

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)

На правах рукописи

Афанасьев Александр Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель: - доктор физико-математических наук, доцент
Рабинский Лев Наумович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Лурье Сергей Альбертович

- кандидат физико-математических наук, доцент
Горшков Александр Анатольевич

Ведущая организация: ОАО «Композит», институт неметаллических материалов.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2010г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.125.05 Московского авиационного института (государственного технического университета) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, зал заседаний Ученого совета МАИ

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экземплярах направляйте по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе д. 4, Московский авиационный институт (государственный технический университет), диссертационный совет Д 212.125.05.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета).

Автореферат разослан «13» ноября 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.05 _____ Г.В. Федотенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в авиационной промышленности широкое распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ). Их использование позволяет получить прочную и жесткую конструкцию, имеющую значительно меньшую массу, по сравнению с металлическим аналогом. Кроме того, технология создания сложных изделий из ПКМ зачастую дешевле и практичнее из-за отсутствия многих промежуточных операций, что значительно снижает трудоемкость и расходы на производство. Возможность изменения структуры ПКМ способствует максимальному использованию преимуществ таких материалов и оптимизации конструкции по массовым, жесткостным и прочностным параметрам.

Однако, наряду с очевидными преимуществами использования ПКМ, есть ряд вопросов, ограничивающих их внедрение. Одной из важнейших проблем производства изделий из ПКМ является возникновение остаточного напряженно-деформированного состояния. Как следствие, при сборке конструкции могут возникать трудности с монтажом деформированных деталей, что, в конечном итоге, приведет к возникновению дополнительных монтажных напряжений и снижению несущих свойств конструкции либо к необходимости дополнительной механообработки и усложнению технологического процесса.

Основным фактором, приводящим к возникновению остаточного НДС, является анизотропия свойств ПКМ. Как известно, жесткостные и температурные свойства однонаправленного слоя в продольном и поперечном направлениях значительно отличаются. В зависимости от структуры пакета и характеристик компонентов монослоя (волокна и связующего) линейные деформации слоев могут вызывать искривление панели (изгиб, крутку) и появление остаточных температурных напряжений. Процесс коробления наблюдается в случаях применения несимметричной структуры ПКМ. На практике стремятся использовать пакеты с симметричной укладкой, однако в некоторых случаях добиться симметрии пакета бывает затруднительно и, как правило, связано с особенностью технологии производства данного изделия. В этом случае, необходимо использовать комплекс мер, направленных на снижение коробления изготавливаемых деталей.

Целью работы является разработка методики оценки влияния различных физико-механических факторов на остаточные напряжения и деформации, составление рекомендаций по созданию рациональной структуры композита и методам снижения остаточных напряжений и кривизн.

Согласно поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Разработать методику для исследования влияния физико-механических факторов на остаточные напряжения и деформации панелей из полимерных композиционных материалов.

2. Разработать алгоритм анализа реологии свойств композита, а также исследовать остаточное напряженно-деформированное состояние с учетом внутренних напряжений.
3. Исследовать влияние внутренней структуры композита на остаточные напряжения и деформации, составление рекомендаций по созданию оптимальной структуры ПКМ.
4. Исследовать влияние технологических факторов (начального натяжения волокон, технологических несовершенств) на остаточные напряжения и деформации.
5. Провести комплекс испытаний по определению упругих, предельных и температурных характеристик композита, а также построить диаграммы ползучести полимерного связующего.

Научная новизна состоит в выполнении цикла работ по исследованию остаточного НДС, разработке методики определения остаточного напряженно-деформированного состояния панелей из ПКМ с учетом реологии свойств.

Новые научные результаты данной работы состоят в следующем:

1. На основе классической механики композитов создана методика определения остаточного напряженно-деформированного состояния свободной от закрепления плоской панели из ПКМ.
2. Разработан алгоритм, позволяющий учитывать реологию упругих свойств композита, и рассматривать процесс охлаждения во времени.
3. Разработан и внедрен в использование программный комплекс, основанный на предложенных методиках, позволяющий в кратчайшее время проводить анализ влияния физико-механических факторов на остаточные напряжения и деформации, а также их влияние на общее НДС в процессе эксплуатации.
4. Составлен на основании проведенных исследований список рекомендаций по проектированию рациональной структуры ПКМ.
5. Исследовано влияние особенностей технологического процесса на остаточное НДС.
6. Исследовано влияние упруго-наследственных свойств композита на остаточное НДС.

Практическая ценность и реализация результатов. Проведенное в диссертационной работе исследование позволило:

- выработать основные правила оптимального, с точки зрения остаточного НДС, формирования структуры композита и применения однонаправленных и тканых слоев;
- оценить эффективность использования технологических приемов по повышению точности изготовления и качества изделий;
- оценить влияние несовершенств технологического процесса на остаточное НДС;
- оценить влияние упруго-наследственных свойств полимерного связующего на снижение остаточных напряжений в процессе охлаждения изделия.

