметры автокаталитического уравнения отверждения.

Для каждой группы параметров проведена оценка корреляции входных параметров по выборке от 12 до 20 вычислительных экспериментов. В качестве выходного параметра использована величина схлопывания стекателя. Диапазон изменения каждого входного параметра составляет порядка  $\pm 10\%$ . Качественная картина линейной связи величин определяется коэффициентом корреляции Спирмена, который вычисляется по формуле

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n-1)(n+1)} \sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2.$$

Равенство  $r_s = 1$  указывает на строгую прямую зависимость,  $r_s = -1$  на обратную. Сводные данные по группам приведены в табл. 6. В каждой группе определены параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на коробление, и проведена за-

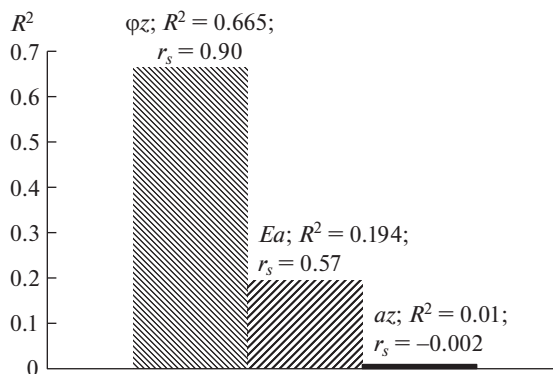


Рис. 7. Влияние основных входных параметров на коробление;  $R^2$  – коэффициент детерминации.

ключительная оценка влияния среди этих параметров. Диаграмма коэффициента детерминации параметров химической усадки  $\varphi_z$ , энергии активации  $E_A$  и КЛТР  $\alpha_{Lz}$  приведена на рис. 7. На соответствующие столбцы нанесены коэффициенты корреляции  $r_s$ .

Проведенное исследование показывает, что, по крайней мере, в случае преобладания эффекта Spring-In в характере коробления изделий из ПКМ, определяющими параметрами расчетной модели являются химическая усадка по толщине пакета слоев и энергия активации автокаталитического уравнения отверждения. Ошибка в определении рассмотренных параметров может привести к некорректным результатам. Все остальные рассмотренные параметры не оказывают существенного влияния на коробление предложенной конструкции.

**Заключение. 1.** Предложена методика конечно-элементного расчета коробления изделий из ПКМ и упреждения формообразующей оснастки. **2.** Модели верифицированы по результатам контроля изготовленных натуральных образцов. **3.** Проведена оценка корреляции входных параметров модели с величиной коробления.

Методика расчета коробления и создания оснастки с упреждением позволяет еще на этапе проектирования изделия учесть влияние коробления на геометрические параметры конструкции. Это приводит как к существенному увеличению точности готового изделия, так и к снижению уровня внутренних напряжений.

Согласно проведенным экспериментам, погрешность методики составляет от 0.5% до 6.5%. Погрешность вычисляется из характерного геометрического параметра изделия. Применение разработанной методики при изготовлении образцов стекателей позволило снизить остаточные деформации более чем в 12 раз.

Основным недостатком предлагаемой методики является использование данных физико-химических испытаний, требующих высокой достоверности.

Проведенная оценка влияния входных параметров позволила выделить ключевые для эффекта Spring-in. В дальнейшем, необходимо уделить особое внимание методикам проведения экспериментов и точности определения исходных параметров модели материала, оказывающих существенное влияние на остаточные деформации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузырецкий Е.А. Анализ проблемы коробления изделий из композиционных материалов // Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных трудов 9-й Международной научно-технической конференции. Курск. 2020. Т. 2.
2. *Carolyn A., Goran F.* Spring-in and warpage of angled composite laminates // *Composites Science and Technology*. 2002. V. 62. Iss. 14. P. 1895.
3. *Huang C.K., Yang S.Y.* Short communication – warping in advanced composite tools with varying angles and radii // *Composites Part A*. 1997. V. 28. Iss. 9–10. P. 891.
4. *Nelson R.H., Cairns D.S.* Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure // *Proceedings of Tomorrow's Materials: Today Society for the Advancement of Material and Process Engineering*. 1989. V. 2397. P. 410.
5. *Perrin H.-F., D'acunto A., Martin P., Cauchois J.-P.* Spring-in of composite parts manufactured by liquid resin infusion (Iri) processes // 14-th European conference on composite materials 7–10 June 2010, Budapest, Hungary.
6. *Fernlund G., Rahman N., Courdji R., Bresslauer M., Poursartip A., Willden K., Nelson K.* Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and the lay-up on the dimensional stability of autoclave-processed composite parts // *Composites Part A: Manufacturing*. 2002. V. 13 (3). P. 341.
7. *Fernlund G., Poursartip A.* The effect of tooling material, cure cycle, and tool surface finish on spring-in of autoclave processed curved composite parts // *Proceedings of the 12-th International Conference on Composite Materials (ICCM12)*. 1999. 690 p.
8. *Radford D.W., Diefendorf R.J.* Shape instabilities in composites resulting from laminate anisotropy // *J. of Reinforced Plastics and Composites*. 1993. V. 12. P. 58.
9. *Rennick T., Radford D.W.* Components of manufacturing distortion in carbon fiber/epoxy angle brackets // *Proceedings of the 28-th International SAMPE Technical Conference*. 1996. P. 189.
10. *Kim C.G., Kim T.W., Kim I.G., Jun E.J.* Spring-in deformation of composite laminated bends // *Proceedings of the 7-th international conference on composite materials (ICCM7)*. 1989. P. 83.
11. *Patterson J.M., Springer G.S., Kollar L.P.* Experimental observations of the spring-in phenomenon // *Proceedings of the 8th international conference on composite materials (ICCM8)*. 1991.
12. *Wiersma H.W., Peeters J.B., Akkerman R.* Prediction of springforward in continuous-fibre/polymer l shaped parts // *Composites Part A*. 1998. V. 29. Iss. 11. P. 1333.
13. *Radford D.W., Rennick T.* Separating sources of manufacturing distortion in laminated composites // *J. of Reinforced Plastics and Composites*. 2000. V. 19 (8). P. 621.
14. *Johnston A., Hubert P., Fernlund G., Vaziri R., Poursartip A.* Process modeling of composite structures employing a virtual autoclave concept // *Science and Engineering of Composite Materials*. 1996. V. 5 (3–4). P. 235.
15. *Galińska A.* Material Models Used to Predict Spring-in of Composite Elements: a Comparative Study Applied Composite Materials. 2016. V. 24 (1). P. 159.
16. *Ding A., Wang J., Li S.* Understanding process-induced spring-in of L-shaped composite parts using analytical solution // *Composite Structures*. 2020. V. 250.
17. ГОСТ Р 57996-2017. Композиты полимерные. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Определение энергии активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции.
18. *Kulawik J., Szegłowski Z., Czaplal T., Kulawik J.P.* Determination of glass transition temperature, thermal expansion and, shrinkage of epoxy resins // *Colloid and Polymer Science*. 1989. V. 267. P. 970.
19. *Bondarchuk D., Fedulov B.* Process modeling of carbon-epoxy composites: residual stress development during cure and analysis of free edge effects. *Aviation*. 2019. P. 15–22.  
<https://doi.org/10.3846/aviation.2019.9745>