

Беляков Евгений Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОГО
ФОРМОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ИСХОДНОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05.02.08 –
Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Тарасов Владимир Алексеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Егоров Виталий Николаевич
доктор технических наук, профессор
ОАО «НИАТ»

Алямовский Андрей Иванович
кандидат технических наук
ОАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»

Ведущее предприятие: РКЗ ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»

Защита состоится «30» мая 2012 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1-м экземпляре, заверенный печатью учреждения, прошу направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8-499-267-09-63

Автореферат разослан «27» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06,
доктор технических наук, доцент



Михайлов В.П.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Возросшая конкуренция на мировом рынке пусковых услуг потребовала повышения энергомассовых характеристик отечественных ракет-носителей, следствием чего является активное расширение компонентной базы полимерных композиционных материалов (ПКМ) в России, включая замену углеродных лент типа ЛУ-П и ЭЛУР на углеродные наполнители на основе жгутов, тканей компаний Porcher Industries и Toho Tenax. При этом наиболее востребованными остаются термореактивное связующее ЭНФБ и его модификации.

Расширение компонентной базы должно сопровождаться применением эффективных технологий изготовления композитных конструкций, к которым относится метод контактного формования. Лишь на этой основе можно обеспечить высокие показатели качества конструкций аэрокосмического назначения из ПКМ, и, в первую очередь, требуемый уровень объемного содержания волокна.

Для обоснованного построения технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ необходимо развитие методов математического моделирования процессов, происходящих при формовании. Изучением метода контактного формования занимались такие научные коллективы и организации, как ЦНИИСМ, МАТИ, НИАТ, РКК «Энергия», ОНПП «Технология», Boeing, Airbus и др. Наиболее известными учёными, которые занимались вопросами формообразования композитов являются Савин А.Г., Васильев В.В., Комков М.А., Томашевский В.Т., Тростянская Е.Б., Дмитриев О.С., Дмитриев А.О., Семенова Е.Г., Gutowski T.G., Loos A.C., Springer G.S. Известные работы в значительной мере раскрыли сущность протекающих процессов и позволили оптимизировать технологические режимы отверждения.

Вместе с этим в процессе интенсификации разработки технологий изготовления ПКМ методом контактного формования представляет значительный интерес обосновать такой режим изменения давления, который обеспечивает снижение затрат и одновременно требуемый для эксплуатации изделия уровень объемного содержания волокна, как одного из важнейших показателей качества композитных конструкций. Такая задача не является тривиальной, т.к. на изменение объемного содержания волокна в процессе формования композита влияет множество факторов: технологические характеристики наполнителя, кинетика и реология процесса отверждения термореактивной полимерной системы наполнитель - связующее, режим изменения давления.

В связи с этим, создание комплекса методического и программно-математического обеспечения для описания процесса уплотнения композита с учетом пространственной структуры наполнителя, кинетики и реологии процесса отверждения препрега является актуальной научно – практической задачей по разработке технологических процессов изготовления конструкций ракетной техники методом контактного формования в условиях расширения компонентной базы ПКМ, решение которой имеет существенное значение для снижения себестоимости изделий.

Целью диссертационной работы является повышение качества продукции и сокращение сроков разработки технологических процессов изготовления композитных конструкций методом контактного формования в условиях расширения компонентной базы полимерных композиционных материалов.

Научная задача работы состоит в создании комплекса методического и программно-математического обеспечения для разработки технологических процессов контактного формования стенки композитной конструкции с учетом особенностей пространственной структуры наполнителя, кинетики и реологии процесса отверждения термореактивной полимерной системы наполнитель – связующее.

Научная новизна работы заключается:

1. В установленной взаимосвязи между важнейшим показателем качества композитной конструкции – объемной долей наполнителя и удельной работой уплотнения препрега, которая выбрана в качестве целевой функции для расчета диаграммы изменения давления при контактном формовании композитной конструкции.

2. В методе согласованного расчета параметров диаграмм изменения давления и температуры воздействия на препрег при контактном формовании композитной конструкции, который с учетом многомерной проницаемости порового пространства, образованного пространственной структурой наполнителя, обеспечивает одновременно необходимую величину объемной доли наполнителя в композиционном материале и минимальные затраты на уплотнение препрега.

3. В методике экспериментально-теоретического описания кинетики и реологии процесса отверждения термореактивной полимерной системы наполнитель-связующее.

4. В методике учета колебаний технологических факторов и свойств исходного сырья при расчете диаграммы изменения давления для метода контактного формования композитных конструкций, которая позволяет исключить брак изделий по допустимому уровню объемной доли наполнителя.