Полученные в ходе экспериментальной работы механические и температурные характеристики композита, а также диаграмма ползучести полимерного связующего, могут быть использованы для анализа поведения конструкции из этого материала под воздействием различных физико-механических факторов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были внедрены:

- при анализе остаточного НДС панелей обшивки крыла и центроплана перспективного пассажирского авиалайнера;
- при оптимизации укладки и анализе НДС образца подкрепленной обшивки на сжатие;
- при выполнении работ по грантам РФФИ (код проекта 08-01-290а), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ГК № 02.740.11.0504.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано восемь научных работ, из них три работы опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов кандидатских диссертаций.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика определения остаточного НДС полимерных слоистых композиционных материалов, учитывающая действие температурных, технологических и силовых факторов.
2. Метод анализа остаточного напряженно-деформированного состояния, учитывающий вязкоупругое поведение композита.
3. Результаты анализа влияния структуры композита на остаточное НДС.
4. Результаты анализа влияния технологических факторов (начальное натяжение слоев, локальное перераспределение связующего при формовании) на искривление плоских панелей из ПКМ.
5. Результаты анализа остаточного НДС с учетом упруго-наследственных свойств полимерного связующего.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы.

Объем диссертации: 124 страницы. В диссертации 51 рисунок, 15 таблиц. Список используемой литературы включает 74 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, краткое обоснование ее актуальности, сформулированы цели и задачи. Кроме того дан обзор текущего состояния работ по проблематике диссертационного исследования.

Глава 1 посвящена разработке методики определения остаточного напряженно-деформированного состояния плоских панелей из полимерных слоистых композитов. Ставится задача определения остаточного напряженно-деформированного состояния вследствие охлаждения пластины из слоистого композиционного материала от температуры стеклования до рабочей температуры. Рассматриваемая пластина свободна от закрепления и не подвержена влиянию внешних нагрузок. Вводятся две системы координат: 1) $Oxuz$ – система координат пластины, при этом ось z направлена по толщине пакета; 2) 123 – система координат слоя, при этом ось 1 направлена вдоль армирования, ось 2 перпендикулярна оси 1 и лежит в плоскости слоя, ось 3 – по толщине.

Компоненты линейных деформаций и кривизны рассматриваемой пластины определяются из физических соотношений:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{11} & C_{12} & C_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \\ M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^H \\ N_y^H \\ N_{xy}^H \\ M_x^H \\ M_y^H \\ M_{xy}^H \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}$ – внутренние силовые факторы (определяются из силового расчета конструкции, в данной работе принимались равные нулю в силу отсутствия внешних нагрузок и нулевых статических граничных условий);

$N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T, M_x^T, M_y^T, M_{xy}^T, N_x^H, N_y^H, N_{xy}^H, M_x^H, M_y^H, M_{xy}^H$ – погонные силы и моменты, вызванные охлаждением и начальным натяжением соответственно;

B_{mn}, C_{mn}, D_{mn} – обобщенные жесткости пакета ($m, n = 1, 2, 3$);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}, \kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ – компоненты линейных деформаций и кривизны пакета в плоскости приведения.

Обобщенные жесткости пакета определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} B_{mn} &= I_{mn}^{(0)}, \\ C_{mn} &= I_{mn}^{(1)} - eI_{mn}^{(0)}, \\ D_{mn} &= I_{mn}^{(2)} - 2eI_{mn}^{(1)} + e^2I_{mn}^{(0)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$I^{(r)}_{mn} = \int_0^h b_{mn} Z^r dt = \frac{1}{r+1} \sum_{k=1}^N b_{mn}^{(k)} (Z_k^{r+1} - Z_{k-1}^{r+1}),$$

где e – координата плоскости приведения;

$b_{mn}^{(k)}$ – линейные жесткости k -го слоя, приведенные к осям панели;

Z_k – координата k -го слоя, отсчитываемая от плоскости приведения.

Выражения для усилий и моментов, вызванных охлаждением пластины и начальным натяжением ее слоев, имеют вид:

$$N_x^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{1T}^{(k)} (Z_k - Z_{k-1}),$$

$$N_y^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{2T}^{(k)} (Z_k - Z_{k-1}),$$

$$N_{xy}^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{3T}^{(k)} (Z_k - Z_{k-1}),$$

$$M_x^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{1T}^{(k)} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e(Z_k - Z_{k-1}) \right],$$

$$M_y^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{2T}^{(k)} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e(Z_k - Z_{k-1}) \right],$$

$$M_{xy}^T = \Delta T \sum_{k=1}^N b_{3T}^{(k)} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e(Z_k - Z_{k-1}) \right].$$

(3)

$$N_x^H = \sum_{j=1}^3 N_{1j}^H, N_y^H = \sum_{j=1}^3 N_{2j}^H, N_{xy}^H = \sum_{j=1}^3 N_{3j}^H,$$

$$M_x^H = \sum_{j=1}^3 M_{1j}^H, M_y^H = \sum_{j=1}^3 M_{2j}^H, M_{xy}^H = \sum_{j=1}^3 M_{3j}^H,$$

где $N_{ij}^H = \sum_{k=1}^N [b_{ij}^{(k)} \overline{\varepsilon_{ij}^{(k)}} (Z_k - Z_{k-1})];$

$$M_{ij}^H = \sum_{k=1}^N b_{ij}^{(k)} \overline{\varepsilon_{ij}^{(k)}} \left[\frac{1}{2} (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) - e(Z_k - Z_{k-1}) \right];$$

$\overline{\varepsilon_{n1}^{(k)}}, \overline{\varepsilon_{n2}^{(k)}}, \overline{\varepsilon_{n3}^{(k)}}$ – начальные деформации слоев в осях пластины;

$\overline{\alpha_1^{(k)}}, \overline{\alpha_2^{(k)}}, \overline{\alpha_3^{(k)}}$ – коэффициенты линейного температурного расширения

k -го слоя в осях пластины;

ΔT – перепад температур;

N – число слоев в пакете .