Практическая значимость работы заключается:

- В предложенном комплексе методического и программно-математического обеспечения, который позволяет:
 - a. при заданном температурно-временном режиме прогнозировать степень отверждения, вязкость и время гелеобразования препрега;
 - b. рассчитывать технологические характеристики наполнителя, необходимые для определения эквивалентной проницаемости в условиях близких к промышленному изготовлению композитов;
 - c. определять изменение объемного содержания волокна в препреге при заданных режимах формования;
 - d. осуществлять выбор режима изменения давления, обеспечивающего снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна
- В полученных данных по технологическим характеристикам наполнителя, кинетике и реологии процесса отверждения, динамике уплотнения препрега

на основе связующего ЭНФБ и углеродной ткани, которые рекомендуется использовать при обработке технологических режимов формования аналогичных композитных материалов в машиностроительном производстве, включая производство ракетно-космической и военной техники.

На защиту выносятся следующие научно–практические положения:

1. Результаты исследования динамики уплотнения, кинетики и реологии процесса отверждения препрега на основе связующего ЭНФБ и углеродной ткани арт.3692 компании Porcher Industries.

2. Инженерная методика и ее программно-математическая реализация по расчету технологических характеристик наполнителя, необходимых для определения эквивалентной проницаемости в условиях близких к промышленному изготовлению композитов.

3. Инженерная методика и ее программно–математическая реализация процесса оптимизации технологического режима формования композита по критерию минимальной удельной работы уплотнения, обеспечивающего снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна.

Методы исследований. Теоретические положения работы базируются на использовании численных методов исследования, теории информатики, метода динамического программирования, методов измерений теплофизических, физических и реологических величин.

Экспериментальные исследования проводились на специализированном лабораторном оборудовании в ОАО «ОНПП «Технология» г. Обнинск.

Реализация работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных работ нашли применение на ОАО «ОНПП «Технология» в ходе проведения совместных работ с ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» и ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» при обработке режимов формования изделий из ПКМ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных положений гидромеханики, химической кинетики и реологии полимеров, методов оптимизации, применением известных и апробированных методов экспериментального исследования на аттестованном оборудовании, использованием сертифицированных программно – математических пакетов, хорошей сходимостью результатов аналитических моделей с экспериментальными данными, а также успешным использованием основных положений работы в производстве ракетно-космической техники.

При проведении расчетов использовались программы Microsoft Excel и Mathematica 7.0.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» (Москва, 2007 г.), на XVIII Международной научно–технической конференции «Конструкции и технологии по-

лучения изделий из неметаллических материалов» (г. Обнинск, 2007), на XXXIII Академических чтениях по космонавтике (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2009 г.), на XXXVII Международной молодежной научной конференции (МАТИ, Москва, 2011 г.), на первом международном семинаре «Proceedings of the First International Workshop on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications held at Glyndwr University, Wrexham, North Wales» (Великобритания, Рэксем, 2011 г.), на XXXVI Академических чтениях по космонавтике (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2012 г.).

По материалам диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Содержит 162 страницы, из которых на 116 изложен основной текст, проиллюстрированный 45 рисунками и 17 таблицами. Список литературы состоит из 106 наименований. Приложения содержат 43 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также основные положения и результаты, вынесенные на защиту.

Первая глава посвящена анализу современных тенденций развития рынка наполнителей и связующих, который показал существенное расширение компонентной базы ПКМ для конструкций ракетно-космической техники, значительную востребованность углеродных наполнителей и термореактивных связующих. Показано, что метод контактного формования сегодня наиболее востребован в производстве изделий из ПКМ. В частности, в ракетно-космическом машиностроении рассматриваемый метод широко применяется при изготовлении трехслойных обечаяк с алюминиевым сотозаполнителем для головных обтекателей ракет-носителей.

К наиболее важным показателям качества конструкций аэрокосмического назначения из ПКМ, зависящих от применяемых технологий, относят объемное содержание волокна, как величину во многом определяющую физико – механические характеристики композита.

Известные исследования, связанные с разработкой технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ, в основном касались температурно-временных режимов отверждения, математического описания основных технологических параметров формообразования и создания системы автоматизированного контроля технологических режимов отверждения. К настоящему времени обоснованы режимы отверждения связующих, применяемых в композитных конструкциях, для отечественных наполнителей определены рабочие давления формования и назначены допуски на значения основных технологических параметров формования углепластиков.

В связи с этим, совершенствование технологических процессов изготовления композитных конструкций методом контактного формования в

условиях активного расширения компонентной базы ПКМ требует постановки и решения актуальной научной задачи-разработки методического и программно-математического обеспечения при выборе режима изменения давления, обеспечивающего снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна.

При этом в качестве задач исследования выбраны:

1. Обоснование актуальности и приоритетности разработки технологических процессов изготовления композитных конструкций методом контактного формования в условиях расширения компонентной базы ПКМ, обеспечивающих снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики уплотнения, кинетики и реологии процесса отверждения препрега, как наиболее определяющих процессов формообразования композита.
3. Разработка инженерной методики расчета технологических характеристик наполнителя, необходимых для расчета эквивалентной проницаемости в условиях близких к промышленному изготовлению композитов.
4. Разработка и реализация комплекса методического и программно-математического обеспечения выбора оптимального режима изменения давления, обеспечивающего снижение затрат и одновременно допустимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна при изготовлении композита методом контактного формования.
5. Осуществление промышленной апробации результатов исследований.