Компоненты напряжений в слоях композита определяются из закона Гука, используя найденные из (1) компоненты деформаций и кривизны рассматриваемой пластины, следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}^{(k)} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}^{(k)} \begin{pmatrix} \varepsilon_x + \kappa_x \cdot z_k - \overline{\alpha_1}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n1}}^{(k)} \\ \varepsilon_y + \kappa_y \cdot z_k - \overline{\alpha_2}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n2}}^{(k)} \\ \varepsilon_{xy} + \kappa_{xy} \cdot z_k - \overline{\alpha_3}^{(k)} \cdot \Delta T - \overline{\varepsilon_{n3}}^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Где z_k – координата срединной поверхности слоя.

Для перехода к компонентам напряжений в осях слоя используется соответствующее преобразование при повороте осей координат.

Алгоритм определения остаточных напряжений и деформаций был автоматизирован и реализован в среде Mathcad.

Более точное моделирование остаточного НДС требует учета влияния температуры на физико-механические свойства композита и их изменение во времени. Существующие экспериментальные данные долговременных испытаний полимерных связующих показывают, что их характерной особенностью является большая продолжительность роста деформаций, увеличивающихся порой в несколько раз за относительно небольшой промежуток времени при действии повышенных температур. В то же время было установлено, что большинство типов волокон (углеродные, стеклянные, борные), применяемых в силовых авиационных конструкциях, обладают сравнительно малой ползучестью, по сравнению с полимерными связующими. Основываясь на этих утверждениях, разработанная методика была дополнена с целью учета реологии свойств.

Для описания упруго-наследственных свойств полимеров наибольшее распространение получила теория наследственности. Нелинейную связь между напряжением и деформацией можно записать с помощью интегрального уравнения, предложенного Работновым Ю.Н.:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma + \int_0^t K(t-\theta) \sigma(\theta) d\theta. \quad (5)$$

Функция $K(t-\theta)$ – ядро ползучести, характеризующее «память» материала.

В случае линейных упруго-наследственных материалов, к которым можно отнести терморезистивные полимеры, $\varphi(\varepsilon) = E\varepsilon$, определение напряжений по заданным постоянным деформациям устанавливается обратным (5) уравнением:

$$\sigma(t) = E(t)\varepsilon. \quad (6)$$

Где $E(t) = E_0 \left(1 + \int_0^t \Gamma(t-\theta) d\theta \right)$ – временная зависимость модуля упругости;

E_0 – модуль упругости при $t=0$ (мгновенный модуль упругости).

В данном случае функция $\Gamma(t-\theta)$ – ядро релаксации, которая определяется в результате экспериментальных работ по кривым релаксации. Однако получение этих кривых на практике бывает затруднительно, поэтому

для определения $\Gamma(t-\theta)$ могут быть использованы также результаты испытаний на ползучесть.

В большинстве случаев функция $\Gamma(t-\theta)$ может быть аппроксимирована имеющей горизонтальную асимптоту экспоненциальной функцией следующего вида:

$$E(t) = H + E_1 e^{-k(t)t} . \quad (7)$$

Где $H = \frac{E_0}{\left(1 + \int_0^{\infty} \Gamma(t-\theta) d\theta\right)}$ – модуль упругости при $t \rightarrow \infty$ (модуль

длительной упругости);

$E_1 = E_0 - H$ - разница между мгновенным и длительным модулями;

$k(t)$ – временной коэффициент.

Имея закон изменения модуля упругости композита (7), можно рассматривать процесс охлаждения пластины из слоистого композита во времени с учетом различных температурных режимов, а также оценить влияние вязкоупругих свойств полимерного связующего на релаксацию внутренних напряжений. Исследование релаксации напряжений было проведено в среде Excel, а алгоритм расчета реализован во встроенной среде разработки VBA.

Глава 2 содержит параметрический анализ влияния конструктивно-технологических факторов на остаточное напряженно-деформированное состояние. Приведены сравнительные результаты влияния структуры слоистого композиционного материала, а также способы ее оптимизации с целью снижения остаточных напряжений и кривизны пластин.

Исследование показало, что несимметричная по толщине структура пластины, содержащая только продольно-поперечные слои, приводит к «седлообразному» деформированному состоянию, применение слоев $\pm\varphi$ вызывает крутку. Симметричная структура пакета позволяет полностью исключить коробление пластины, однако величины внутренних напряжений значительно увеличиваются, при этом компоненты напряжений поперек волокон становятся близки к пределу прочности в этом направлении, что может вызвать появление трещин в полимерном связующем или расслоению композита.

На примере плоских пластин с четырьмя вариантами несимметричных укладок показано влияние начального натяжения ε_0 волокон однонаправленного слоя на остаточное напряженно-деформированное состояние. В зависимости от величины начального натяжения снижение значений компонент кривизны пластины может достигать более 20% (рис. 1). Еще больше снизить коробление пластин позволяет укладка с различным начальным натяжением волокон в слоях. Так для укладки $[0_2/90_2]_3$ (здесь 0 и 90 – значение угла ориентации волокон относительно оси x пластины в градусах для однонаправленных слоев, или направление нити основы для тканых слоев, нижний индекс, идущий после угла ориентации указывает

количество подряд идущих слоев в указанном направлении) при соответствующем подборе величин начального натяжения для каждого слоя компоненты кривизны уменьшились в 19 раз (рис. 2). Для симметричной структуры композита начальное натяжение волокон позволяет снизить остаточные напряжения. Как показало исследование, снижение внутренних напряжений в этом случае может достигать 25%.

При изготовлении сложных интегральных авиационных конструкций из композиционных материалов часто бывает сложно обеспечить симметрию структуры по технологическим причинам. Поэтому для снижения коробления пластин после формования можно использовать «компенсирующие» слои. Анализ их применения на примере плоских пластин показал, что грамотный выбор ориентации и месторасположения таких слоев может не только снизить коробление, но и сделать его управляемым. В качестве примера рассмотрен несимметричный пакет $[45/-45/0_2/45/-45/90_2/45/-45/0_2/45/-45/0_2/45/-45/90_2]$. В первом случае после 90-градусных слоев уложен один нулевой слой $[0]$, во втором случае – уложены слои $[0/45]$, в третьем - $[45/0]$. Расчетные значения компонент кривизны для этих случаев приведены на рис. 3. Применение одного продольного компенсирующего слоя (вариант 1) позволило снизить компоненты кривизны k_x, k_y, k_{xy} . Введение в структуру пакета дополнительного слоя ориентацией 45° привело к изменению знака кривизны k_{xy} и ее абсолютного значения. Наибольший эффект достигается в варианте укладки 3 (компонента k_x снизилась более, чем в 3 раза, k_y – снизилась в 2.4 раза, k_{xy} – 1.6 раза). Картина распределения внутренних напряжений при использовании «компенсирующих» слоев изменилась незначительно.

Одним из перспективных направлений в области создания конструкций из композитов является применение тканых слоев, обладающих значительно меньшей анизотропией свойств. Проведенный в данной работе анализ показал, что замена однонаправленных слоев на тканые позволяет значительно снизить как коробление, так и уровень остаточных напряжений в конструкции. Исследование проводилось на примере укладки $[45/-45/0/45/-45/90]_2$. Рассматривалось 3 варианта: 1) все слои однонаправленные; 2) слои $\pm 45^\circ$ тканые, остальные однонаправленные; 3) все слои тканые. Кроме того, рассмотрено три типа плетения ткани: 1) 1:4 – на одну нить утка приходится 4 нити основы; 2) 2:3 – на две нити утка приходится 3 нити основы; 3) 1:1 – количество нитей основы равно количеству нитей утка.

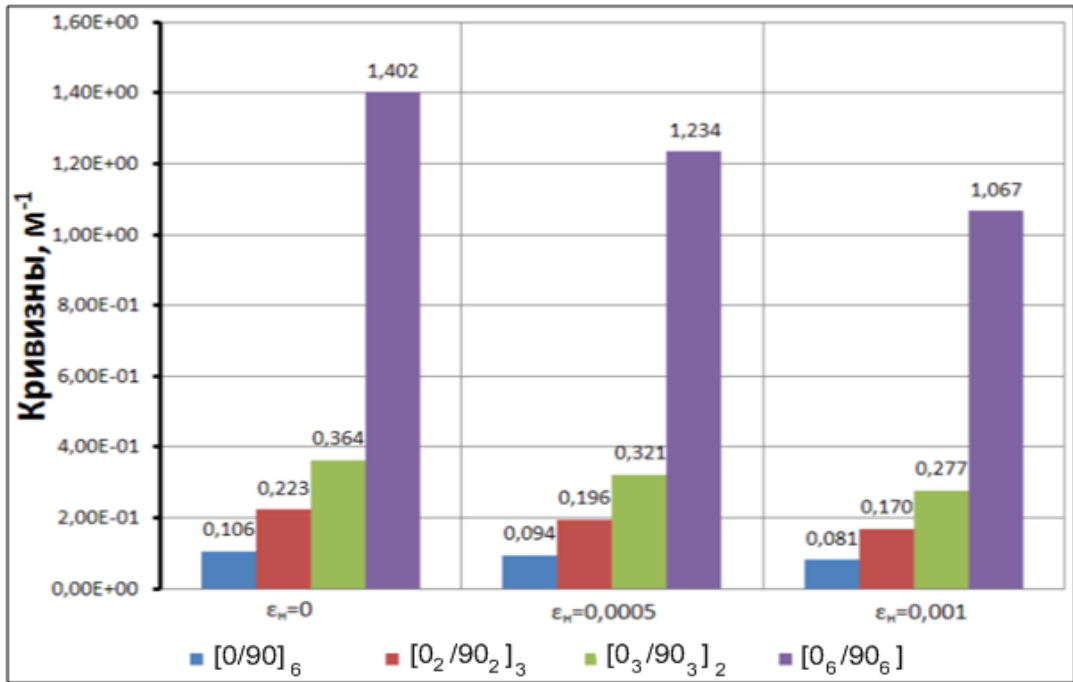


Рис. 1. Зависимость кривизны от величины начального натяжения ϵ_0 .