Во второй главе представлены теоретические исследования уплотнения препрега при изготовлении композитных конструкций методом контактного формования.

Рассматривалось поведение плоского слоистого образца из непрерывных волокон с размерами $2a \times 2b \times h_0$ (рис.1).

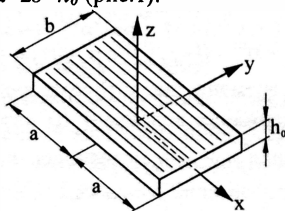


Рис. 1. Геометрия композита

Предполагалось, что давление к композиту прикладывается через пластину (цулагу) в направлении оси z , а течение связующего происходит во всех направлениях.

Проведено обобщение подхода, предложенного Gutowski T.G., Gebart B.R., Bruschke M.V. к описанию проницаемости наполнителя по отношению к движущейся вязкой среде. В результате чего получена зависимость для эквивалентной проницаемости, учитывающая особенности технологической

$$S_{\text{экв}} = \frac{\gamma r_f^2 (\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2} (1 - V_f)^3}{[(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2} + (1 - V_f)^3 / V_f^2] V_f^2} \quad (1)$$
$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{\gamma 3r_f^2 (\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2} (V_f - 1)^3 \left[A_s \frac{\sqrt{V_f/V_0} - 1}{(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^4} - P(t) \right]}{a^2 J \left[(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2} + (1 - V_f)^3 / V_f' \right] V_f \eta(t)} \quad (2)$$

В отличие от методики, предложенной Gutowski T.G. для учета технологических особенностей системы наполнитель - связующее при производстве композитных конструкций, эмпирические коэффициенты γ и A , определялись следующим образом. Уравнение (2) записывалось в виде:

$$\text{где } x_1 = 3r_f^2(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2}(V_f - 1)^3; x_2 = (\sqrt{V_f/V_0} - 1)/(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^4; x_3 = P(t);$$

$$x_4 = a^2 J \left[(\sqrt{V_a/V_f} - 1)^{5/2} + (1 - V_f)^3/V_f \right] V_f \eta(t); x_5 = dV_f/dt; \xi = 1/\gamma.$$

Для k зависимостей изменения объемного содержания волокна $V_f(t)$ была получена система:

[illegible]

Методом наименьших квадратов (МНК) из выражения

$$\sum_{i=1}^{p+k} (x_{1i} \cdot x_{3i} - A_s \cdot x_{1i} \cdot x_{2i} - \xi \cdot x_{4i} \cdot x_{5i})^2 \rightarrow \min$$

определялись искомые величины ξ и A_s .

Кинетика процесса отверждения препрега в условиях динамического эксперимента с постоянной скоростью нагрева описывалась уравнением:

$$\ln[\beta \cdot d\alpha/dT] = \ln(A) + n \cdot \ln(1-\alpha) + (-E_a/R) \cdot [1/T(t)] \quad (4)$$

где α – степень отверждения; t – время; A – предэкспоненциальный коэффициент; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; n – порядок реакции; β – скорость нагрева.

Кинетико-реологическая модель процесса отверждения препрега при заданном температурно-временном режиме описывалась системой:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = F(\alpha) \cdot \exp[-E(\alpha)/(R \cdot T(t))] \cdot (1-\alpha)^n \\ \eta(t, \alpha) = \eta_\infty(\alpha) \cdot \exp[E_\eta(\alpha)/(R \cdot T(t))] \end{cases} \quad (5)$$

где $F(\alpha)$, $E(\alpha)$ – зависимости эффективных предэкспоненциального коэффициента и энергии активации соответственно; $\eta_\infty(\alpha)$ – предельное значение вязкости при $T \rightarrow \infty$; $E_\eta(\alpha)$ – энергия активации вязкого течения; $\eta(t, \alpha)$ – зависимость изменения вязкости термореактивной полимерной системы от времени.

Мера интенсивности демпфирования процесса отверждения препрега определялась, как $tg\delta(t) = \eta'(t)/\eta''(t)$, где $\eta'(t)$ и $\eta''(t)$ – действительная и мнимая компоненты комплексной динамической вязкости соответственно. Из условия $tg\delta(t, \alpha) = 1$ определялось время гелеобразования t_{gel} термореактивной полимерной системы наполнитель-связующее.

Для построения функциональной зависимости $tg\delta(t, \alpha)$ использовалась математическая модель вида:

$$tg\delta(t, \alpha) = \xi(\alpha) \cdot \exp[\mathcal{A}(\alpha)/(R \cdot T(t))] \quad (6)$$

где $\xi(\alpha)$ и $\mathcal{A}(\alpha)$ – дискретно заданные функции.

Значения A , E_a , n и дискретные функции $\eta_\infty(\alpha)$, $E_\eta(\alpha)$, $F(\alpha)$, $E(\alpha)$, $\xi(\alpha)$, $\mathcal{A}(\alpha)$ определялись методом линейной множественной регрессии и методом МНК соответственно. При этом использовались результаты проведения не менее 3-х динамических экспериментов для каждого вида исследований при скоростях нагрева, перекрывающих область применения модели, по кинетике и реологии процесса отверждения препрега. Динамические эксперименты проводились при постоянных скоростях нагрева, перекрывающих область применения модели.

Система уравнений (2), (5), (6) связывает основные технологические факторы изготовления композита: кинетику и реологию процесса отверждения, режимы отверждения и изменения давления, технологические характеристики наполнителя.

При известных функциях $F(\alpha)$, $E(\alpha)$, $\eta_\infty(\alpha)$, $E_\eta(\alpha)$, $\xi(\alpha)$, $\mathcal{A}(\alpha)$, $T(t)$, $P(t)$ параметрах n , r_f , A_s , V_0 , V_a , γ и размерах препрега a , b полученная система уравнений позво-

ляет моделировать зависимости степени отверждения $\alpha(t)$, вязкости $\eta(t)$, объемного содержания волокна $V_f(t)$ и время гелеобразования t_{gel} при заданных температурно-временном режиме отверждения $T(t)$ и изменения давления $P(t)$.

Третья глава посвящена вопросам методического и технологического обеспечения исследований динамики уплотнения, кинетики и реологии процесса отверждения препрега при горячем прессовании.

Для исследования процесса уплотнения композита создана экспериментальная лабораторная установка, в состав которой входят: пресс, электронная многофункциональная измерительная головка ABSOLUTE DIGIMATIC ID-C серии 543, регулятор температуры Термодат–25Е1 и компьютер.

Температурно–временной режим отверждения $T(t)$ предусматривал нагрев со скоростью $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 170°C и выдержку при заданной температуре не менее 3 часов. В результате получены экспериментальные зависимости толщины образцов от времени в процессе горячего прессования, которые приведены на рис.2.

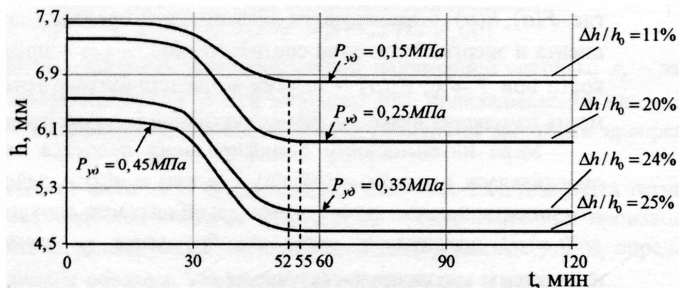


Рис. 2. Экспериментальные зависимости толщины образцов h от времени t при горячем прессовании

По истечении 55 мин наблюдалось прекращение изменения толщины образца, что можно связать с процессом гелеобразования, начинающимся в интервале температур $124\text{--}130^\circ\text{C}$. Практический интерес представляли первые 120 минут, так как в указанный период температура основных элементов конструкции лабораторной установки имеет наибольшие изменения. За время горячего прессования уплотнение образцов составило 11 %, 20 %, 24 % и 25 % соответственно.

Исследование кинетики процесса отверждения препрега проводилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием калориметра ДСК–Д. При этом в условиях нагрева с постоянной скоростью регистрировалось тепловыделение. По зафиксированной в экспериментах величине пика тепловыделений с помощью разработанного программно-математического обеспечения выполнялся расчет значений степени отверждения и скорости реакции отверждения.

Анализ 36 различных партий препрега на основе связующего ЭНФБ по ТУ 1-596-36-2005 и соответствующих углеродных наполнителей арт.3692,

арт.4510, арт.4500 компании Porcher Industries, при скоростях нагрева (1–10) °C/мин, показал, что модель (4) приемлема для моделирования кинетики процесса отверждения препрега в условиях нагрева с постоянной скоростью. При этом отклонение расчетных значений степени отверждения от экспериментальных в области скоростей нагрева $1^{\circ}\text{C}/\text{мин} \leq \beta \leq 3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ не превышает 3%, в области скоростей нагрева $3^{\circ}\text{C}/\text{мин} < \beta \leq 10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ не превышает 7%.

Исследование реологии отверждения препрега проводилось методом динамического механического анализа на вискоанализаторе VA 4000 фирмы «Метравиб» (Франция). Использовался метод вынужденных колебаний, согласно которому в исследуемом образце возбуждались периодические малоамплитудные деформации с заданной частотой. С помощью известных методов определялась вязкость, мера интенсивности демпфирования и время гелеобразования термореактивной полимерной системы.

В качестве примера на рис. 3, 4 приведены зависимости степени отверждения, вязкости препрега на связующем ЭНФБ и углеродной ткани арт. 3692.