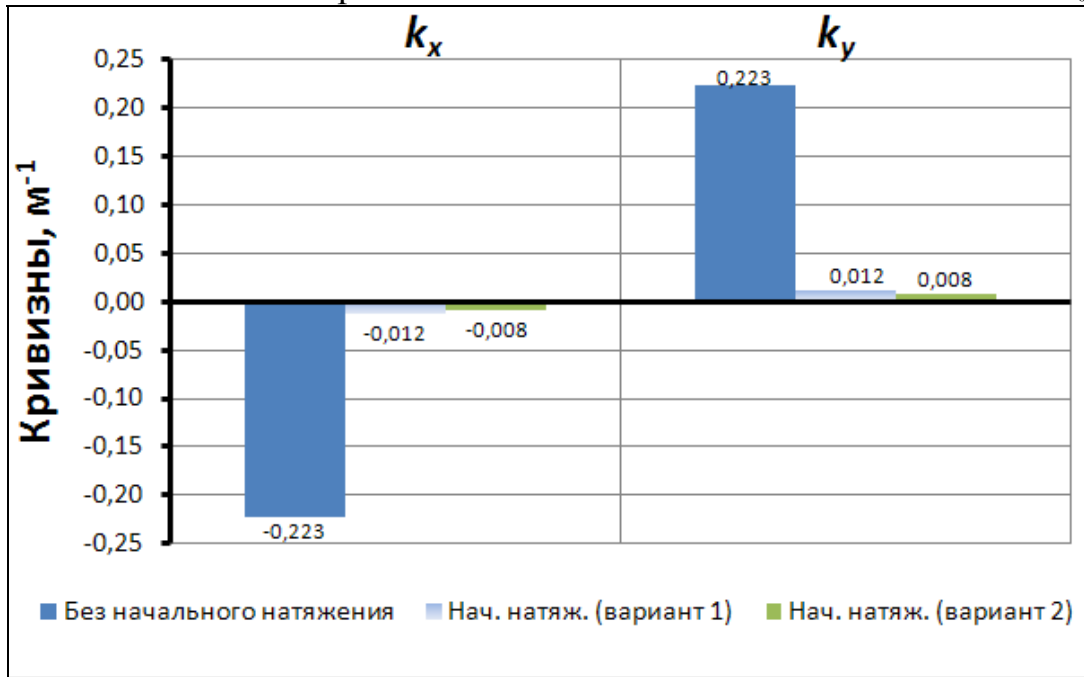


Рис. 2. Влияние переменного по слоям начального натяжения на кривизны k_x , k_y .

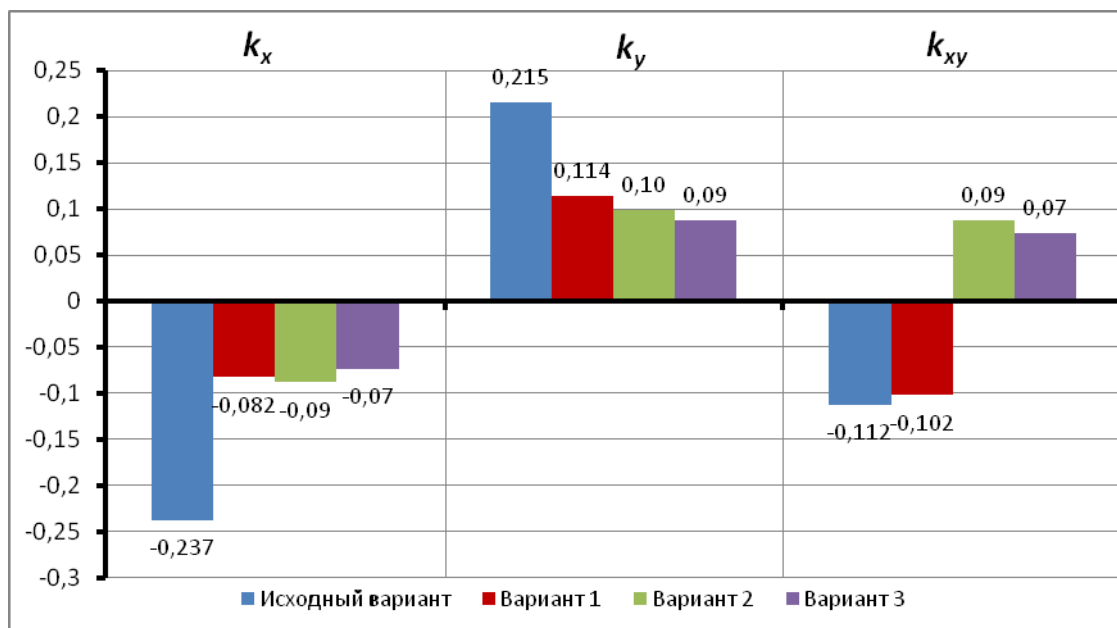


Рис. 3. Расчетные значения компонент кривизны [m^{-1}]

Исследование показало, что замена слоев $\pm 45^\circ$ на тканые снижает крутку, однако прогибы пластины могут даже увеличиться. Замена всех слоев на тканые позволяет снизить все компоненты кривизны (рис. 4), а также значительно уменьшить уровень остаточных напряжений (рис. 5).

На практике было замечено, что в большинстве случаев величина остаточных поперечных напряжений может быть значительно ниже прогнозируемых. Учитывая природу поведения компонентов композиционного материала, а также температурные режимы формования, можно говорить об эффекте релаксации напряжений в полимерном связующем, то есть снижении внутренних напряжений во времени при постоянной деформации. Это происходит за счет изменения механических характеристик смолы, вызванных трансформацией ее структуры под воздействием продолжительных во времени деформаций. Закон изменения модуля упругости в поперечном направлении описывается зависимостью (7), где значения мгновенного и длительного модулей, а также временного коэффициента были определены в ходе эксперимента. Исследование показало, снижение уровня остаточных поперечных напряжений при учете релаксации в процессе охлаждения в течение четырех часов составляет 12%.

Практика изготовления конструкций из полимерных композиционных материалов показывает, что на остаточное напряженно-деформированное состояние могут значительно влиять технологические факторы, приводящие к локальному изменению структуры композита. Такое изменение структуры может коренным образом изменить остаточную деформацию изделия и свести на нет все усилия по его прогнозированию. Исследование влияния неоднородности состава композита было проведено на примере изготовленной автоклавным формованием ореховой панели.