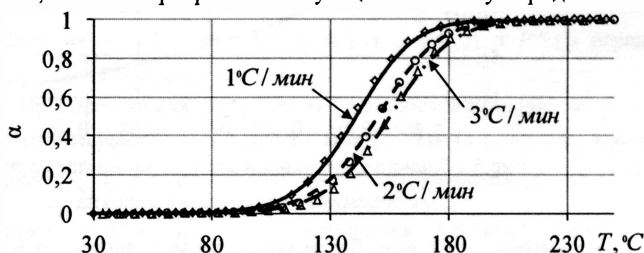


Рис. 3. Кинетика процесса отверждения препрега ЭНФБ/3692. Точками на графике представлены экспериментальные данные, линией — рассчитанные по предложенной модели (4)

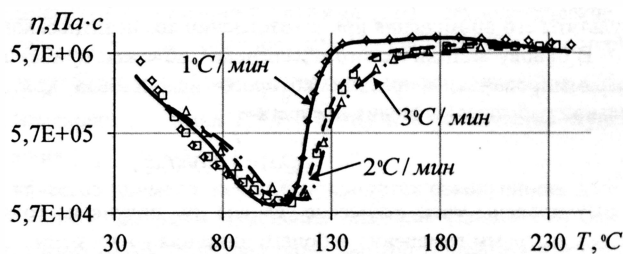


Рис. 4. Изменение вязкости препрега ЭНФБ/3692 при отверждении.

Точками на графике представлены экспериментальные данные, линией — рассчитанные по предложенной модели (5)

По экспериментальным зависимостям изменения толщины $h(t)$ образцов при горячем прессовании (рис. 2) строились зависимости изменения объ-

емного содержания волокна $V_f(t)$. Компонентный состав композита определяли методом гелиевой пикнометрии.

По завершении горячего прессования расхождения значений объемного содержания волокна, рассчитанных по модели (2) и полученных при экспериментальном определении компонентного состава композита, не превысили 6%.

На основе полученных зависимостей $V_f(t)$, экспериментальной зависимости вязкости термореактивной полимерной системы наполнитель-связующее $\eta(t)$ и решения системы (3) определили искомые значения $\gamma = 10152$ и $A_s = 3286$ Па. В результате для эквивалентной проницаемости $S_{\text{эк}}(V_f)$ получили зависимость, представленную на рис.5.

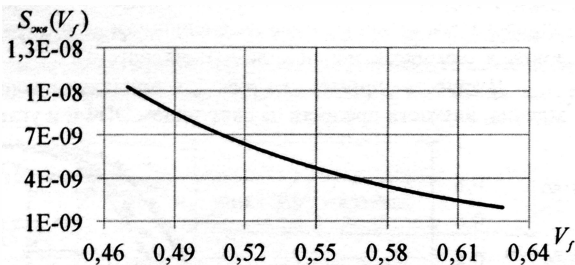


Рис.5 - Зависимость эквивалентной проницаемости $S_{\text{эк}}$ от объемного содержания волокна V_f

В четвертой главе разработан комплекс методического и программно-математического обеспечения согласованного выбора режимов изменения температуры и давления, позволяющего достигнуть требуемый уровень объемного содержания волокна, в технологическом процессе формования композитных конструкций методом контактного формования и представлены практические результаты его применения при изготовлении композитных конструкций.

В основу методического обеспечения положен принцип динамического программирования, в рамках которого использован критерий минимума удельной работы уплотнения препрега

$$Q(t) = \int_0^t P(t) \dot{h}(t) dt,$$

сформулированы математические условия для получения совокупности допустимых диаграмм изменения рабочего давления во времени

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \rightarrow \min \\ t \in [0; t^*] \\ V_f^{\min} \leq V_f(t^*) \leq V_f^{\max} \\ P_f^{\min} \leq P_f(t) \leq P_f^{\max} \end{cases}, \quad (7)$$

где $\dot{h}$ - скорость уплотнения композита, t - текущее время, t^* - момент времени, отражающий состояние термореактивной полимерной системы (время гелеобразования или стеклования), $V_f^{\min}, V_f^{\max}$ - значения нижней и верхней границы допуска на долю наполнителя в объеме композиционного материала.

В разработанной программе расчета, реализующей условия (7), совокупность искомых диаграмм изменения рабочего давления разыскивалась в виде:

$$P(t) = \begin{cases} \hat{P}_j + \hat{B} \cdot t & \text{при } t_{j-1} \leq t \leq t_j^{**} \\ \hat{P}_j & \text{при } t_j^{**} \leq t \leq t_j \end{cases}, j=1, 2, \dots, \chi_{cm}$$

где $\hat{B}$ - скорость подъема давления, $\hat{P}$ - значение давления на j -ой ступеньке, t_j^{**} - время пересечения линий подъема и постоянного значения давления j -ой ступени, χ_{cm} - число ступеней в искомой диаграмме изменения давления.

Ограничением на режим изменения давления является условие

$$P_j^{\min}(t) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(t),$$

где $P_j^{\min}(t)$, $P_j^{\max}(t)$ - верхний и нижний пределы изменения значения величины давления на j -ой ступеньке. Значения $\hat{B}$, $P_j^{\min}(t)$ и $P_j^{\max}(t)$ определяются возможностями оборудования.

При проведении расчетов выполнялось разбиение на m - частей временного интервала $[0; t^*]$ так, что $m \gg \chi_{cm}$. Тогда $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, где $\Delta t = t^*/m$. Для интервала $[t_i; t_{i+1}]$ определялись значения: давления $P_i = P[t_i + h/2]$; изменения толщины $\Delta h_i = V_0 h_0 \left[\frac{1}{V_f^i} - \frac{1}{V_f^{i+1}} \right]$; изменения удельной работы уплотнения $\Delta Q_i = P_i \cdot \Delta h_i$, где $i = 1, 2, 3 \dots m$.

При реализации расчета использовались следующие исходные данные: зависимость вязкости термореактивной полимерной системы $\eta(t)$ от известного температурно-временного режима $T(t)$; технологические параметры наполнителя r_f , γ и A , определяемые из системы (3); характеристика препрега V_0 и требования к объемному содержанию волокна $V_f^{\max}$ и $V_f^{\min}$; параметры режима изменения давления $P_j^{\min}(t)$, $P_j^{\max}(t)$ и $\hat{B}$; количество ступенек изменения давления χ_{cm} .

В качестве примера на рис.6 приводится совокупность допустимых кусочно-линейных диаграмм изменения давления (линии 1-6), которые соответствуют известному температурно-временному режиму отверждения $T(t)$ и позволяют обеспечить требуемый уровень объемной доли наполнителя в композиционном материале $V_f \in [0,6; 0,7]$.

Расчеты проведены для условий изготовления композитных конструкций на основе связующего ЭНФБ и углеродной ткани арт.3692 методом автоклавного формования при 3,5, и 6 ступеньках кусочно-линейной функции $P(t)$. Значение времени t^* выбрано соответствующим температуре стеклования $T_c = 165^\circ\text{C}$, и равным $t^* = 72$ мин. Температурно-временной режим отвер-

ждения $T(t)$ предусматривал нагрев со скоростью 2°C/мин до 170°C и выдержку при заданной температуре не менее 6 часов. Были приняты следующие числовые значения параметров и коэффициентов: $\dot{B}=0,5 \cdot 10^5 \text{ Па/мин}$ – скорость подъема давления, $\gamma=10152$ – эмпирический коэффициент, $r_f=3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и $A_f=3286 \text{ Па}$ – соответственно радиус волокна и коэффициент упругости волокон, $V_0=0,47$ – начальное значение объемного содержания волокна в препреге. При этом предполагалось, что была выбрана ортотропная схема армирования композиционного материала, а размеры изделия были приняты равными $a=b=1 \text{ м}$. Количество слоев-8. Условия изменения рабочего давления: диапазон изменения $P_f \in [0,1; 0,6] \text{ МПа}$, шаг изменения давления $\Delta P_f=0,05 \text{ МПа}$.

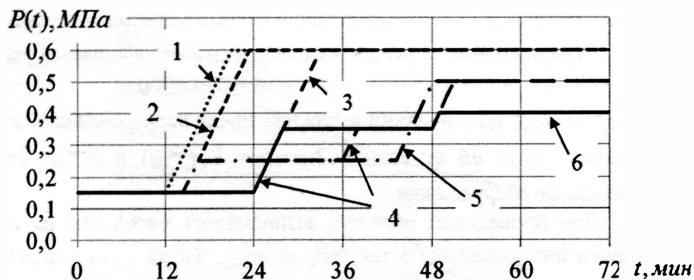


Рис. 6. Совокупность допустимых диаграмм изменения давления $P(t)$ во времени t для различного количества ступеней изменения χ_{cm} ($\chi_{cm}=3,5,6$)

$3(Q=1,1 \cdot 10^6)$, $6(Q=6 \cdot 10^5)$ – кусочно-линейные функции $P(t)$ для $\chi_{cm}=3$;
 $2(Q=1,2 \cdot 10^6)$, $5(Q=5,5 \cdot 10^5)$ – кусочно-линейные функции $P(t)$ для $\chi_{cm}=5$;
 $1(Q=1,3 \cdot 10^6)$, $4(Q=5,4 \cdot 10^5)$ – кусочно-линейные функции $P(t)$ для $\chi_{cm}=6$.

Анализ диаграмм изменения давления $P(t)$ позволил установить функциональную связь (рис.7) между объемным содержанием наполнителя V_f и удельной работой уплотнения препрега Q . Показано, что снижение затрат на формование композитных конструкций следует ожидать в окрестности нижней границы допустимых значений $V_f^{\min}$.