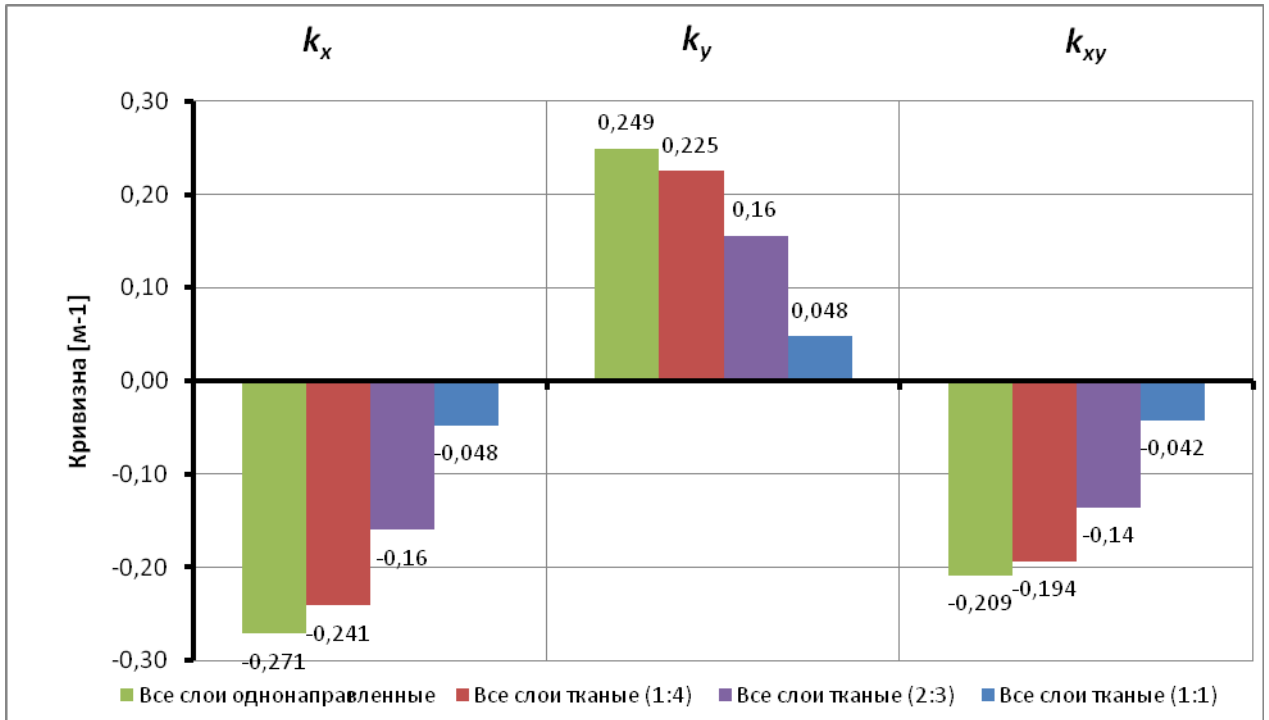


Рис. 4. Расчетные значения компонент кривизны

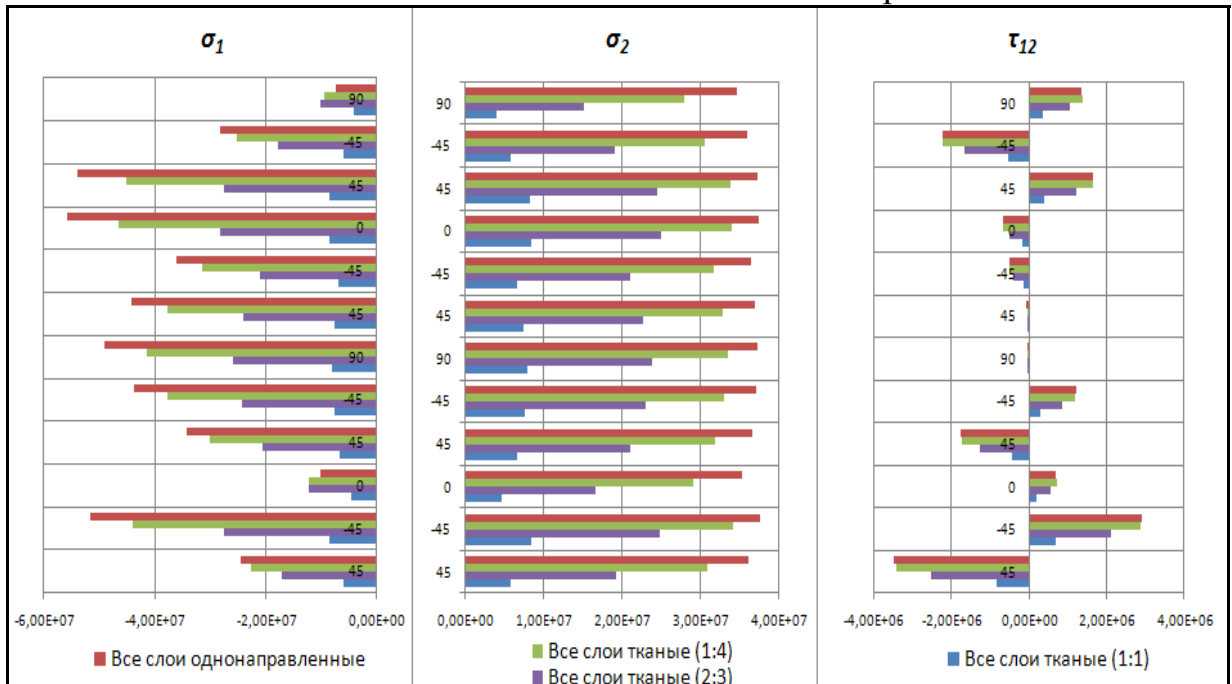


Рис. 5. Распределение напряжений по слоям [Па]