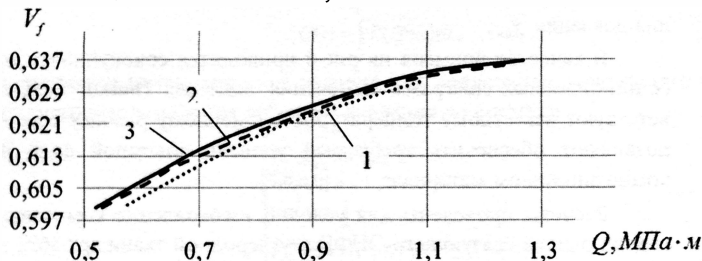


Рис. 7. Зависимости изменения объемного содержания волокна от удельной работы уплотнения для различных значений χ_{cm} .

Кривые 1,2,3 соответствуют значениям $\chi_{cm}=3,5,6$.

Другим важным следствием установленной связи является снижение удельной работы уплотнения препрега при увеличении числа ступеней χ_{cm} (рис. 8), что показывает стремление к непрерывной и монотонно изменяющейся кривой кусочно-линейной функции $P(t)$, соответствующей наименьшему значению удельной работы уплотнения препрега.

Результаты изготовления по указанным в таблице (образцы изготавливались в соответствии с линиями 3 и 6 рис.6) режимам при выборе условий уплотнения препрега раскрывают эффективность применения критерия $Q(t)$. Удельная работа уплотнения композита, которая коррелирует с затратами на изготовление, в рассматриваемых случаях различалась в 1,8 раза. Показано, что выбор режима изменения давления на базе разработанного комплекса методического и программно-математического обеспечения позволяет достигнуть требуемый уровень физико-механических характеристик, необходимое для эксплуатации изделия объемное содержание волокна и одновременно снижение затрат.

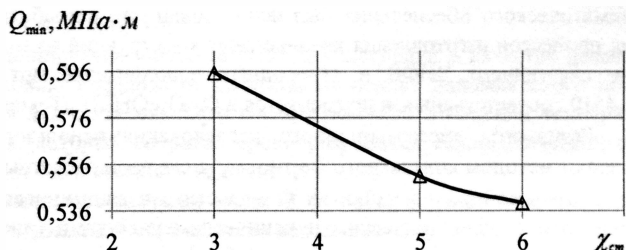


Рис. 8. Зависимость изменения минимальной удельной работы Q_{min} от χ_{cm}

Таблица

Режим формирования	Физико – механические характеристики			Компонентный состав	
	$\sigma^0, \text{МПа}$	$E^0, \text{МПа}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$V_f, \%$	$\Pi, \%$
	Требования к уровню свойств				
	>750	>65000	1,54-1,6	0,6-0,63	<2
Линия 3	773	67400	1,59	0,62	1
Линия 6	760	66187	1,55	0,614	1,2

где σ^0 – предел прочности при растяжении, E^0 – модуль упругости при растяжении, ρ – плотность, Π – пористость.

Полученный результат показывает также, что диаграммы нагружения препрега могут быть усовершенствованы путем задержки начала действия давления по отношению к началу нагрева и увеличения уровня максимального давления в соответствии с возможностями оборудования.

Предложенный подход, основанный на знании модели $V_f = F(S_{жж}, \eta, \alpha)$, позволяет учесть индивидуальные особенности партии конкретного сырья, которые состоят в допустимых отклонениях $\Delta\alpha$, $\Delta\eta$, $\Delta S_{жж}$ от номинальных значений технологических, кинетических и реологических параметров процесса уплотнения препрега. В этом случае в качестве проектного значения объемной доли наполнителя $V_f^{пр}$, обеспечивающего минимально допустимый уровень удельной работы уплотнения препрега $Q_{мин}$, следует выбрать

$$V_f^{пр} = \frac{\partial V_f}{\partial S_{жж}} \Delta S_{жж} + \frac{\partial V_f}{\partial \eta} \Delta \eta + \frac{\partial V_f}{\partial \alpha} \Delta \alpha + V_f^{мин},$$

где частные производные могут быть найдены из модели численными методами.

В этом случае исключается брак композитных конструкций по допустимому уровню объемной доли наполнителя.

Предложенный в работе комплекс методического и программно-математического обеспечения был использован при разработке технологических процессов изготовления композитных конструкций из материалов на основе связующего ЭНФБ и углеродных наполнителей арт.3692, арт.4510, арт.4510 соответственно, и применяется в ОАО «ОНПП «Технология».

Результаты диссертационного исследования использованы при изготовлении методом контактного формования следующих летных изделий:

- трехслойной обечайки из углепластика с алюминиевым сотовым наполнителем с цилиндрическим и коническим участками (рис. 9 а), а также нескольких типов обтекателей (рис. 9 б, в), уголка и диафрагмы для комплектации переднего отсека ракеты - носителя KSLV-1 конструкции ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»;
- крышки люков для комплектации створок головного обтекателя ракеты-носителя «Протон-М» конструкции ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»;
- трехслойной бленды из углепластика конструкции ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

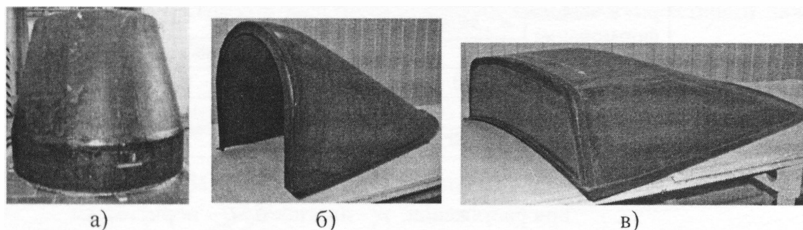


Рис. 9. Фотографии некоторых видов изделий для РН «KSLV-1»
а) - обечайка; б), в) – обтекатели

Применение предложенного методического и программно-математического обеспечения позволило по сравнению с прежними методами отработки технологических режимов снизить в 1,7 раза время и на 37%

количество препрега, которые необходимы при выборе режимов формования. Удалось обеспечить требуемые показатели качества изделий, в том числе необходимое объемное содержание волокна, а также повысить физико-механические характеристики до 24% при замене ленты ЛУ-П на ткань арт.3692 в случае изготовления обтекателей.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный комплекс методического и программно-математического обеспечения технологии изготовления композитных конструкций методом контактного формования позволяет описывать уплотнение препрега с учётом пространственной структуры наполнителя и совместного влияния свойств наполнителя и связующего.

2. Применение комплекса методического и программно-математического обеспечения метода контактного формования показало, что:

- важнейший показатель качества композитных конструкций – доля наполнителя в композиционном материале является функцией удельной работы уплотнения композита,
- использование удельной работы уплотнения в качестве целевой функции позволило предложить алгоритм на основе динамического программирования для согласованного выбора режимов изменения температуры и давления, который сократил сроки разработки технологических процессов и снизил себестоимость изделий,
- наименьшее значение целевой функции соответствует окрестности нижней границы допуска на долю наполнителя,
- при практическом выборе диаграммы изменения давления проектное значение доли наполнителя в композиционном материале должно учитывать поправку на допустимое колебание свойств исходного сырья.

3. Для описания уплотнения препрега в разработанном комплексе методического и программно-математического обеспечения контактного формования предложены:

- уравнения кинетики и реологии процесса отверждения, и экспериментально-теоретические методики построения этих уравнений, позволяющие учесть совместное влияние наполнителя и связующего,
- методика определения эмпирических коэффициентов эквивалентной проницаемости с учетом пространственной структуры наполнителя в условиях, близких к промышленному изготовлению композитов.

4. Результаты работы использованы при производстве летных изделий ракетно-космической техники и разработке технологических процессов изготовления композитных конструкций на ОАО «ОНПП «Технология», ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева».

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Эффективность применения углеродных однонаправленных и армированных тканей при замене углеродных лент типа ЛУ-П и ЭЛУР для изделий аэрокосмического назначения / Е.В. Беляков [и др.] // Теория и практика

технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Корпоративные, нано - и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности. (ТПКММ): Тезисы докладов 5-й Московской Международной конференции, 26-29 апреля 2005 г., г. Москва. М., 2007. С. 725-726.

2. Конструкторско-технологические аспекты изготовления замкнутого контура цилиндр - конус для трехслойной углепластиковой обечайки с алюминиевым сотозаполнителем корейской ракеты-носителя / Е.В. Беляков [и др.]

// Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XVIII Международной научно-технической конференции. Обнинск, 2007. С. 205-207.

3. Беляков Е.В., Выморков Н.В., Тарасов В.А. Эффективность использования углеродных однонаправленных и армированных тканей для изготовления аэрокосмической техники // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIII Академических чтений по космонавтике / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М., 2009. С. 544.

4. В.А. Тарасов, Е.В. Беляков. Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композитных конструкций РКТ // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2011. №1. С.113-120.

5. Беляков Е.В., Тарасов В.А. Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композиционных материалов для изделий РКТ // XXXVII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ: Научные труды Международной молодежной научной конференции; В 8 томах. М., 2011.Т.8. С. 205–207.

6. Belyakov E.V., Tarasov V.A., Boyarskaya R.V. Viscosity and Kinetics of Epoxy of Composite Constructions Manufactured by Method of Vacuum Forming // Proceedings of the First International Workshop on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications held at Glyndwr University. Wrexham (North Wales, UK), 2011. P. 75–81.

7. Беляков Е.В., Тарасов В.А. Динамика уплотнения композиционного материала при горячем прессовании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №12. С. 53-57.

8. Беляков Е.В., Тарасов В.А. Исследование уплотнения композита на основе углеродной ткани в условиях горячего прессования // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVI Академических чтений по космонавтике / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М., 2012. С. 532.

9. Беляков Е.В., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №5. С.37-43.