Укладка обшивки [45/0/45/0/45/90/0₆/90/45/0/45/0/45], слои с ориентацией 0° и 90° выложены из однонаправленного препрега, слои 45° – из тканого. Структура пакета симметричная, поэтому коробления панели после охлаждения происходить не должно. Тем не менее, изготовленная панель имела прогиб 4-4.5мм в поперечном направлении. Подробный анализ технологии изготовления и замер толщин обшивки показал наличие местных утолщений, вызванных перераспределением связующего. Наличие отклонений в толщинах и характер их изменения полностью определялся технологией формования. В процессе формования жидкое связующее начинало перетекать из более обжатых мест, неравномерно распределяясь по сечению панели. Это привело к местному увеличению объемного содержания связующего в верхних слоях, вызывая их большую усадку в процессе охлаждения. Исследование неравномерного распределения связующего в данном случае проводилось как с помощью, разработанной в главе 1 методики, так и метода конечных элементов (рис. 6). Разница между полученными в ходе расчетов величинами прогибов составила около 6% и совпала с полученными на изготовленной панели.

Таким образом, проведенное исследование позволило выработать рекомендации по оптимизации структуры композита с целью снижения остаточных напряжений и кривизны, оценить эффективность использования технологических приемов, оценить влияние несовершенств технологического процесса на остаточное напряженно-деформированное состояние, оценить влияние вязкоупругого характера поведения механических свойств полимерного связующего.

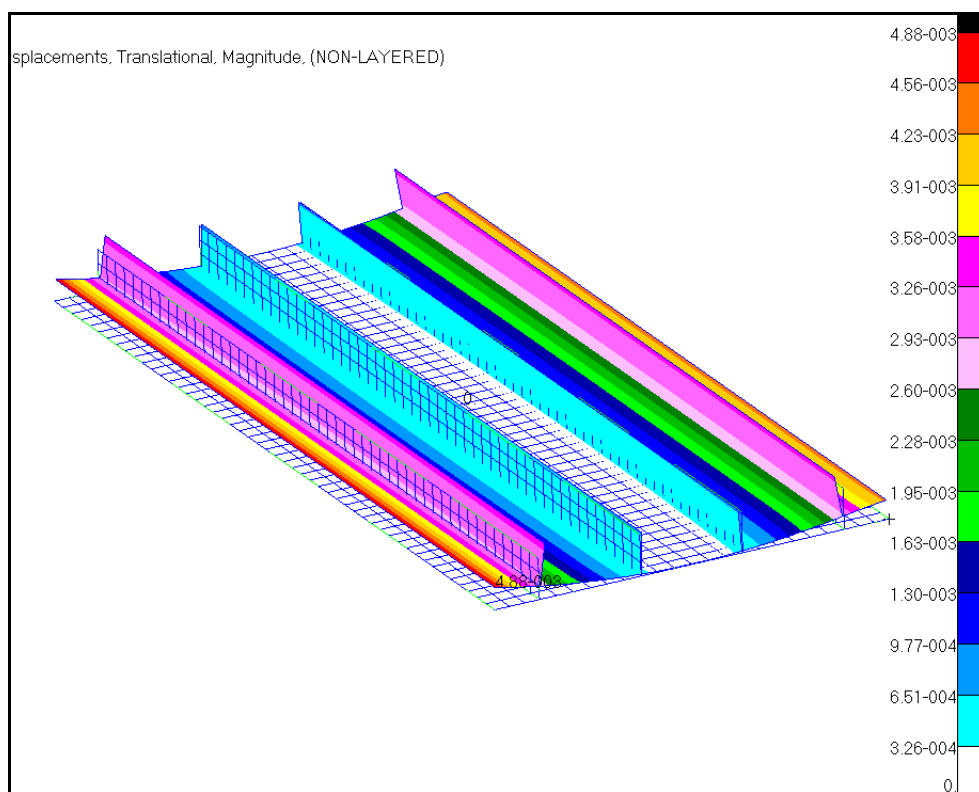


Рис. 6. Перемещения узлов модели [м]

Глава 3 посвящена экспериментальной работе по определению физико-механических свойств композиционного материала.

Определены модули упругости, коэффициент Пуассона, а также предельные характеристики монослоя при растяжении в продольном и поперечном направлениях для однонаправленного и тканого материалов. Испытания проводились на разрывной машине согласно ГОСТ 25601-80.

Проведены испытания образцов из однонаправленного и тканого материалов по определению предельного напряжения межслоевого сдвига методом трехточечного изгиба короткой балки согласно ОСТ 90199-75.

С помощью динамическо-механического анализатора, позволяющего испытывать образцы в условиях повышенных и пониженных температур при сложных режимах нагружения, найдены величины коэффициентов линейного температурного расширения в продольном и поперечном направлениях однонаправленного слоя, а также построены диаграммы ползучести эпоксидного связующего при различных значениях окружающей температуры и действующих напряжений.

Найденные физико-механические характеристики композита были использованы в описанных выше исследованиях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения остаточных напряжений и деформаций плоских панелей из ПКМ, подверженных охлаждению. На ее основе разработан алгоритм расчета и создана программа на ЭВМ, позволяющая в кратчайшие сроки проводить анализ пластин из слоистого композита любой структуры.

2. Создан метод анализа остаточного НДС с учетом упруго-наследственных свойств композиционного материала. С его помощью, было исследовано поведение композита при охлаждении в течение определенного промежутка времени, а также влияние вязкоупругого поведения свойств композита на релаксацию внутренних остаточных поперечных напряжений.

3. В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

- структура композита, составленная из продольно-поперечных слоев, приводит к возникновению «седлообразной» формы деформированного состояния, введение в пакет слоев $\pm\varphi$ вызывает крутку панели.

- в большинстве случаев, для снижения коробления в случае несимметричной структуры пакета, при наличии в пакете большого числа подряд идущих слоев с одинаковой ориентацией, между ними необходимо прокладывать слои с другой ориентацией волокон, при этом уровень остаточных поперечных напряжений в несимметричном пакете несколько ниже, чем в симметричном;

- снизить кривизну панелей из композита можно, располагая рядом слои с взаимно ортогональной ориентацией волокон, однако в этом случае увеличивается уровень остаточных поперечных напряжений;
- также снизить остаточную кривизну панелей можно, применяя компенсирующие слои, их применение может носить локальный характер, а толщина может быть меньше толщины применяемых в регулярных зонах слоев;
- начальное натяжение слоев позволяет значительно уменьшить уровень остаточных напряжений и компонент кривизны, наибольший эффект можно достичь при различном натяжении слоев пакета, величины которых определяются из расчета;
- замена в пакете однонаправленных слоев $\pm\varphi$ на тканые приводит к значительному снижению уровня остаточных напряжений и компонент кривизны при одновременном сохранении прочностных и жесткостных свойств пакета;
- симметричная структура композита позволяет полностью исключить коробление панелей, однако уровень остаточных напряжений в поперечном направлении может достигать значительных величин и быть сопоставимым с пределом прочности в этом направлении;
- учет упруго-наследственных свойств композита позволяет получить более точную картину напряженного состояния, релаксационные процессы, определяющиеся в большей степени свойствами полимерного связующего, дают снижение величины остаточных поперечных напряжений около 12%;
- для получения точной картины напряженно-деформированного состояния необходимо учитывать все особенности технологического процесса формования, которые могут привести к локальному изменению структуры композита (разориентация волокон, перераспределение связующего и т.д.), местное изменение структуры способно значительно изменить деформированное состояние конструкции, и свести на нет попытки все попытки его прогнозирования.

4. В ходе проведенных экспериментальных работ получены следующие свойства однонаправленного и тканого слоев композита: модули упругости в продольном и поперечном направлениях (E_{11} , E_{22}), коэффициенты Пуассона (ν_{21} , ν_{12}), предел прочности при растяжении в продольном и поперечном направлениях (σ_{11} , σ_{22}), предельное напряжение при межслоевом сдвиге (τ_{13}). Для ПКМ, сформированного однонаправленными слоями, построены зависимости коэффициентов линейного температурного расширения (α_1 , α_2) от температуры. Получена диаграмма ползучести полимерного связующего при повышенных температурах и различных уровнях напряжений сжатия, из этой диаграммы определены коэффициенты k , H , E_1 для экспоненциальной аппроксимации закона релаксации модуля упругости (7).

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ИЗДАНИЯХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК

1. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010 –т. 16, №2. - с. 214-222.

2. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Рабинский Л.Н. Влияние тканых слоев на остаточное напряженно-деформированное состояние изделий из полимерных композиционных материалов. // Электр. журнал «Труды МАИ». 2010. - №37.

3. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Рабинский Л.Н. Влияние структуры полимерного композиционного материала на остаточное напряженно-деформированное состояние. // Журнал «Инженерная физика». 2010. - №7. – с. 13-20.

СПИСОК ДРУГИХ ПУБЛИКАЦИЙ

4. Афанасьев А.В., Бешенков С.Н., Рабинский Л.Н. Экспериментальное определение механических прочностных и температурных характеристик полимерного композиционного материала. // Материалы I Всероссийской научно-технической школы-семинара «Компьютерный инжиниринг в промышленности и вузах». – М.: 2009. - с. 9.

5. Афанасьев А.В., Дергачев А.А., Рабинский Л.Н. Влияние прошивки на прочность межслойного сдвига полимерного композиционного материала. // Материалы XV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». – М.: Изд-во «Типография «ПАРАДИЗ». 2009. – с.11.

6. Афанасьев А.В., Комков В.А., Рабинский Л.Н. Определение механических характеристик материалов, состоящих из различных типов КМ // Материалы международной конференции "Математические модели физических процессов" Таганрог: НП «ЦРЛ» 2008 г. - с186.

7. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н. Исследование влияния структуры нерегулярных зон оребренных панелей из композиционных материалов на коробление после процесса формования. // Конференция «Инновации в авиации и космонавтике-2010». 2010. - с. _____.

8. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н. Учет влияния упруго-наследственных свойств полимерного композиционного материала на остаточное напряженное состояние после процесса формования. // Материалы II всероссийской научно-практической студенческой школы-семинара «Компьютерный инжиниринг в промышленности и ВУЗах». – Алушта: 2010. - с. 52.

